

# MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

*AA 2021/22 – Lezione 13 28/04/2022*

# Argomenti della lezione di oggi

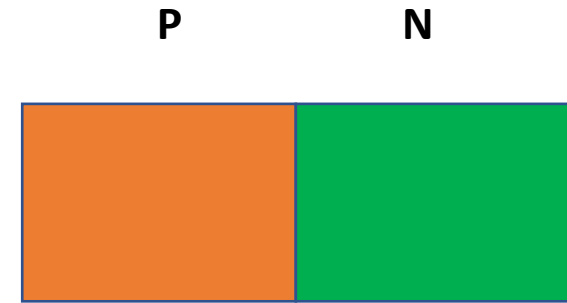
- La giunzione p-n
  - Il diodo a giunzione p-n
  - Il diodo come componente non lineare dei circuiti elettrici
- Diodi a giunzione in polarizzazione inversa
  - Il diodo Zener

# La giunzione p-n

Finora abbiamo esaminato semiconduttori omogenei (sia intrinseci che drogati) che seguono essenzialmente la legge di Ohm, sia pure con caratteristiche di conduzione molto diverse a seconda del tipo di semiconduttore considerato.

Le cose cambiano notevolmente se il semiconduttore viene drogato in maniera tale che una sua parte sia di tipo p ed un'altra, a diretto contatto con la precedente, sia di tipo n.

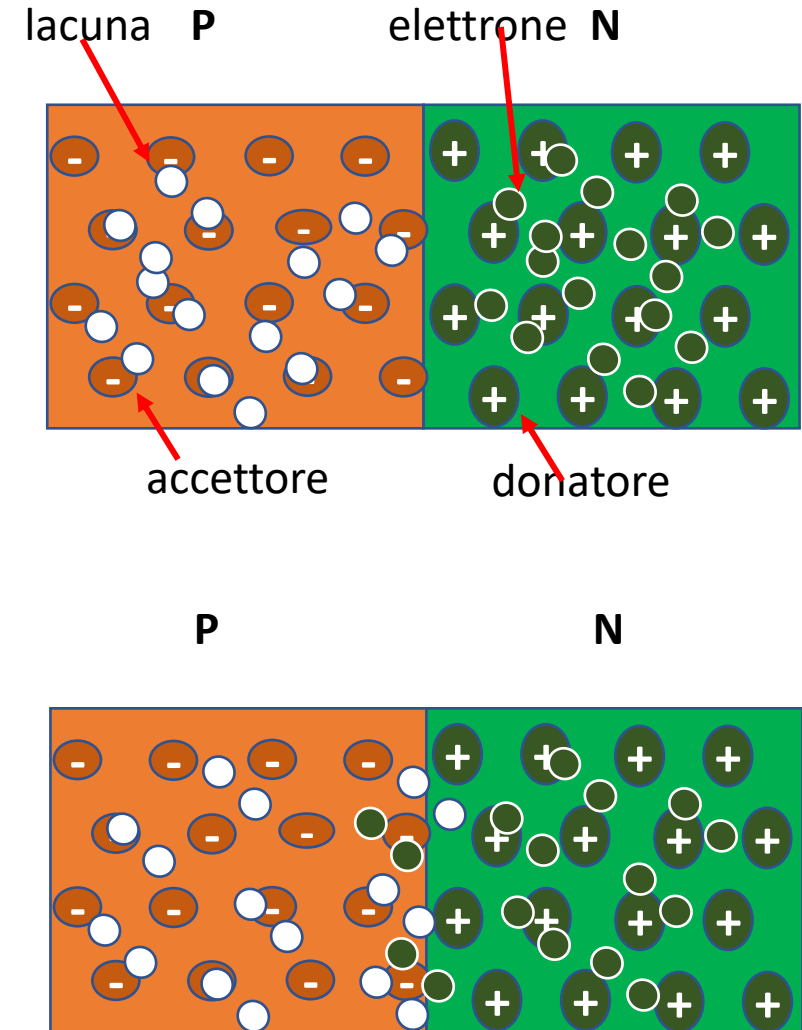
**Il confine tra i due tipi di drogaggio viene chiamato giunzione.**



Nelle due regioni i portatori di maggioranza sono rispettivamente le lacune nella zona P e gli elettroni nella zona N.

Per assicurare la neutralità elettrica del tutto, ricordiamo che nella zona P ci sono gli ioni del drogante (accettore) carichi negativamente e nella zona N ci sono gli ioni dei donatori, carichi positivamente.

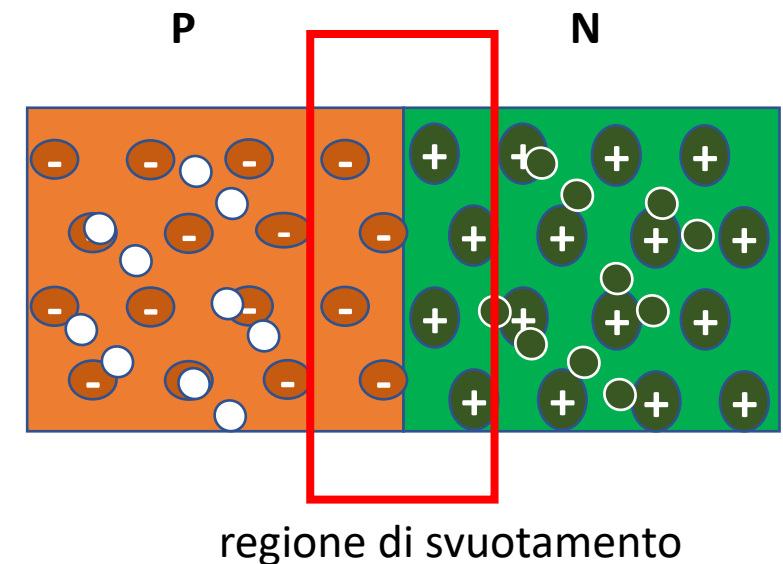
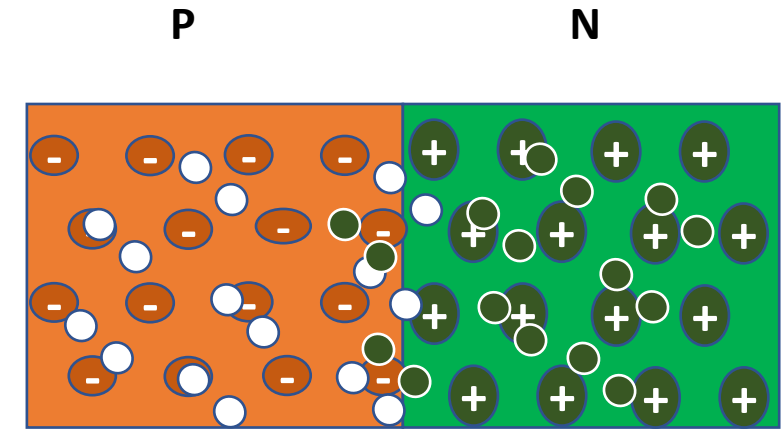
I portatori di carica però non rimangono fermi: tendono a muoversi casualmente per effetto dell'agitazione termica. Questo fenomeno viene chiamato **diffusione**.



Per effetto della diffusione, parte degli elettroni della zona N passa alla zona P e viceversa per le lacune della zona P. Questo movimento di cariche genera una **corrente**, chiamata **di diffusione**.

Nella zona della giunzione, in cui sono presenti contemporaneamente sia elettroni che lacune, si avrà il fenomeno della **ricombinazione**: gli elettroni di conduzione passano ad occupare i livelli liberi in banda di valenza, corrispondenti alle lacune ivi presenti.

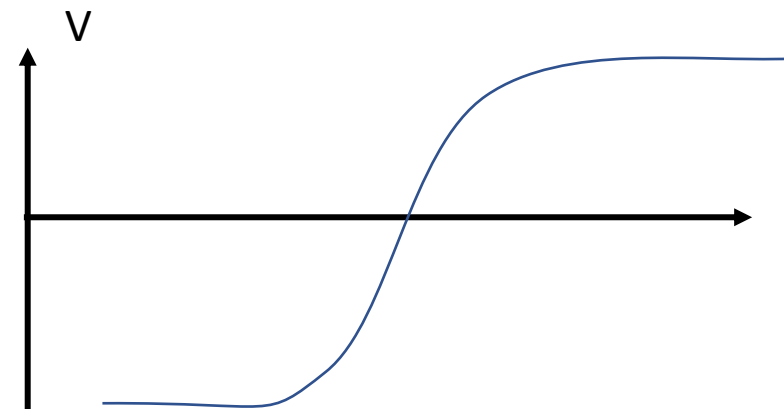
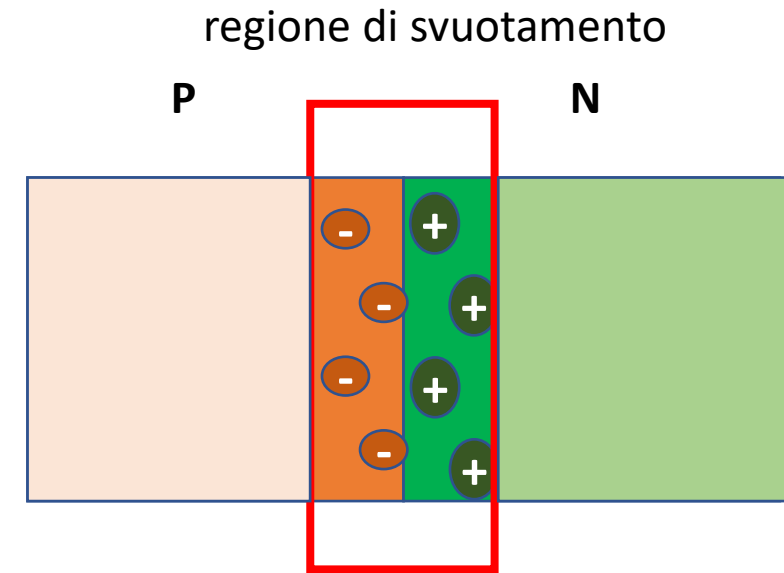
Si viene così a creare una **regione** (chiamata **di svuotamento** o di carica spaziale) nella quale ai due lati della giunzione non vi sono portatori di carica, ma solo le cariche degli atomi di drogante.



Al di fuori della regione di svuotamento, le cariche dei portatori di maggioranza e quelle degli ioni del drogante si equivalgono, rendendo il materiale essenzialmente neutro (zone più chiare in figura).

La regione centrale invece si comporta come un condensatore, con un'armatura carica positivamente sul lato N della giunzione ed una carica negativamente sul lato P.

Ne risulta che lungo l'asse del dispositivo c'è una differenza di potenziale quando si attraversa la giunzione. Questa d.d.p. costituisce una **barriera (di potenziale)** per il moto dei portatori di carica.

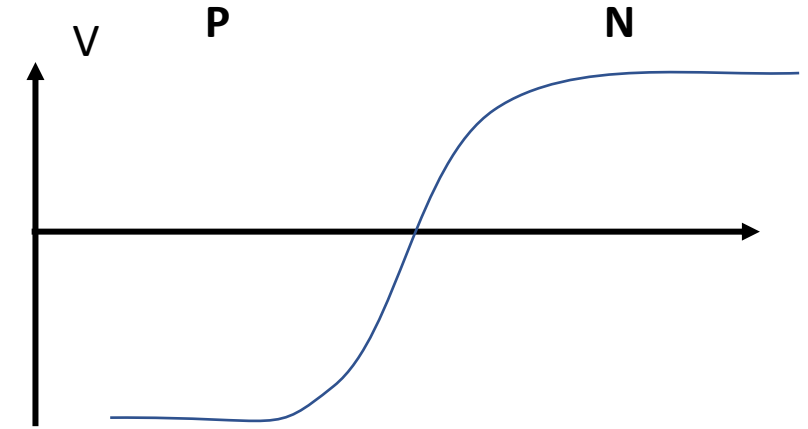


La quasi totalità delle lacune sul lato P, quando diffondono verso la zona N, vengono rispedite all'indietro dalla d.d.p. positiva che incontrano e viceversa per gli elettroni della zona N.

Questo moto dei portatori dovuta alla presenza della d.d.p. alla giunzione contribuisce a quella che viene chiamata **corrente di drift**.

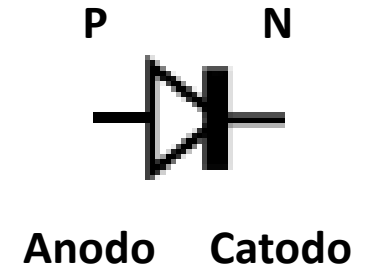
In condizioni stazionarie, le due correnti (di diffusione e di drift) sono dirette in versi opposti: quella di diffusione dalla zona P alla zona N e quella di drift dalla zona N alla zona P, compensandosi tra di loro.

Nel dispositivo quindi complessivamente non circola corrente.



# Il diodo a giunzione p-n

Un dispositivo a semiconduttore con una giunzione P-N viene chiamato diodo, con un simbolo circuitale come in figura.



Il diodo è un componente di tipo asimmetrico: a differenza di un normale resistore, la risposta in corrente è molto diversa a seconda del segno della d.d.p. applicata: più esattamente c'è un verso preferenziale nel flusso di corrente.

Questa asimmetria nel simbolo è rappresentata da una freccia orientata come il verso preferenziale della corrente, dalla zona P alla zona N.

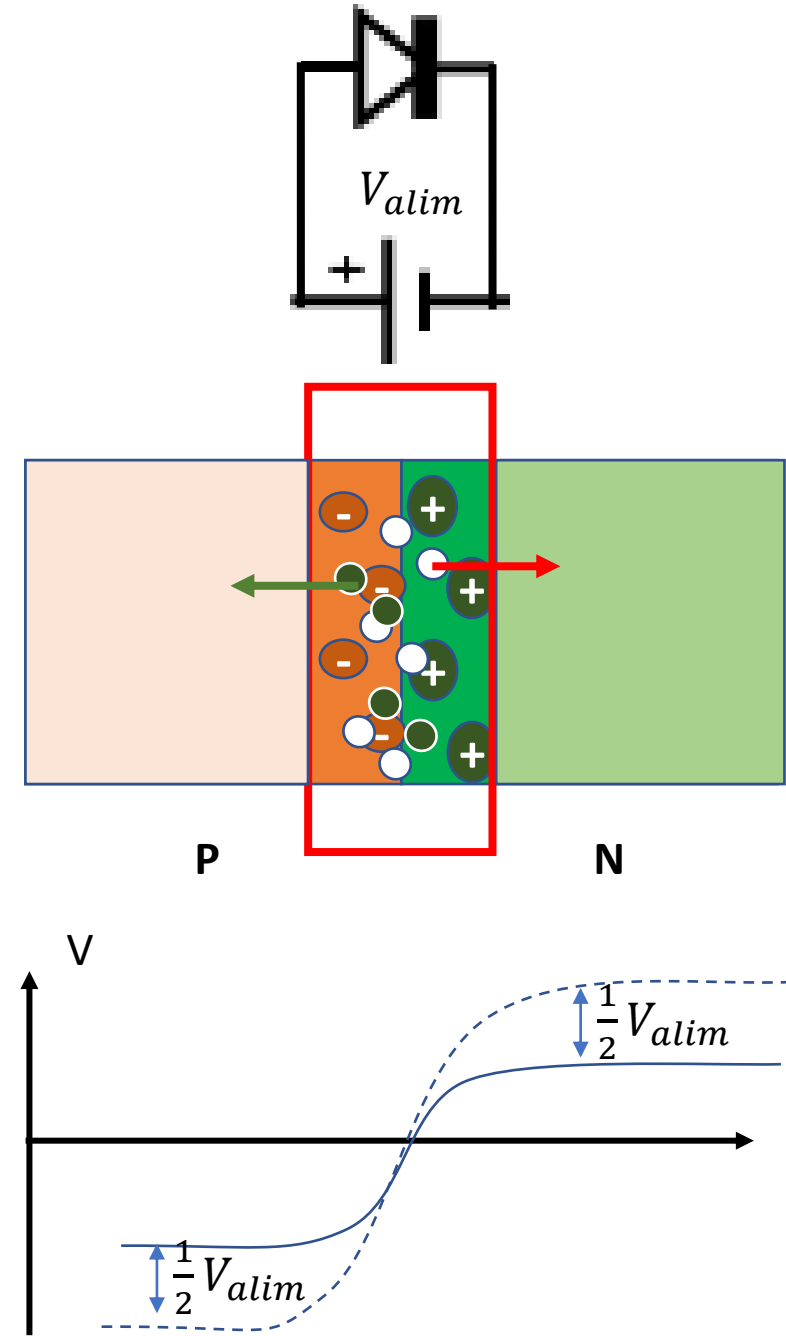
(per completezza di informazione, i due terminali vengono chiamati anodo e catodo)



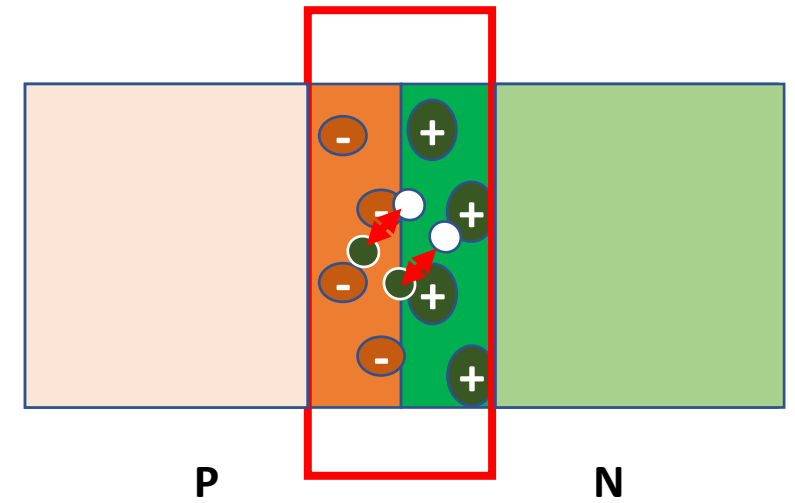
Per vedere questa asimmetria, alimentiamo il diodo nel modo mostrato in figura (detto di **polarizzazione diretta**).

Collegando il polo positivo dell'alimentatore ( $+V_{alim}$ ) al terminale P del diodo, la barriera di potenziale che si incontra viene ridotta.

In questo modo le correnti di diffusione e di drift non si equilibrano più (quella di diffusione prevale) e la corrente complessiva fluisce dalla zona P alla zona N.



L'entità di questa corrente dipende in maniera esponenziale dalla tensione applicata  $V_{alim}$  dall'alimentatore.



Ciò dipende dal fatto che nella zona di svuotamento agli elettroni della banda di valenza viene fornito un «aiuto» in termini di energia dell'ordine di  $e V_{alim}$ . Questo si traduce in un aumento di un fattore  $\exp(\frac{eV_{alim}}{kt})$  del numero di coppie elettrone-lacuna disponibili per la conduzione.

Un modello semplificato mostra come la caratteristica corrente/tensione per un diodo ideale dovrebbe avere la forma

$$I(V_{alim}) = I_s \left( \exp \left( \frac{eV_{alim}}{kt} \right) - 1 \right)$$

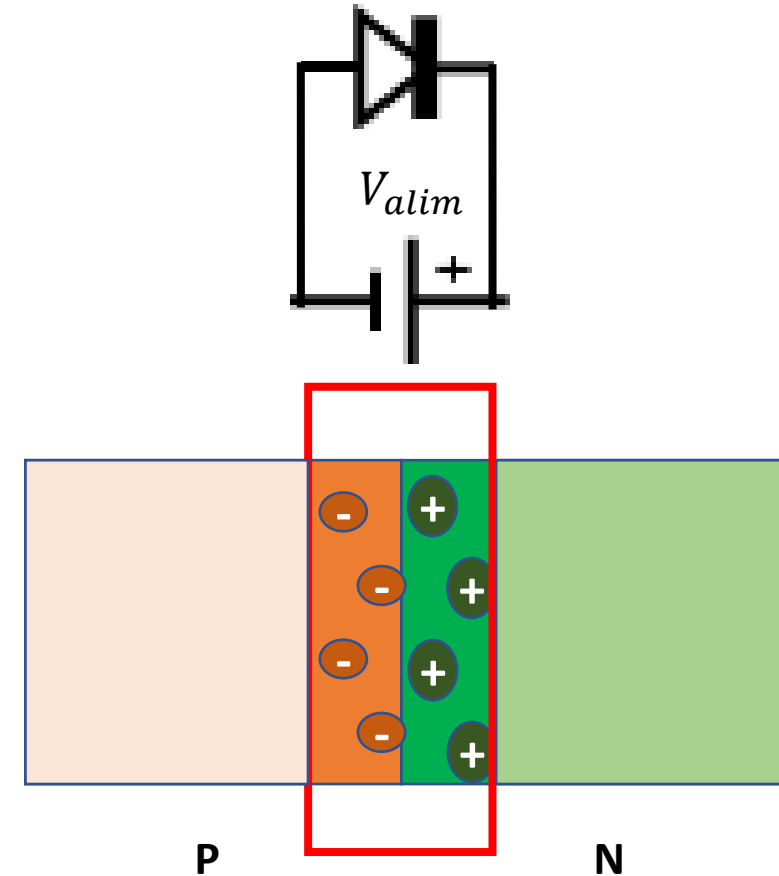
ove  $I_s$  è un parametro chiamato **corrente di saturazione**.

$$I(V_{alim}) = I_s \left( \exp \left( \frac{eV_{alim}}{kt} \right) - 1 \right)$$

Questa relazione prevede che anche invertendo l'alimentatore (**polarizzazione inversa del diodo**) si dovrebbe avere una corrente circolante (dal terminale di tipo N verso quello P).

Poiché in questo caso la  $V_{alim}$  è negativa, il termine esponenziale risulta molto piccolo, al limite trascurabile rispetto al termine costante.

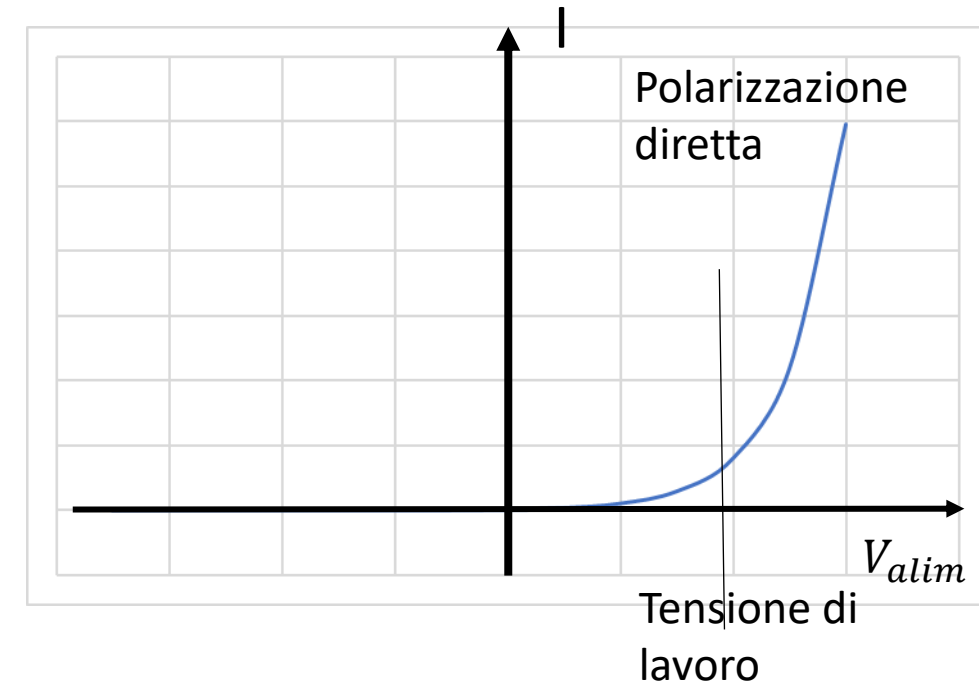
La corrente quindi satura rapidamente al valore di  $I_s$  (è per questa ragione che tale parametro viene chiamato corrente di saturazione).



In figura viene mostrato l'andamento della curva  $I(V_{alim})$  secondo questo modello.

Con l'alimentazione in polarizzazione diretta, la corrente risulta trascurabile fino a che non si raggiunge un valore **tensione** chiamata **di lavoro**. Tale valore di soglia dipende dal tipo di materiale semiconduttore e dalle dimensioni del diodo: per i diodi commerciali in silicio è tipicamente di 0.6 – 0.7 V.

Al di sopra della tensione di lavoro, il diodo può condurre correnti notevoli (dell'ordine di frazioni di Ampere o più).



In polarizzazione inversa, la corrente circolante è estremamente ridotta, ed arriva ad assumere un valore circa costante e pari alla corrente di saturazione  $-I_s$  per grandi valori di  $|V_{alim}|$ .

Il valore di  $I_s$  dipende molto dai dettagli costruttivi del diodo: valori tipici sono dell'ordine dei nA ( $10^{-9}$  A, nanoAmpere) o inferiori.

$I_s$  inoltre dipende in maniera significativa dalla temperatura, caratteristica che viene sfruttata in alcuni tipi di sensori basati su questo fenomeno.



Continuiamo la visione dei filmati,  
per la parte riguardante i diodi

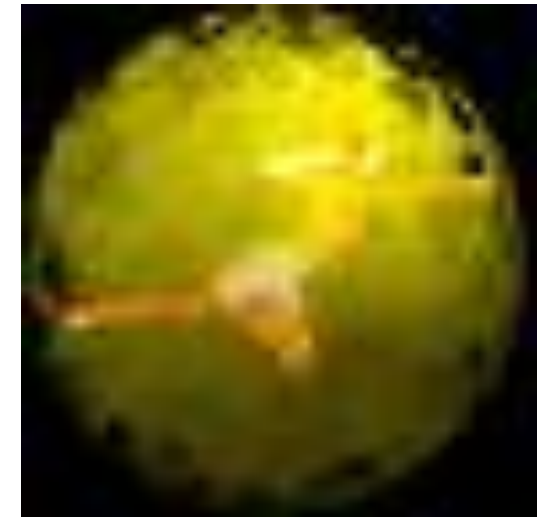
The PN Junction. How Diodes Work?

<https://youtu.be/JBtEckh3L9Q?t=207>



Semiconductors - Physics inside Transistors and  
Diodes

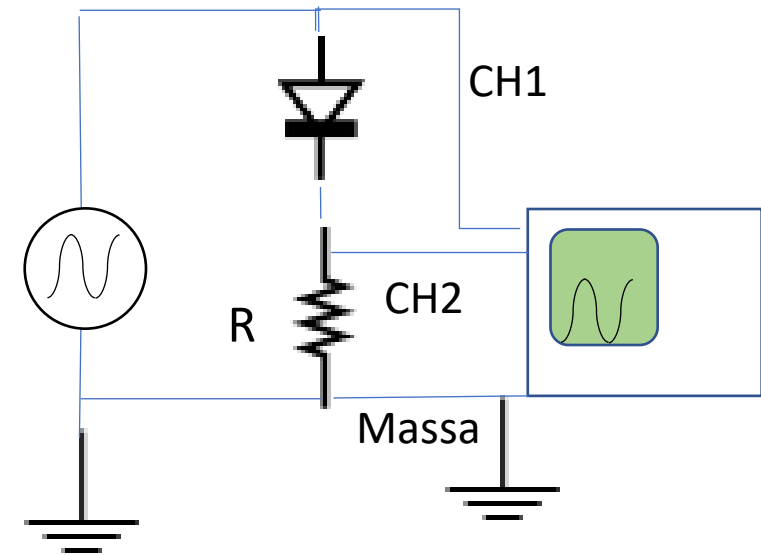
<https://youtu.be/hrpPKCDLRN0?t=387>



# Il diodo come componente non lineare dei circuiti elettrici

La caratteristica corrente-tensione del diodo lo rende un dispositivo ideale per realizzare circuiti elettrici non lineari, nei quali la corrente circolante non risulti proporzionale alla tensione applicata.

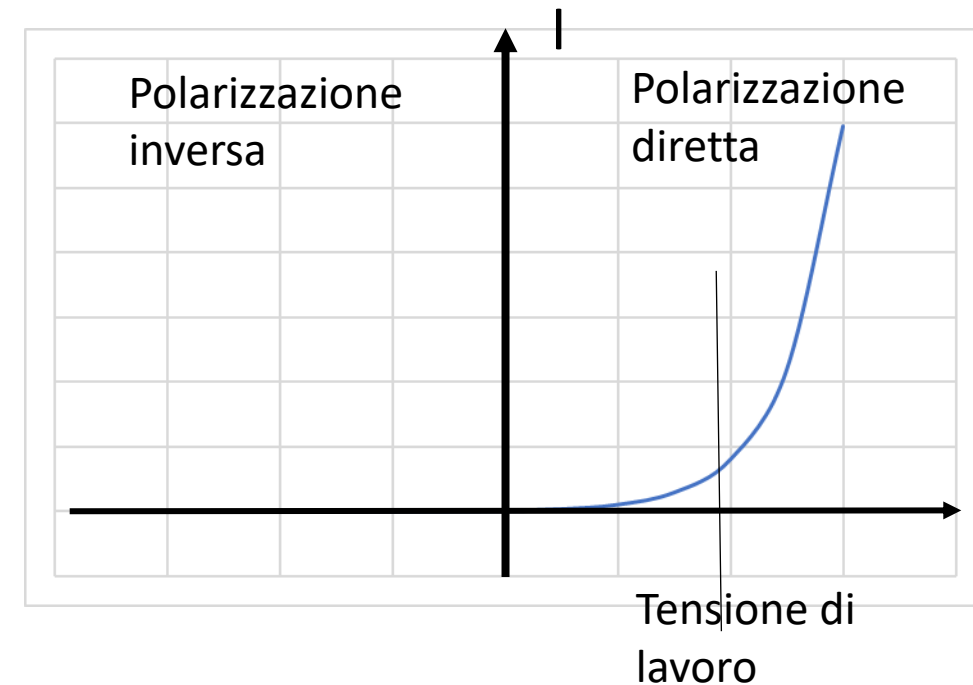
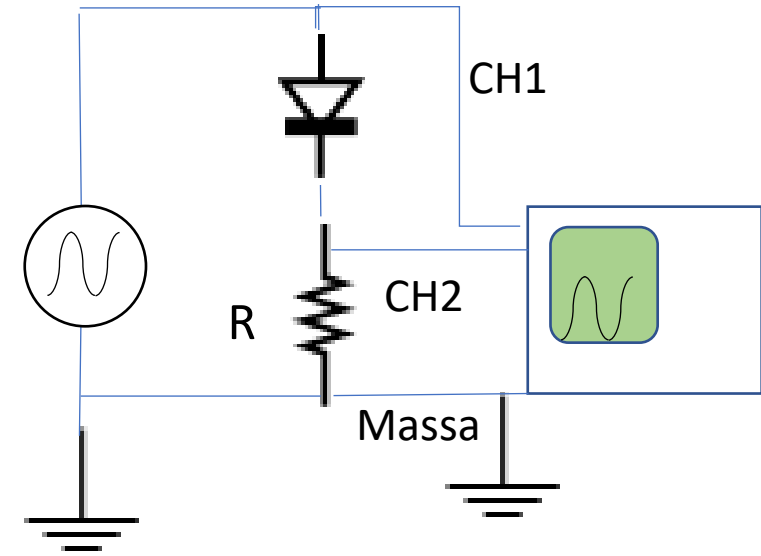
Consideriamo l'esempio del circuito in figura, che realizza quello che viene chiamato rettificatore di corrente.



Il segnale in tensione erogato dal generatore è alternativamente positivo e negativo.

In un circuito lineare questo implicherebbe che la corrente circolante sarebbe alternativamente positiva e negativa.

Data però la caratteristica del diodo, la corrente che esso permette di far circolare quando è polarizzato in maniera inversa è assolutamente trascurabile.





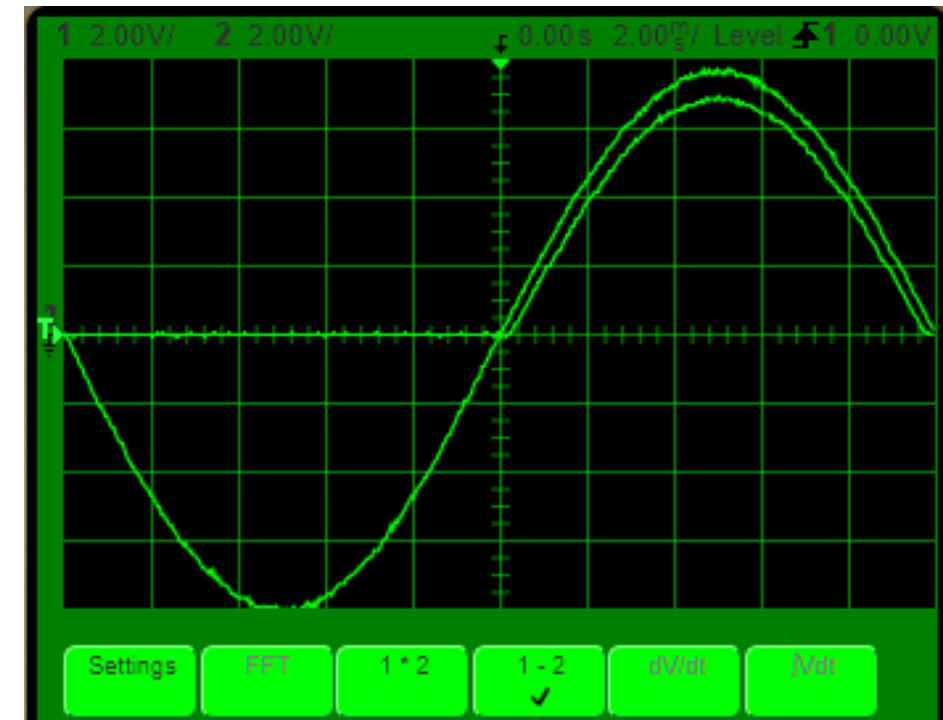
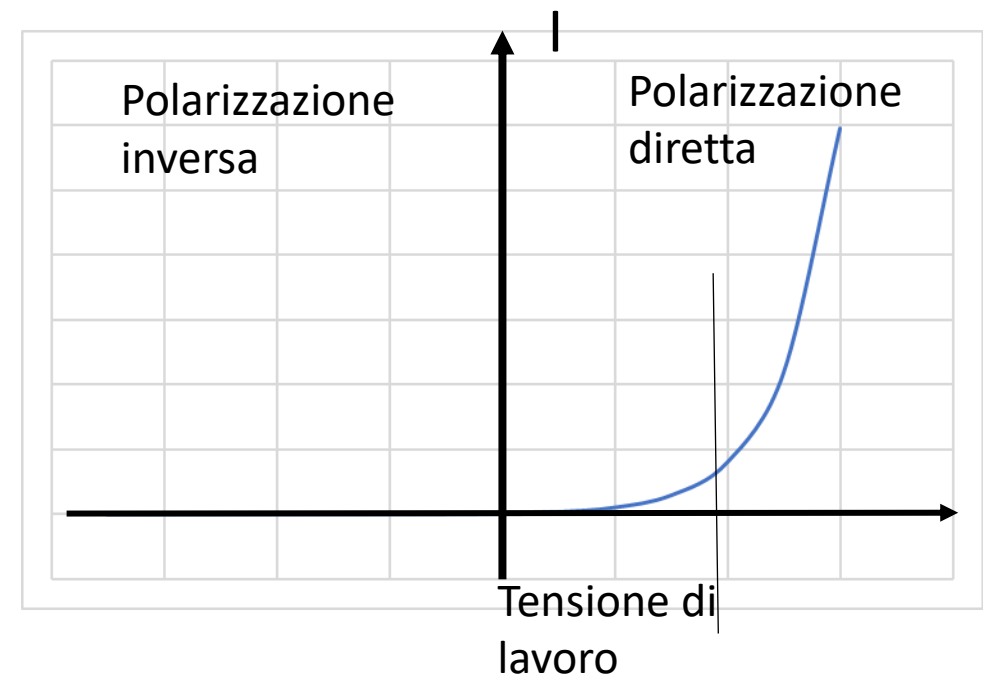
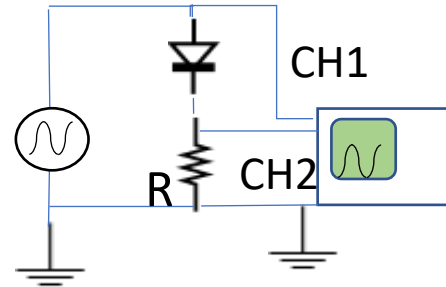
Quando invece il diodo è in polarizzazione diretta (almeno per tensioni superiori a quella di lavoro) esso permette la conduzione di correnti anche elevate.

Sullo schermo dell'oscilloscopio vediamo i segnali dei due canali.

CH1 mostra il segnale erogato dal generatore, una sinusoide.

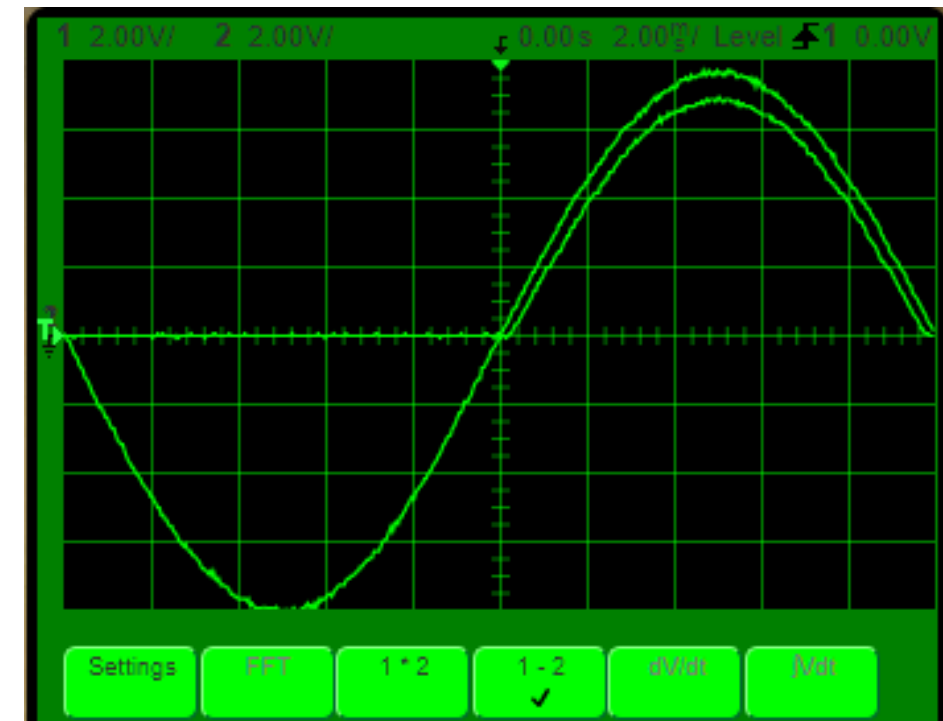
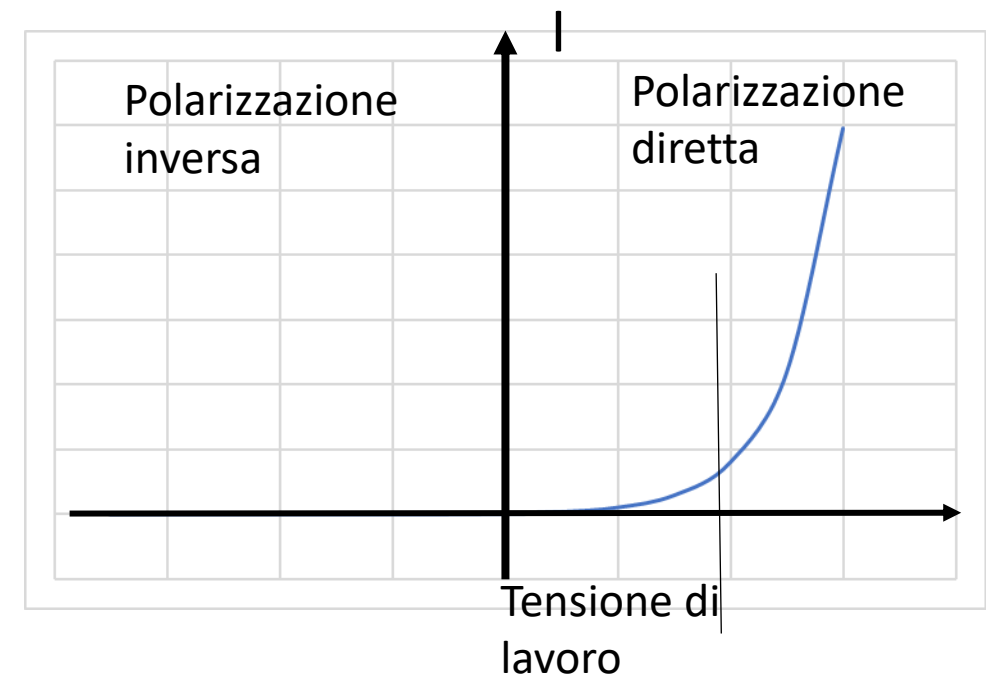
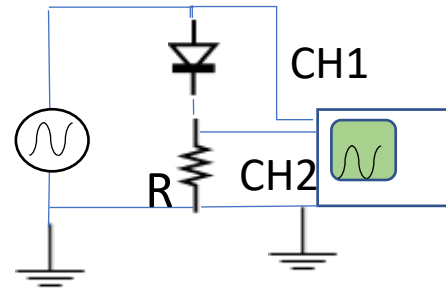
CH2 invece mostra il segnale ai capi del resistore. Tale segnale rappresenta essenzialmente l'andamento della corrente circolante in R, poiché è proporzionale ad essa.

Si vede come per segnali CH1 negativi, la corrente è nulla, mentre per segnali positivi diventa diversa da zero.



Il piccolo ritardo sull'inizio del segnale del resistore è dovuto al valore della tensione di lavoro.

Notate inoltre come la tensione sul resistore nella fase in polarizzazione diretta del diodo sia molto prossima a quella erogata dal generatore: ciò significa che la tensione sul diodo in tale regime sia molto inferiore

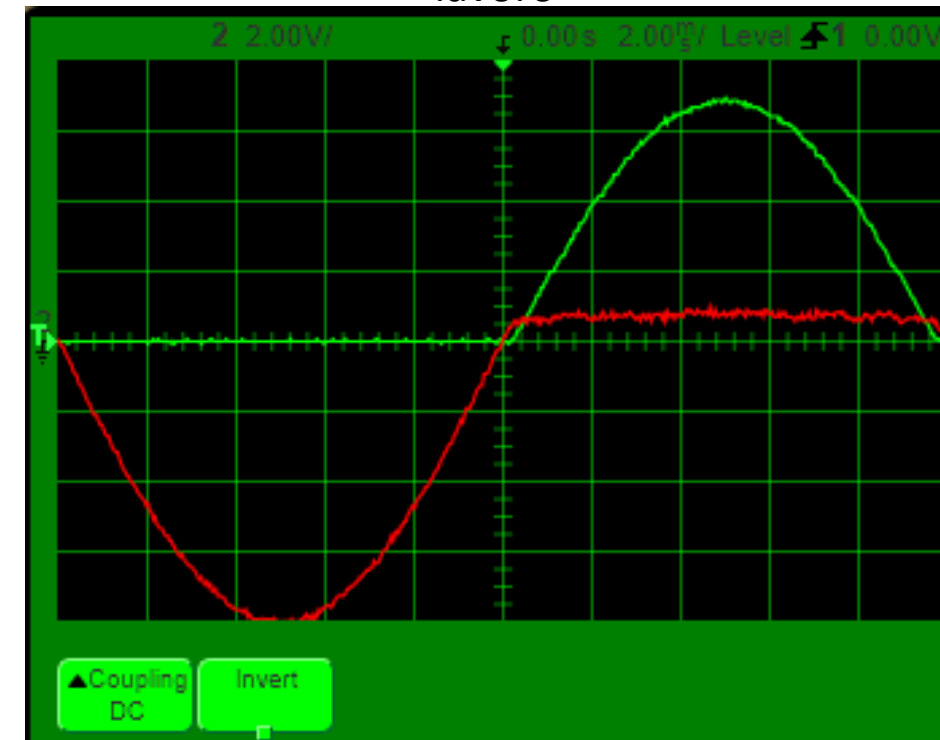
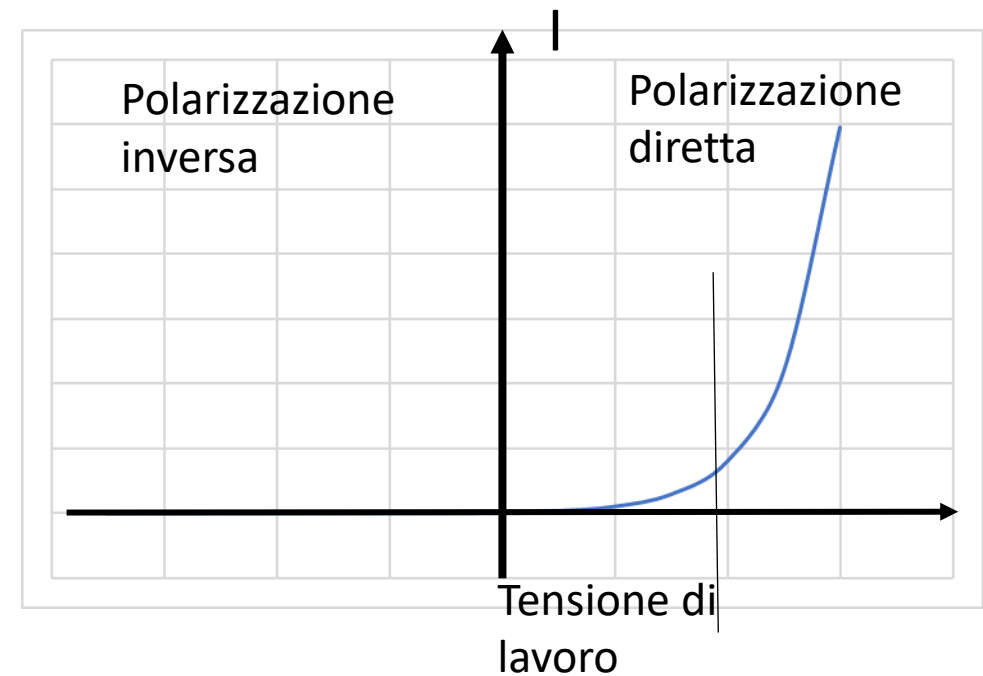
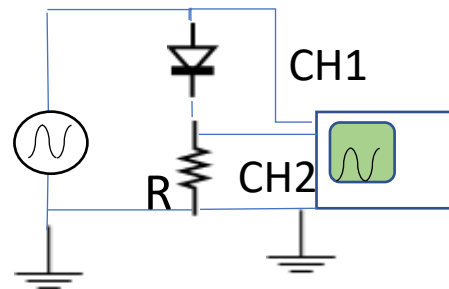


Tutto ciò essere visto meglio mostrando, assieme alla tensione sul resistore, quella sul diodo (CH1-CH2, curva rossa).

Nella fase negativa, la tensione sul diodo segue l'andamento di quella erogata dal generatore.

Nella parte positiva, per valori superiori ad una divisione (0.5 V) la tensione sul diodo cambia molto poco al variare della corrente circolante.

È come se il diodo avesse una resistenza enorme (in effetti risulta dell'ordine delle centinaia di  $M\Omega$ ) in polarizzazione inversa, mentre in polarizzazione diretta crolla a valore molto bassi (dell'ordine degli  $\Omega$ ).

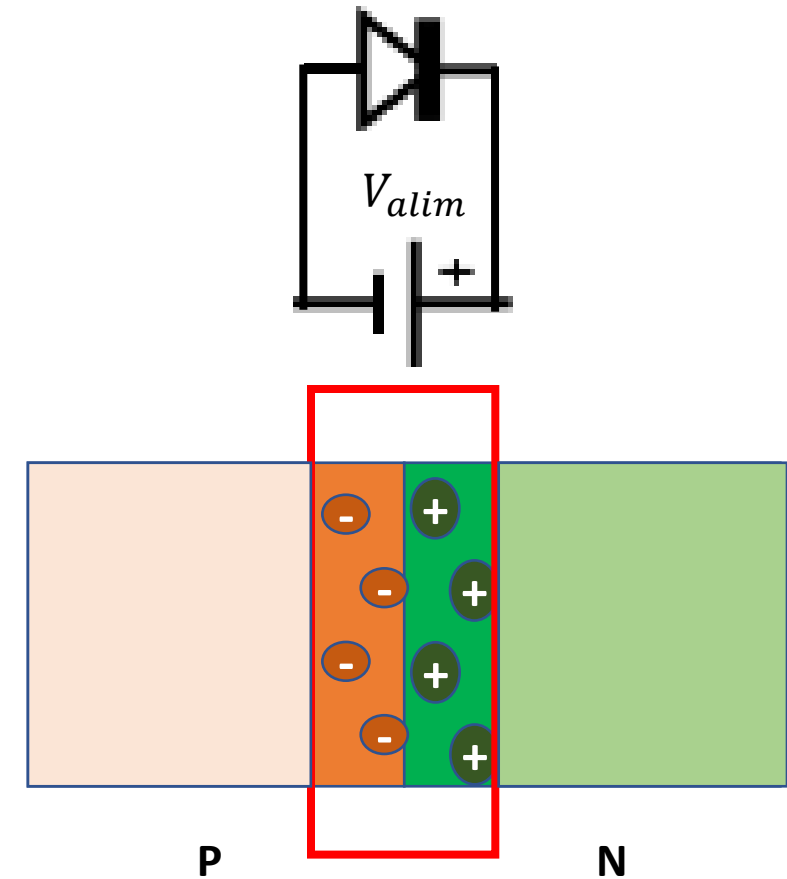


# Diodi a giunzione in polarizzazione inversa

Da quanto abbiamo visto dal comportamento del diodo nel rettificatore di corrente, sembrerebbe che il suo comportamento, a parte l'impedire il flusso di corrente, sia poco importante.

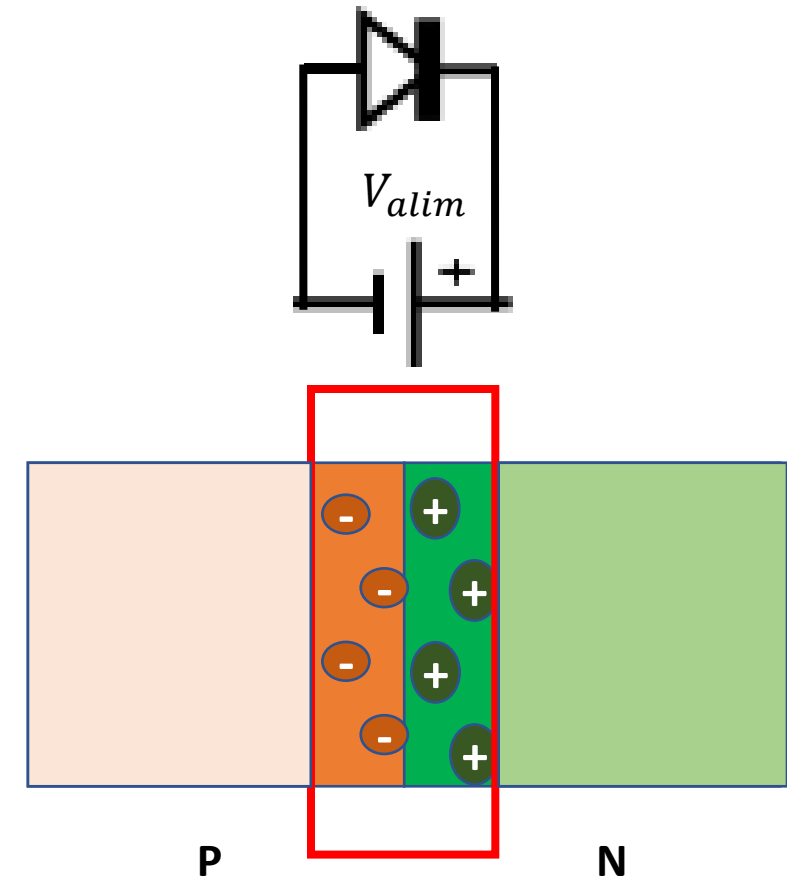
In realtà, come avevamo visto discutendo della curva caratteristica  $I(V)$ , vi è corrente circolante anche in polarizzazione inversa, solo che risulta di norma trascurabile rispetto a quella che si ha in polarizzazione diretta.

Ciò è dovuto al fatto che in polarizzazione inversa, il numero di portatori di carica nella zona di svuotamento del diodo risulta di numerosi ordini di grandezza inferiore a quello in polarizzazione diretta.



Una piccola densità di portatori di carica nella zona di svuotamento significa (dal punto di vista della conduzione elettrica) una discontinuità tra i due estremi del dispositivo, che invece contengono un gran numero di portatori di carica di maggioranza (lacune o elettroni di conduzione).

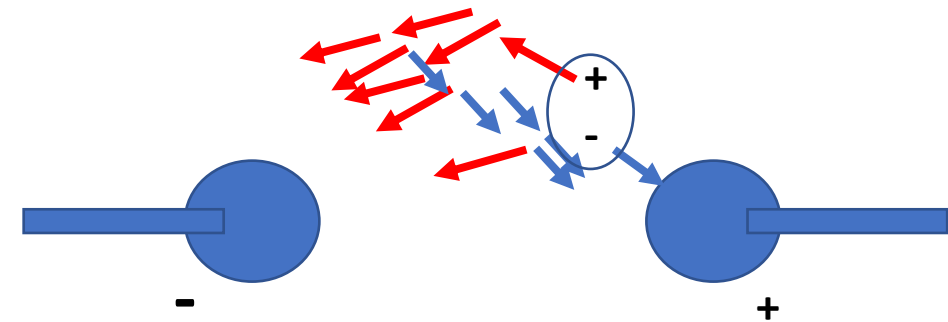
Ne segue che **qualsiasi fenomeno che contribuisca ad aumentare la densità dei portatori nella zona di svuotamento, renderebbe di nuovo possibile la conduzione elettrica nel diodo.**



Nella lezione 3 abbiamo visto come anche in materiale isolante, se viene applicata una differenza di potenziale sufficientemente intensa da superare la rigidità dielettrica del materiale, si può innescare un processo di moltiplicazione dei portatori di carica (i portatori assumono sufficiente energia muovendosi lungo la ddp da produrre ionizzazione negli urti con le molecole del mezzo)

Questo fenomeno procede fino a che il numero di portatori sia sufficiente a condurre una corrente significativa.

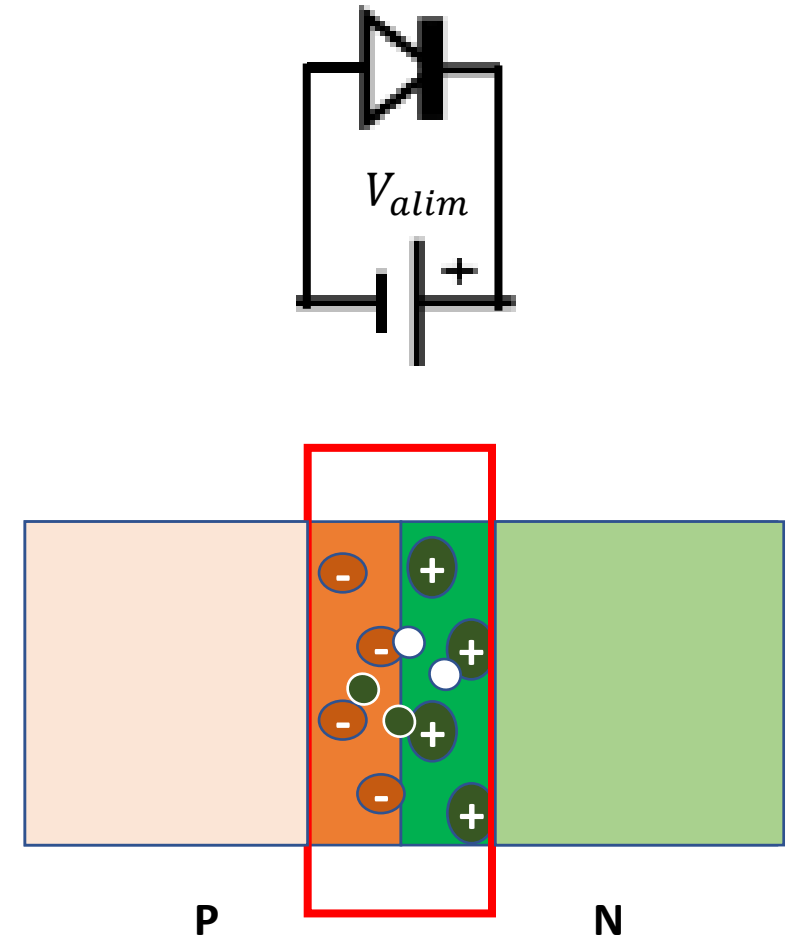
Abbiamo visto come in aria questo fenomeno porta al fenomeno dell'arco voltaico



Questo può succedere anche in un diodo in polarizzazione inversa.

Nella regione di svuotamento sono presenti comunque portatori di carica, generati dalla creazione di coppie lacuna elettrone per eccitazione termica, anche se tali coppie sono rare, dovute al valore di gap in energia tra la banda di conduzione e quella di valenza.

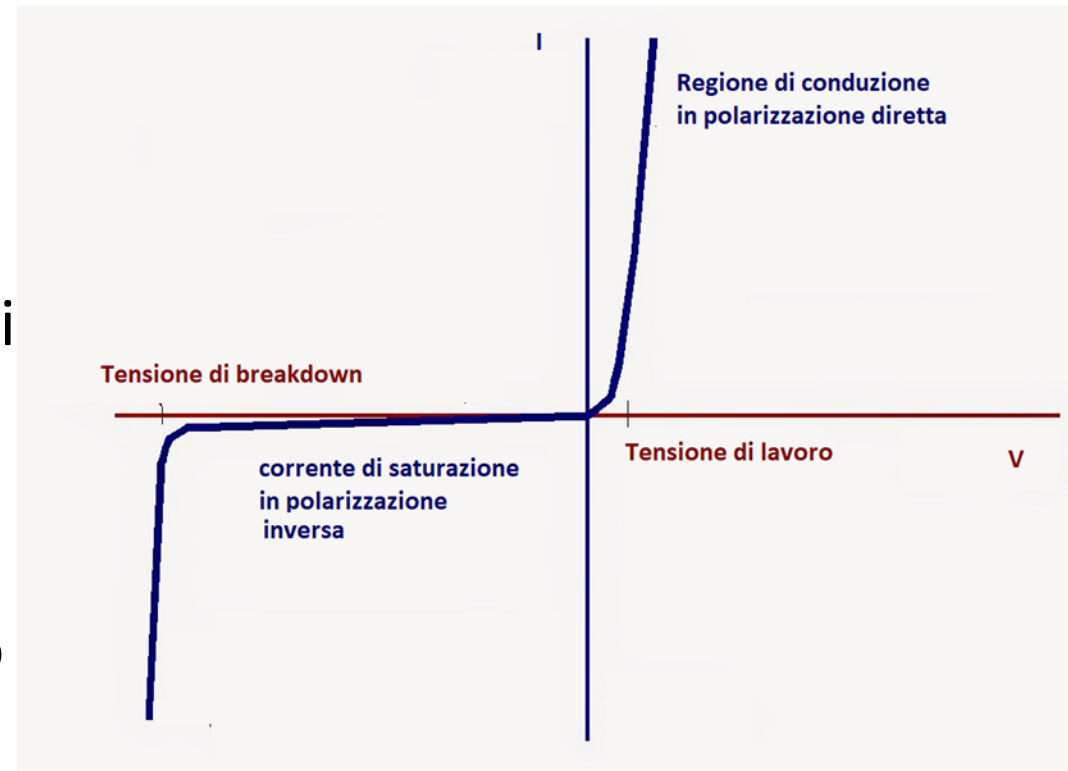
Concentriamoci sugli elettroni di conduzione. Durante il loro moto, assorbono energia per effetto della tensione applicata ed in media la perdono «urtando» con gli ioni posti ai nodi del reticolo cristallino.



Se la tensione di polarizzazione inversa è sufficientemente elevata, l'energia che l'elettrone perde in un urto e cede allo ione risulta sufficiente a far passare un elettrone di valenza dello ione alla banda di conduzione, creando una coppia lacuna elettrone.

Il processo si può ripetere successivamente, creando un aumento significativo del numero di portatori di carica disponibili

Questo fenomeno viene chiamato **effetto valanga**. La tensione a cui si innesca viene chiamata **tensione di breakdown**: la corrente, per tensioni oltre quella di breakdown, aumenta enormemente, fino ad eventualmente determinare la **distruzione del dispositivo** (per effetto dell'energia rilasciata in esso).





# Il diodo Zener

Se il diodo è stato progettato per resistere anche a grandi flussi di corrente, come quelli che si hanno al superamento della tensione di breakdown, può essere utilizzato come dispositivo per limitare la tensione applicata in un circuito (**diodo Zener**, simbolo circuitale in figura).

Il circuito accanto mostra come l'uso del diodo Zener come **limitatore di tensione** su una parte del circuito da proteggere (carico).

Per tensioni di valore limitato applicate ad esso (in polarizzazione inversa), non si ha flusso di corrente nel diodo ed il ramo in cui si trova è come se fosse aperto.

Quando la tensione raggiunge la tensione di breakdown (o Zener), incomincia a scorrere corrente, mantenendo la tensione ai capi del diodo costante (e quindi, per il teorema delle maglie, anche sul carico).

(la tensione rimane costante a causa della ddp che viene a generarsi nella resistenza di salvaguardia per la corrente elevata che circola attraverso il diodo).

