



# **Fondamenti di Elettronica, Sez.2**

**Alessandra Flammini**  
**[alessandra.flammini@unibs.it](mailto:alessandra.flammini@unibs.it)**  
**Ufficio 24 Dip. Ingegneria dell'Informazione**  
**030-3715627 Lunedì 16:30-18:30**

# **Proprietà dei materiali, diodi**

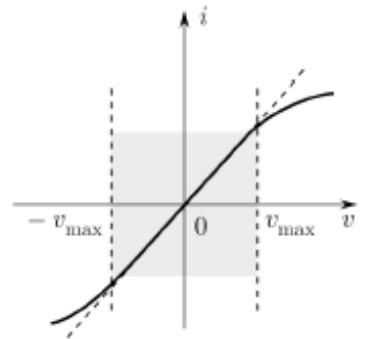
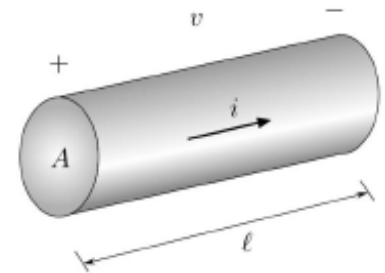
## Bipoli resistivi (4)

❑ Resistore (3):  $p(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{v^2(t)}{R}$

- ❑ la potenza (assorbita) è sempre positiva ( $R > 0$ );
- ❑ elemento passivo: l'energia assorbita è sempre positiva;
- ❑ l'energia assorbita è convertita in calore (effetto Joule).

❑ Resistore reale:

- ❑ filo con resistività  $\rho$  percorso da corrente  $R = \rho \frac{l}{A}$
- ❑ la caratteristica non può essere perfettamente lineare!
- ❑ dispositivi fisici vs. elementi circuitali ideali.



36



# La tavola degli elementi

## Tavola Periodica degli Elementi

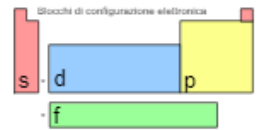
Gruppo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.008 1.00794 1 H Idrogeno																	4.0026 4.002602 2 He Elio
2	6.94 6.941 3 Li Litio	9.0122 9.012182 4 Be Berilio																20.180 20.1797 10 Ne Neon
3	22.990 22.98977 11 Na Sodio	24.305 24.30409 12 Mg Magnesio																39.948 39.9481 18 Ar Argon
4	39.098 39.0983 19 K Potassio	40.078 40.0783 20 Ca Calcio	44.956 44.9559 21 Sc Scandio	47.867 47.8671 22 Ti Titanio	50.942 50.9415 23 V Vanadio	51.996 51.9961 24 Cr Cromo	54.938 54.938045 25 Mn Manganese	55.845 55.8452 26 Fe Ferro	58.933 58.9332 27 Co Cobalto	58.693 58.6934 28 Ni Nichelio	63.546 63.54688 29 Cu Rame	65.38 65.38 30 Zn Zinco	69.723 69.7231 31 Ga Gallio	72.630 72.6307 32 Ge Germanio	74.922 74.9216 33 As Arsenico	78.971 78.9718 34 Se Selenio	79.904 79.9041 35 Br Bromo	83.796 83.796 36 Kr Kripton
5	85.468 85.4678 37 Rb Rubidio	87.62 87.62 38 Sr Stronzio	88.906 88.9058 39 Y Ittrio	91.224 91.2242 40 Zr Zirconio	92.906 92.9064 41 Nb Niobio	95.95 95.94 42 Mo Molibdeno	(96) 95.94 43 Tc Tecnecio	101.07 101.07 44 Ru Rutenio	102.91 102.91 45 Rh Rodio	106.42 106.42 46 Pd Palladio	107.87 107.87 47 Ag Argento	112.41 112.41 48 Cd Cadmio	114.82 114.818 49 In Indio	118.710 118.710 50 Sn Stagno	121.76 121.76 51 Sb Antimonio	127.60 127.60 52 Te Tellurio	126.905 126.9054 53 I Iodio	131.29 131.29 54 Xe Xenon
6	132.91 132.905 55 Cs Cesio	137.33 137.327 56 Ba Bario	140.90764 140.90764 57 Lu Lutezio	174.967 174.967 72 Hf Hafnio	180.94788 180.94788 73 Ta Tantalio	183.84 183.84 74 W Tungsteno	186.21 186.21 75 Re Renio	190.23 190.23 76 Os Osmio	192.22 192.22 77 Ir Iridio	195.08 195.08 78 Pt Platino	196.967 196.967 79 Au Oro	200.59 200.59 80 Hg Mercurio	204.38 204.38 81 Tl Tallio	207.2 207.2 82 Pb Piombo	208.98 208.98 83 Bi Bismuto	(210) 210 84 Po Polonio	(210) 210 85 At Astatio	(220) 220 86 Rn Radon
7	(223) 223 87 Fr Francio	(226) 226 88 Ra RADIO	(262) 262 103 Lr Laurenzio	(261) 261 104 Rf Rutherfordio	(262) 262 105 Db Dubnio	(266) 266 106 Sg Seaborgio	(264) 264 107 Bh Bohrio	(277) 277 108 Hs Hassio	(288) 288 109 Mt Meitnerio	(271) 271 110 Ds Darmstadtio	(272) 272 111 Rg Roentgenio	(285) 285 112 Cn Copernicio	(284) 284 113 Nh Nihonio	(289) 289 114 Fl Flerovio	(288) 288 115 Mc Moscovio	(292) 292 116 Lv Livermorio	(294) 294 117 Ts Tennesso	(294) 294 118 Og Oganesson

peso atomico standard  
 o numero di massa più stabile  
 prima energia di ionizzazione  
 in kJ/mol  
 simbolo chimico  
 nome  
 configurazione elettronica  
 gli elementi radioattivi hanno  
 le masse fra le parentesi

numero atomico  
 elettronegatività  
 stati di ossidazione  
 elementi più comuni sono in grassetto

**55.845**    **26**  
**762.5**    **1.83**  
**Fe**  
**Ferro**  
**[Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>**

+6  
 +5  
 +4  
 +3  
 +2  
 +1  
 -1  
 -2



Note  
 \* 1 kJ/mol = 0.0103636 eV  
 \* tutti gli elementi sono indicati a avere l'ossidazione di zero.

138.91 138.91 57 La Lantanio	140.12 140.12 58 Ce Cerio	140.91 140.91 59 Pr Praseodimio	144.24 144.24 60 Nd Neodimio	(145) 145 61 Pm Promezio	150.36 150.36 62 Sm Samarzio	151.96 151.96 63 Eu Europio	157.25 157.25 64 Gd Gadolmio	158.93 158.93 65 Tb Terbio	162.50 162.50 66 Dy Disperisio	164.93 164.93 67 Ho Olimio	167.25 167.25 68 Er Erbio	168.93 168.93 69 Tm Tulio	173.05 173.05 70 Yb Itterbio
(227) 227 89 Ac Attinio	232.04 232.04 90 Th Torio	231.04 231.04 91 Pa Protattinio	238.03 238.03 92 U Uranio	(237) 237 93 Np Netunio	(244) 244 94 Pu Plutonio	(243) 243 95 Am Americio	(247) 247 96 Cm Curio	(247) 247 97 Bk Berkelio	(251) 251 98 Cf Californio	(252) 252 99 Es Einsteinio	(257) 257 100 Fm Fermio	(259) 259 101 Md Mendelevio	(259) 259 102 No Nobelio

- metalli alcalini
- metalli alcalino terrosi
- lantanoidi
- metalli di transizione
- proprietà sconosciute
- metalli di post-transizione
- metalloidi
- non metalli reattivi
- gas nobili
- attinoidi

# Configurazione elettronica

- **Configurazione elettronica = Disposizione degli elettroni e comportamento attorno ai nuclei di uno o più atomi**
  - **Orbitali atomici = stati stazionari di funzione d'onda elettronica (eq. di Schrodinger).**
    - Il quadrato del modulo della funzione d'onda in un punto descrive la probabilità di trovare l'elettrone in quell punto
    - **Gli orbitali sono distinti da 4 numeri quantici (non è possibile che due elettroni abbiano gli stessi 4 valori)**
      - $n$  = numero quantico principale (es. 1=K max 2e; 2=L max 8e; 3=M max 18e; 4=N 32e;..)
      - $l$  = numero quantico orbitale (es. 0=s max 2e; 1=p max 6e; 2=d max 10e; 3=f max 14e;..)
      - $m_l$  = numero quantico magnetico
      - $m_s$  = numero quantico di spin
    - **L'ordine di riempimento segue la direzione crescente dell'energia**  
1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p 5s 4d 5p 6s 4f 5d 6p 7s 5f 6d 7p
    - **Es. Silicio (numero atomico 14)  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$**
  - **Orbitali molecolari (è decisamente più complicato)**
-

# Resistività dei materiali

- **Resistività  $\rho$** 
  - Proprietà dei materiali che si misura in  $\Omega \cdot m$
  - E' l'inverso della conducibilità  $\sigma$  ( $\sigma = 1/ \rho$ )
  - La resistività dipende dalla temperatura T
- **Conduttori (metalli, materiali con legami molecolari ionici)**
  - Resistività molto bassa  $\rho < 10^{-5} \Omega \cdot m$  (favoriscono il flusso di elettroni)
  - La resistività aumenta in modo lineare con T
- **Isolanti (plastica, legno, vetro, aria)**
  - Resistività molto elevata  $\rho > 10^3 \Omega \cdot m$  (si oppongono al flusso di elettroni)
  - La resistività diminuisce all'aumentare di T
  - I materiali isolanti hanno costante dielettrica elevata e sono utilizzati nei condensatori
- **Semiconduttori (Silicio, tessuti organici, materiali con legami covalenti)**
  - Resistività intermedia  $10^{-5} \Omega \cdot m < \rho < 10^3 \Omega \cdot m$
  - La resistività diminuisce all'aumentare di T
  - Possono essere mischiati con materiali (o ossidati) per diventare isolanti

# Il materiale base dell'elettronica: il Silicio (Si)

- **Numero atomico 14**

- Dopo l'ossigeno è l'elemento più presente in natura (basso costo)
- 4 elettroni in banda di valenza (strato più esterno)
- Gli atomi si legano in legame covalente (reticolo che allo zero assoluto non ha elettroni liberi, quindi è un isolante).
- Semiconduttore intrinseco, ossia formato da atomi dello stesso tipo.
- Ci sono  $5 \cdot 10^{22}$  atomi in un  $\text{cm}^3$  di Si
- All'aumentare di T si rompono i legami generando una coppia elettrone-lacuna in banda di conduzione, che nei semiconduttori è energeticamente vicina alla banda di valenza (Si ricorda che nei semiconduttori la resistività diminuisce all'aumentare di T).
- L'elettrone è la carica elementare negativa  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$ .
- Gli elettroni si dicono anche portatori n
- La corrente è il flusso inverso del flusso degli elettroni (si ricorda che si tratta di un flusso di gruppo)

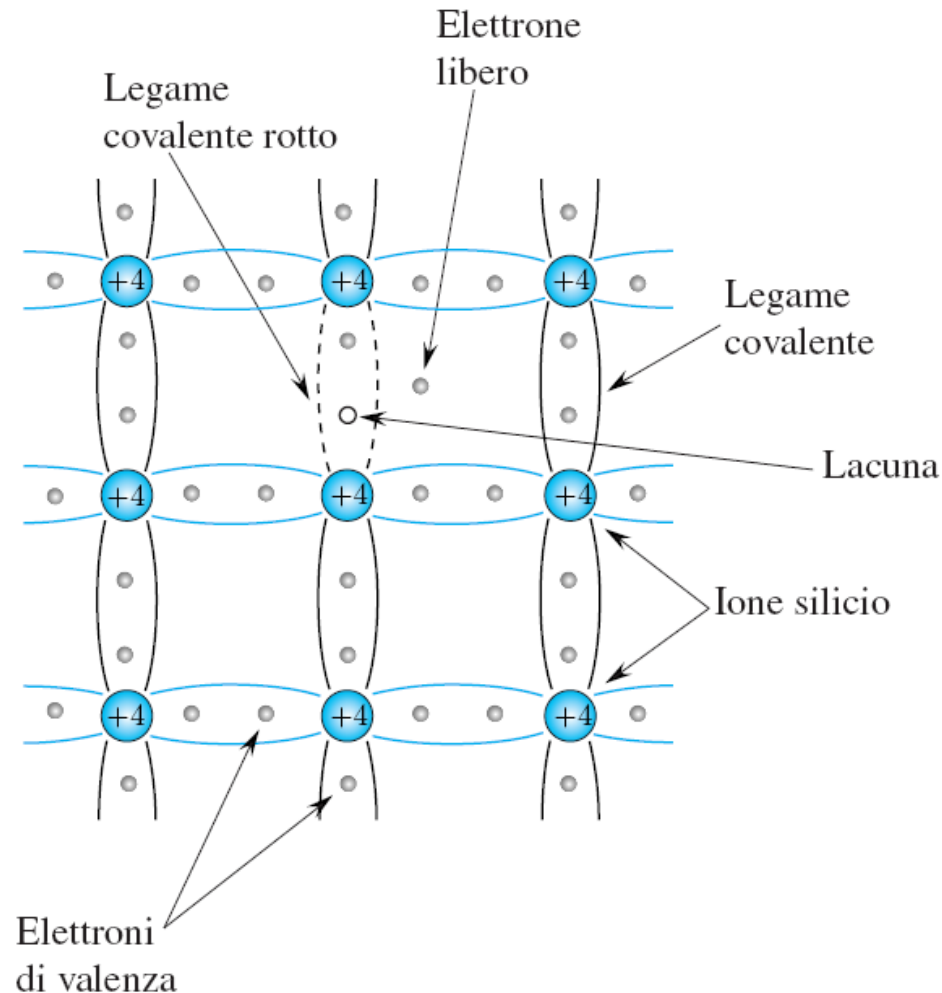
# Il concetto di lacuna nel Silicio

- **Un elettrone che lascia la sua posizione nel reticolo genera una lacuna**
  - La lacuna è un posto vuoto nella struttura in grado di ricevere in banda di valenza un elettrone dalla banda di conduzione.
  - E' la carica elementare positiva  $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$  ed è naturalmente uguale in valore assoluto a quella dell'elettrone.
  - La lacuna ha una sua mobilità (portatore p)
  - Il livello di Fermi è al centro della banda proibita ( $n=p$ ): se si avvicina alla banda di conduzione, aumenta la probabilità di avere portatori n (viceversa)
- **Silicio intrinseco e Silicio drogato**
  - Nel Si intrinseco si possono introdurre impurità (in ragione di parti per milione ppm) ottenendo così Si drogato
  - Il Si si droga in modo p aggiungendo sostanze con 3 elettroni di valenza (boro  ${}_5\text{B}$  -> drogaggio p)
  - Il Si si droga in modo n aggiungendo sostanze con 5 elettroni di valenza (fosforo  ${}_{15}\text{P}$  -> drogaggio n)



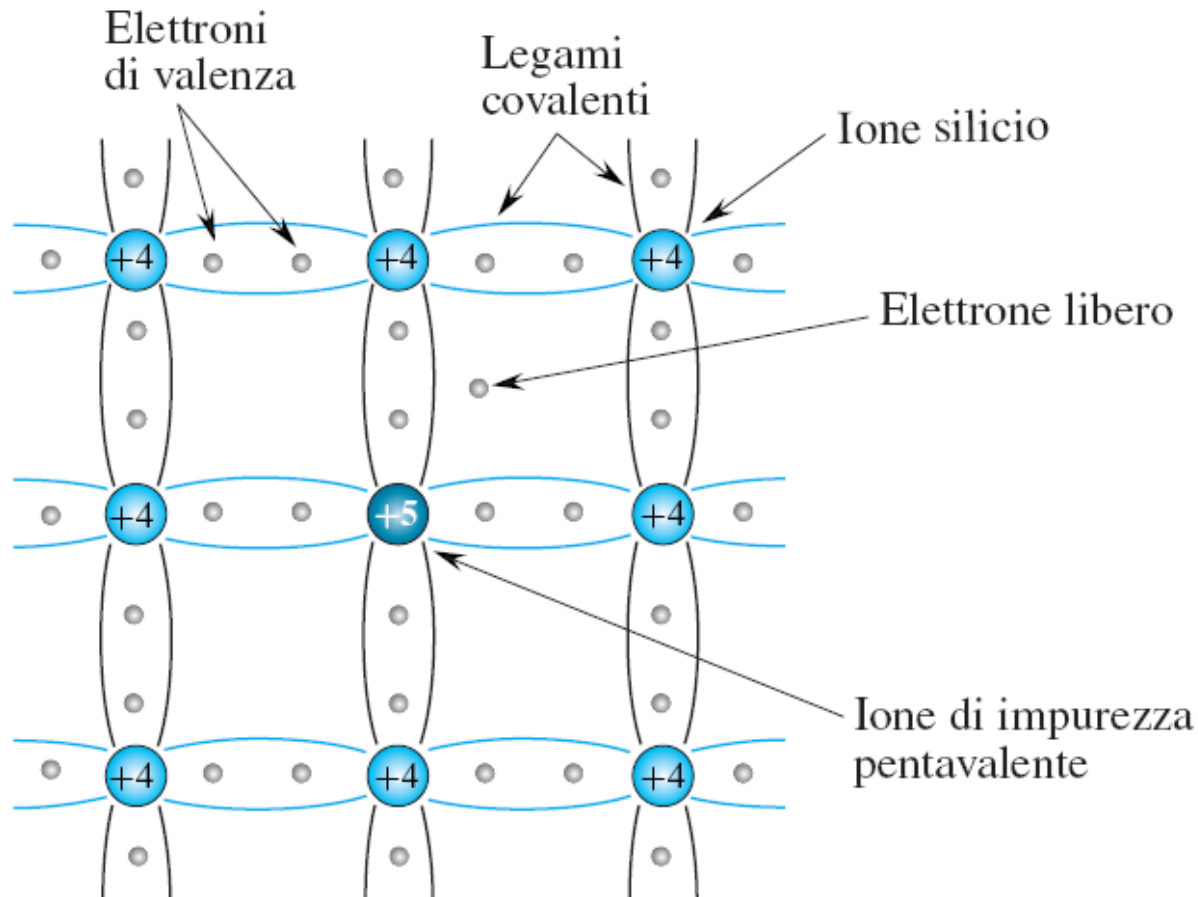
# Silicio intrinseco

- Applicando tensione o aumentando la temperatura si creano coppie p-n di portatori



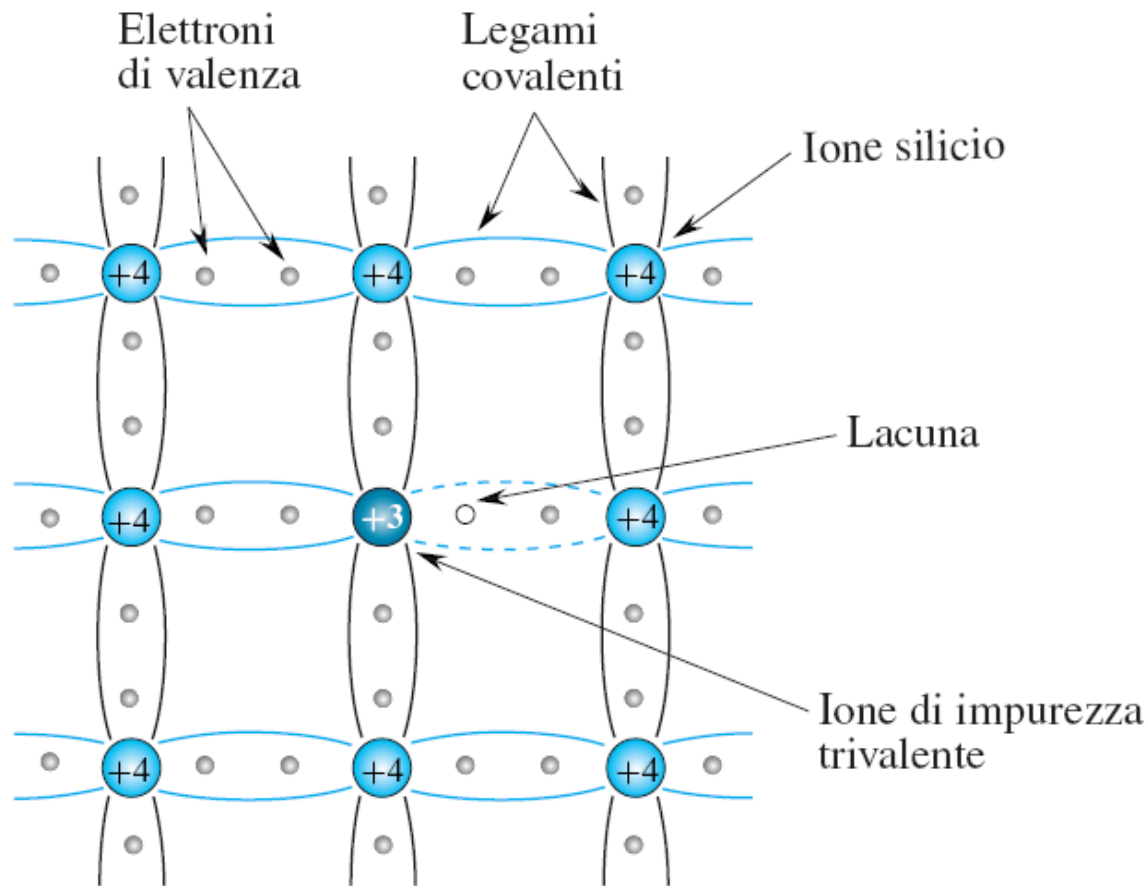
# Silicio drogato n (es. fosforo, 1 atomo ogni $10^6$ )

- Ho un elettrone libero che con poca energia può muoversi
- Nota: il materiale è elettricamente neutro



# Silicio drogato p (es. boro)

- Ho una lacuna in grado di ospitare elettroni liberi
- Nota: quando la lacuna viene riempita da un elettrone che crea un'altra lacuna, si dice che la lacuna si è mossa



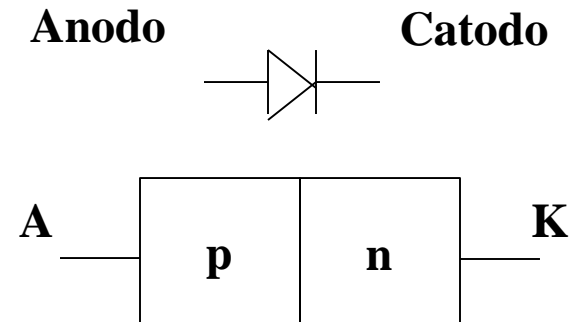
# Caratteristiche delle aree drogate

- **La percentuale di drogaggio è bassa, es. 1 atomo ogni  $10^6$ - $10^8$** 
  - Aree di tipo p: concentrazione drogante = concentrazione accettori  $N_A$  (atomi/m<sup>3</sup>)
  - Aree di tipo n: concentrazione drogante = concentrazione donatori  $N_D$  (atomi/m<sup>3</sup>)
  - La neutralità impone che  $n + N_A = p + N_D$  ( $n, p$  = portatori maggioritari)
  - La concentrazione dei droganti è  $10^{13}$ - $10^{20}$  (tip.  $10^{15}$ - $10^{16}$ ) atomi/cm<sup>3</sup>
  - La concentrazione del Si è  $5 \cdot 10^{22}$  atomi/cm<sup>3</sup>
- **Il Si non drogato (Si intrinseco) avrebbe comunque dei portatori con concentrazione  $n_{Si}=p_{Si}=n_i$  detti portatori minoritari (si può dimostrare che  $n_{Si} \cdot p_{Si}=n_i^2$ )**
  - La concentrazione dei portatori minoritari  $n_i$  è circa  $10^{10}$  portatori/cm<sup>3</sup>
- **Nelle aree drogate ci sono portatori maggioritari e minoritari**
- **La concentrazione dei portatori maggioritari ( $N_A$   $N_D$ ) non dipende dalla Temperatura**
- **La concentrazione dei portatori minoritari dipende dalla Temperatura**

# Giunzione PN

- **La giunzione pn è l'unione di due zone di Silicio drogate in modo opposto**

- **Anodo: terminale della zona p**
- **Catodo: terminale della zona n**
- **le dimensioni sono  $\sim \mu\text{m}$**
- **la corrente  $I$  è un flusso di portatori p**
- **la corrente  $I$  può fluire solo da A verso K**
- **applicando tensione positiva su A scorre  $I$**



- **Area p**

- **lacune (maggioritarie), concentrazione  $\sim N_A$ ; elettroni (minoritari)  $\sim n_i^2/N_A$**
- **(livello di Fermi vicino all'estremo superiore della banda di valenza)**

- **Area n**

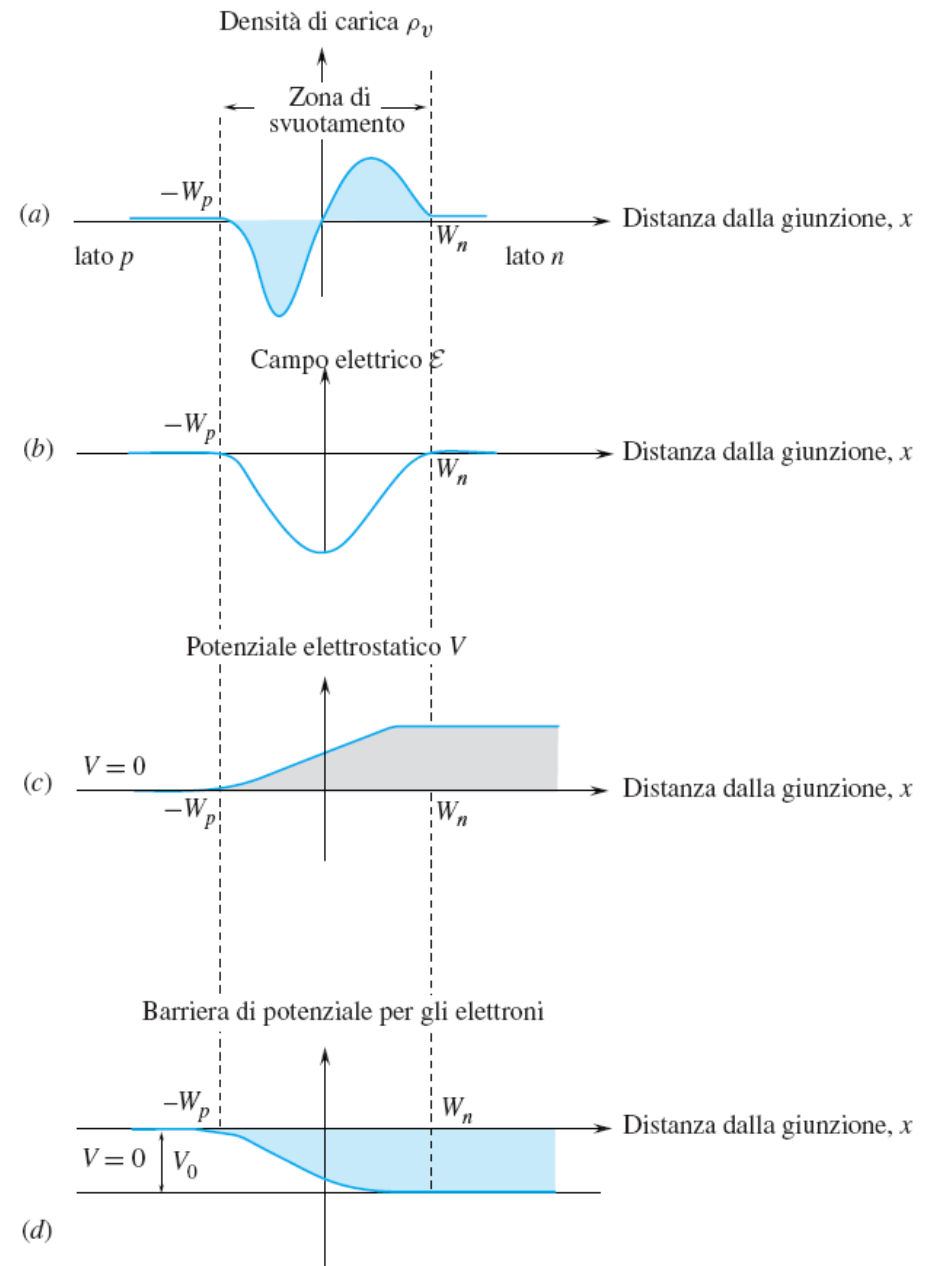
- **elettroni (maggioritari) concentrazione  $\sim N_D$ ; lacune (minoritarie):  $n_i^2/N_D$**
- **(livello di Fermi vicino all'estremo inferiore della banda di conduzione)**

- **Prima di avvicinare le due Aree tutto è neutro, ma poi nella zona di giunzione c'è diffusione che crea un'area di carica spaziale**

# Giunzione PN, area di carica spaziale

- L'area di carica spaziale crea una barriera di potenziale (tensione  $V_0$  di built-in) che si oppone al flusso di elettroni
- Se  $N_A \neq N_D$  allora le larghezze  $W_A = W_p$  e  $W_D = W_n$  di carica spaziale sono diverse  $N_A \cdot W_p = N_D \cdot W_n$  (+ largo dove - drogato)
- Serve un potenziale esterno per superare la barriera
- $V_0 = - \int \mathbf{E} dx = V_T \ln(N_A N_D / n_i)$  dove  $V_T = K \cdot T / q$  (K Boltzmann)  
 $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ,  $T = 297^\circ\text{K}$   
 $\rightarrow V_T \sim 25 \text{mV}$

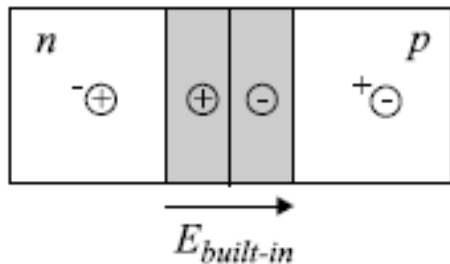
$$N_A N_D / n_i \sim 10^{12} \quad \rightarrow \quad V_0 \sim 0,7 \text{V}$$



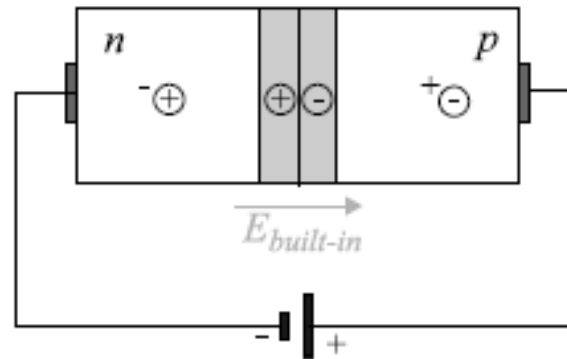
Nota: l'area di carica spaziale implica effetti capacitivi  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Diodo\\_a\\_giunzione](https://it.wikipedia.org/wiki/Diodo_a_giunzione)

# Giunzione PN, polarizzazione

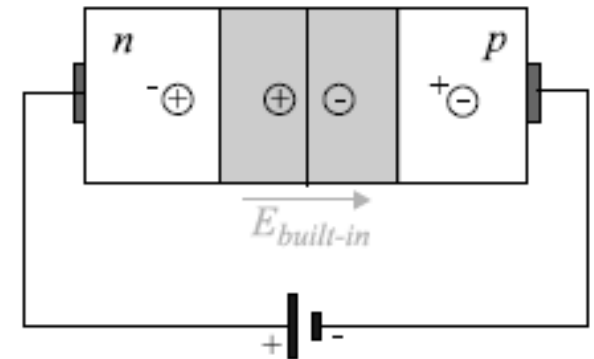
- **Polarizzazione diretta (Applico  $V+$  all'anodo –area p-)**
  - Caso ideale: quando elimino la barriera di potenziale interna, i portatori maggioritari generano una corrente che cresce linearmente con  $V+$
  - Caso reale: anche in presenza di una sottile barriera c'è corrente  $I$  ( $\sim$ mA)
- **Polarizzazione inversa (Applico  $V+$  al catodo –area n-)**
  - Aumenta la barriera che impedisce lo scorrimento dei portatori maggioritari
  - Scorre corrente inversa  $I_s$  ( $\sim$ nA) dovuta ai minoritari



Assenza di polarizzazione



Polarizzazione diretta



Polarizzazione inversa

# Diodo

$$I = I_0(e^{V/(n \cdot V_t)} - 1)$$

## • Il diodo in polarizzazione diretta è governato da una legge esponenziale

– Applico una tensione  $V$  -> scorre una corrente  $I$

–  $I = I_0(e^{V/(n \cdot V_t)} - 1)$

$V_t = KT/q = T/11600 \approx 25\text{mV}$  ( $T=293^\circ\text{K}$ )

$I_0 \sim \text{nA}$  (raddoppia per  $dT=10^\circ\text{C}$ )

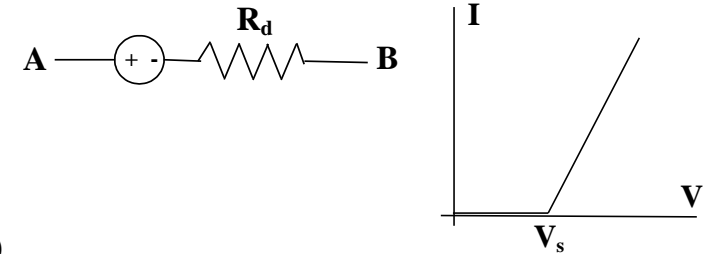
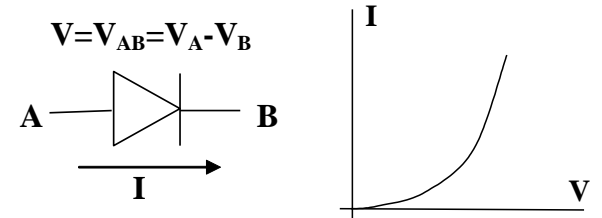
$n \sim 2$  per diodi al Si

– Simile ad un interruttore aperto se  $I \sim I_0 \sim \text{nA}$

– Simile ad un interruttore chiuso se  $I \sim \text{mA}$

–  $1\text{mA} = I_0(e^{V/(n \cdot V_t)} - 1) \rightarrow (1\text{mA} + 1\text{nA})/1\text{nA} \sim e^{V/(n \cdot V_t)}$

$\rightarrow V/50\text{mV} \sim \ln 10^6 \rightarrow V = V_s \sim 0.7\text{V}$



## • Modello semplificato del diodo

–  $I \sim 0$  per  $V < V_s \sim 0.7\text{V}$

–  $I = (V - V_s)/R_d$  per  $V > V_s$

$R_d = dV/dI \sim \text{da } 5 \text{ a } 10 \Omega$

## • Il diodo in polarizzazione diretta accumula delle cariche

– Il diodo ha un comportamento tipo "Condensatore" (distribuzione di cariche)

– Il diodo ha un tempo di "spegnimento" non nullo

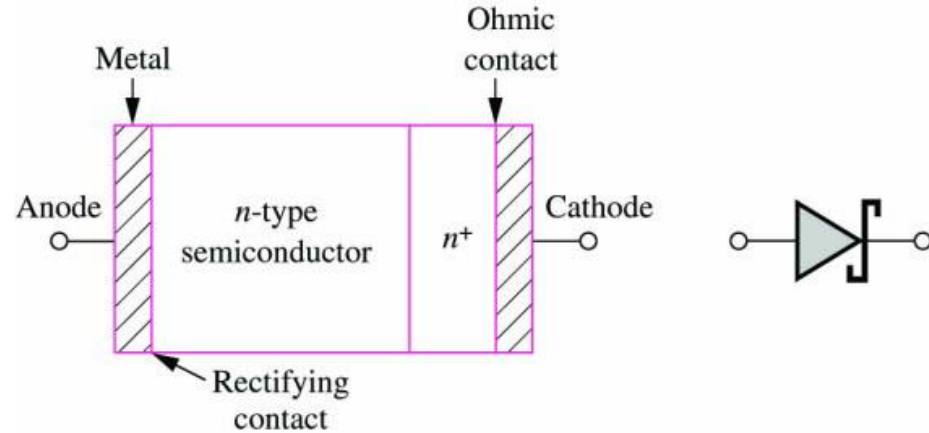


# Diodi Schottky, Zener, led

## • Diodi Schottky

L'area p è sostituita da metallo

- minore tensione di built-in (0,3V)
- migliore velocità

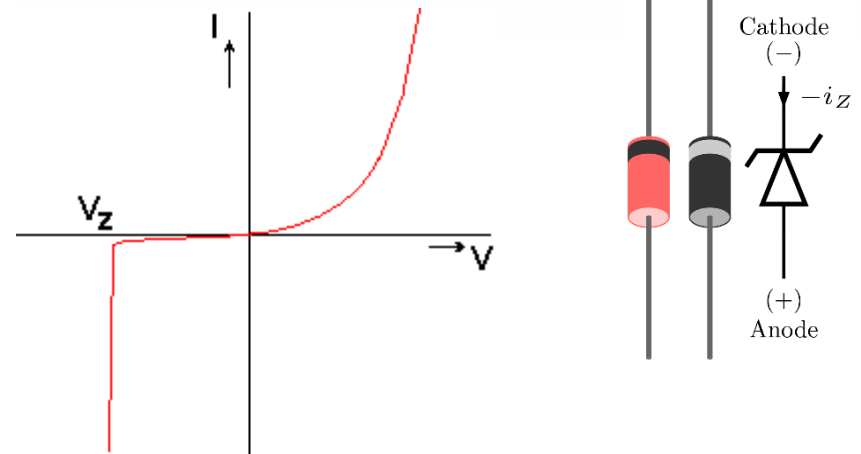


## • Diodi Zener

Conducono in polarizz. inversa

La tensione di Breakdown è nota

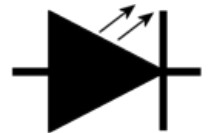
- $V_Z$  dipende da drogaggio e da  $T$
- utilizzato come riferimento



## • Diodi led

In polarizzazione diretta, emettono fotoni a seguito dell'energia rilasciata dalla ricombinazione di una coppia p-n

- Si accendono con circa 10mA (elevata efficienza)
- A seconda del colore, hanno una tensione diversa (tip. > 0,7V)



# Fotodiodo

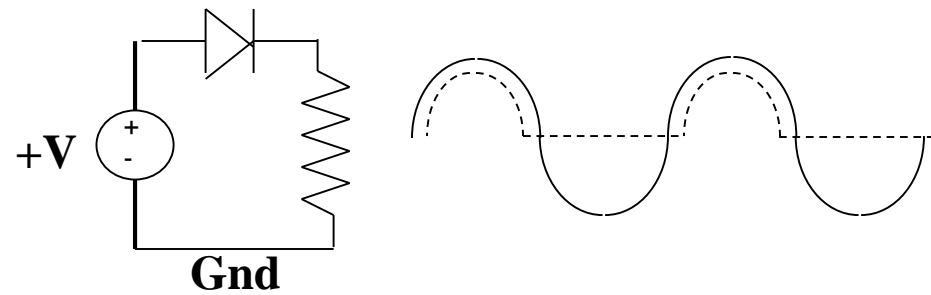
- E' un diodo dove gli elettroni ricevono energia, oltre che dalla tensione e dalla temperatura, anche dalla luce
- In polarizzazione diretta è un normale diodo
- In polarizzazione inversa (o non polarizzato), il fotone che incide sulla superficie può generare una coppia p-n con energia tale da superare la tensione di built-in (stesso principio delle celle fotovoltaiche)
- L'energia minima per la generazione della fotocorrente dipende dal materiale
- La coppia led-fotodiodo è alla base di:
  - Isolatori ottici (Es. 4n35, kit)
  - Comunicazioni ottiche (fibra ottica)



# Circuiti a diodi, esercizi

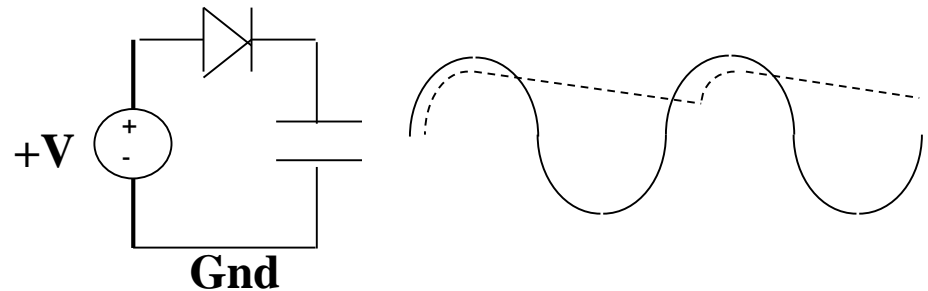
## • Raddrizzatore a semionda

- Carico resistivo  $R$ , generatore sinusoidale
- Quando la tensione del generatore è  $>0,7V$  polarizza direttamente il diodo che conduce corrente che attraversa  $R$ ; se è  $<0,7V$  il diodo non conduce e la tensione sulla resistenza è zero
- Passa la semionda positiva a meno di  $0,7V$ , comportamento quasi ideale



## • Circuito diodo-condensatore

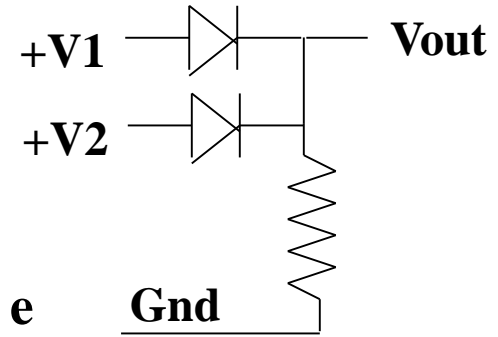
- Effetto memoria ( $C$  si scarica sulla corrente inversa del diodo)
- Resistenza diretta del diodo piccola ( $\sim 10\Omega$ ), per cui tutta la corrente carica velocemente  $C$ ; resistenza inversa del diodo grande ( $\sim 10^6\Omega$ ), per cui  $C$  si scarica lentamente



# Circuiti a diodi, esercizi

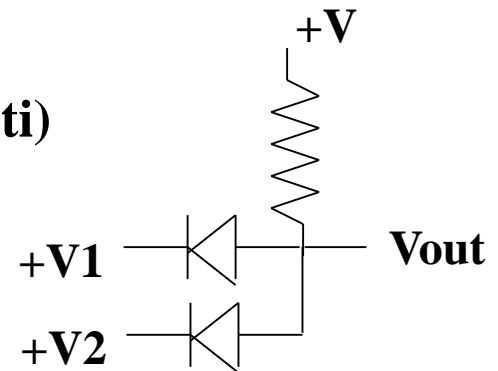
## • Circuito "vince il maggiore"

- Se  $V1$  e  $V2 < 0,7V$   $\rightarrow V_{out} = 0$  (entrambi i diodi spenti)
- Se  $V1 > 0,7V$  e  $V2 < 0,7V$  allora  $D2$  è spento e  $D1$  conduce e  $V_{out} = V1 - 0,7V$
- Se  $V2 > 0,7V$  e  $V1 < 0,7V$  allora  $D1$  è spento e  $D2$  conduce e  $V_{out} = V2 - 0,7V$
- Se  $V1 > 0,7V$  e  $V2 > 0,7V$  e  $V1 > V2$  allora  $V_{out} = V1 - 0,7V$  e  $V2 - V_{out} < 0,7V$  quindi  $D1$  conduce e  $D2$  è spento
- Complessivamente  $V_{out} = \max(V1; V2; 0,7V) - 0,7V$



## • Circuito "vince il minore"

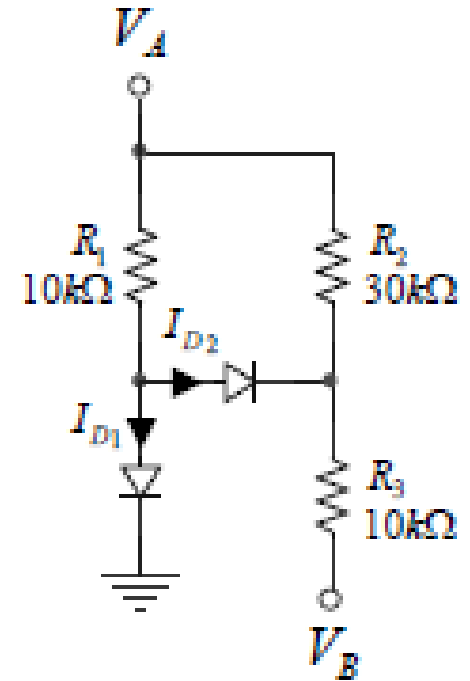
- Se  $V1, V2 > V - 0,7V$   $\rightarrow V_{out} = +V$  (entrambi i diodi spenti)
- Se  $V1 < V - 0,7V$  e  $V2 > V - 0,7V$  allora  $D2$  è spento e  $D1$  conduce e  $V_{out} = V1 + 0,7V$  (simmetria tra  $V1$  e  $V2$ )
- Se  $V1, V2 < V - 0,7V$  e  $V1 < V2$  allora  $V_{out} = V1 + 0,7V$  e  $V_{out} - V2 < 0,7V$  quindi  $D1$  conduce e  $D2$  è spento
- Complessivamente  $V_{out} = \min(V1; V2; V - 0,7) + 0,7V$



# Circuiti a diodi, esercizi

- $V_A=15V$ ,  $V_B=-10V$ , trovare le correnti nei diodi
- Si fa un'ipotesi, si risolve il circuito, si controlla l'ipotesi
- **Ipotesi: diodi in conduzione (punto comune anodi = 0,7V)**

- Trovo  $I_{R1} = (15-0,7)/10k = 1,4$  mA
- La tensione al catodo di D2 è zero quindi
- trovo  $I_{R2} = (15)/30k = 0,5$  mA
- trovo  $I_{R3} = (10)/10k = 1$  mA
- $I_{D2} = I_{R3} - I_{R2} = 0,5$  mA ipotesi OK
- $I_{D1} = I_{R1} - I_{D2} = 0,93$  mA ipotesi OK



- **Ipotesi: D1 interdetto (punto comune degli anodi < 0,7V)**
  - Il Diodo D1 è come se non ci fosse,  $I_{D1} = 0$ , def  $V_X = V(\text{catodo D2})$
  - Si ha  $I_{R2} = (15 - V_X)/30k$ ,  $I_{R3} = (V_X + 10)/10k$ ,  $I_{D2} = I_{R1} = (15 - 0,7 - V_X)/10k$
  - Sostituendo in  $I_{D2} = I_{R3} - I_{R2}$  si trova  $V_X = 4V$ , quindi il punto in comune degli anodi è  $4,7V > 0,7V$  (in contrasto con l'ipotesi!)

# Approfondimenti sulla giunzione p-n

- **Per una migliore analisi della giunzione pn, si consiglia di analizzare la struttura elettronica a bande e, più in generale, avere i rudimenti della fisica dello stato solido e della fisica dei semiconduttori**
  - <https://it.wikipedia.org/wiki/Semiconduttore>
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Struttura\\_elettronica\\_a\\_bande](https://it.wikipedia.org/wiki/Struttura_elettronica_a_bande)
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Fisica\\_dello\\_stato\\_solido](https://it.wikipedia.org/wiki/Fisica_dello_stato_solido) (utile i riferimenti in Bibliografia)
  - <https://it.wikipedia.org/wiki/Portale:Fisica> (vedi Meccanica Quantistica)
- **La giunzione pn viene affrontata in molte dispense universitarie anche facilmente disponibili in rete**
  - <https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/pnmodulo1.pdf>
  - <https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/Lezione8pn1.pdf>
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Giunzione\\_p-n](https://it.wikipedia.org/wiki/Giunzione_p-n)
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Regione\\_di\\_carica\\_spaziale](https://it.wikipedia.org/wiki/Regione_di_carica_spaziale)