

MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

AA 2022/23 – Lezione 14 09/05/2023

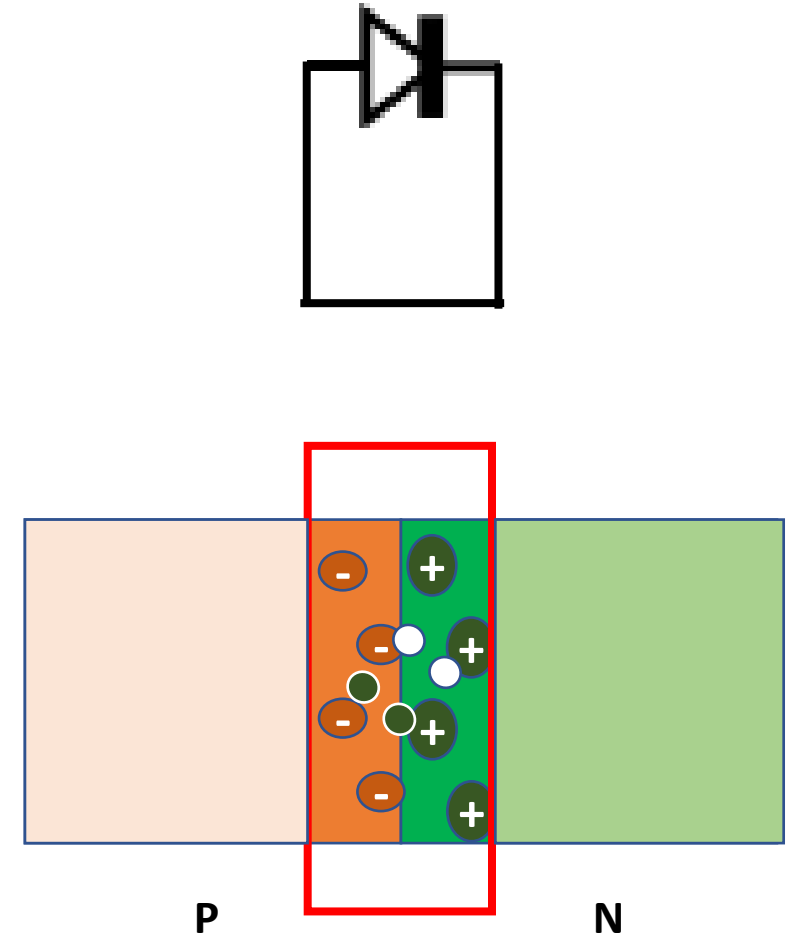
Argomenti della lezione di oggi

- Il fotodiodo
 - La cella fotovoltaica
 - Il diodo PIN
 - Il fotodiodo come sensore di luce
- Il LED (light-emitting diode)

Il fotodiodo

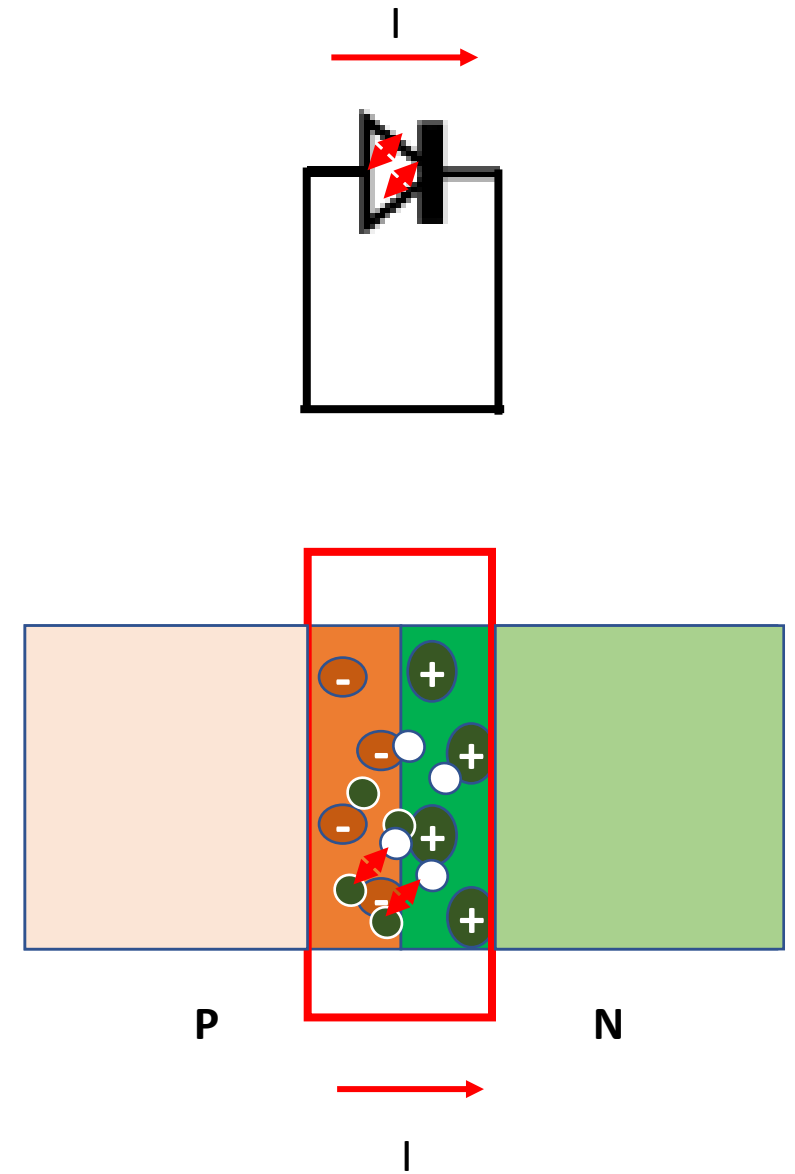
Abbiamo visto che in un diodo a giunzione P-N vi sono due flussi di corrente contrapposti

- La corrente di diffusione, dovuta alla tendenza dei portatori di carica maggioritari delle due regioni drogate di diffondere verso la regione in cui sono meno densi (gli elettroni di conduzione della zona N verso la zona P e viceversa per le lacune)
- La corrente di drift, dovuta alla differenza di potenziale esistente sulla giunzione, che tende a far muovere i portatori di carica maggioritari in verso opposto a quello precedente



Se il diodo non è alimentato (ad esempio i due terminali sono messi in cortocircuito, come in figura) i due flussi si equivalgono e la corrente circolante netta risulta nulla.

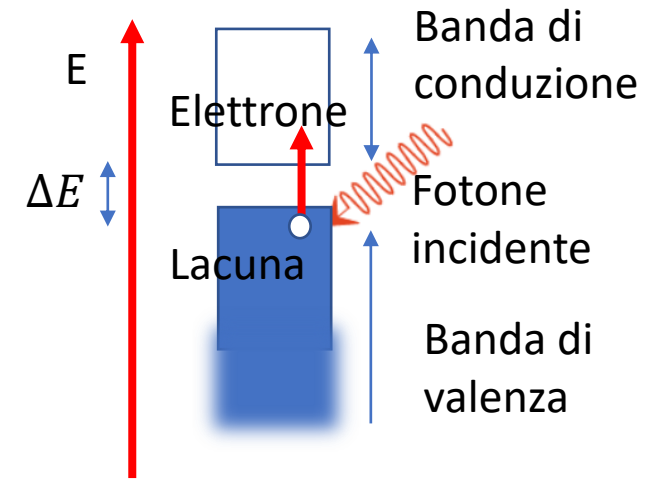
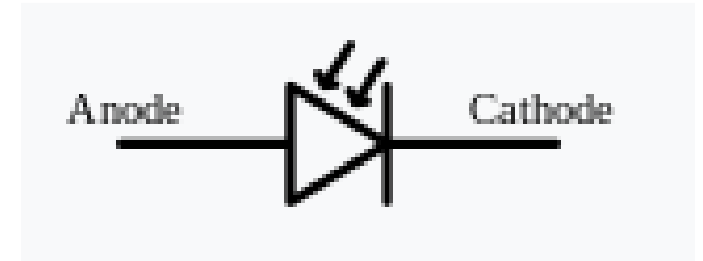
Se però per qualche ragione nella regione di svuotamento si creano nuove coppie elettrone-lacuna, la corrente di diffusione prevale e si ha una corrente circolante netta dalla zona P alla zona N.



Un tale fenomeno avviene nel fotodiodo (simbolo circuitale rappresentato in figura).

Nel fotodiodo la zona di svuotamento ha una finestra trasparente, che permette alla luce eventualmente incidente di interagire con il materiale in tale zona.

Se i fotoni che vengono scambiati con gli elettroni del materiale hanno una energia sufficiente, possono eccitare degli elettroni di valenza nella zona di conduzione, creando così coppie elettroni-lacune.

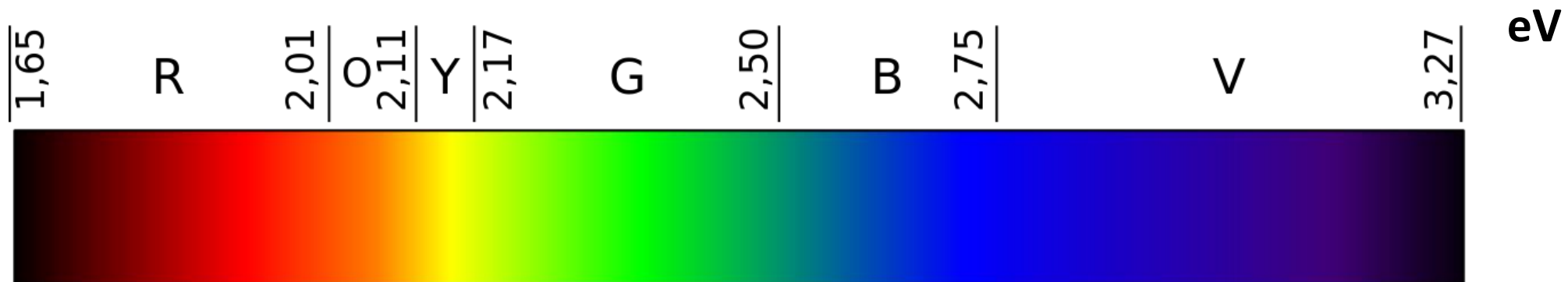
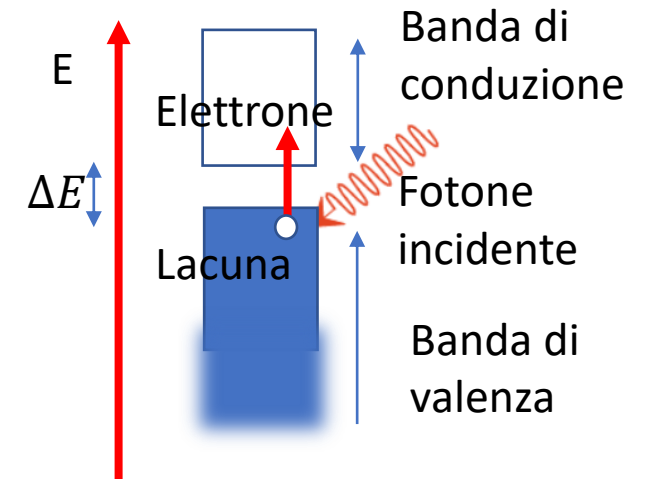


Questo fenomeno viene chiamato effetto fotoelettrico interno (perché l'elettrone coinvolto non abbandona il materiale).

Poiché l'eccitazione può avvenire solo se il fotone ha una energia pari o superiore al gap ΔE tra le due bande, c'è una soglia in frequenza ν_0 per la luce che può generare tale effetto:

$$\nu_0 = \frac{\Delta E}{h}$$

Ad esempio, per il silicio si ha $\Delta E = 1.12$ eV: se vi ricordate lo spettro nel visibile ha un confine inferiore pari a 1.65 eV e quindi questa soglia si pone nell'infrarosso.

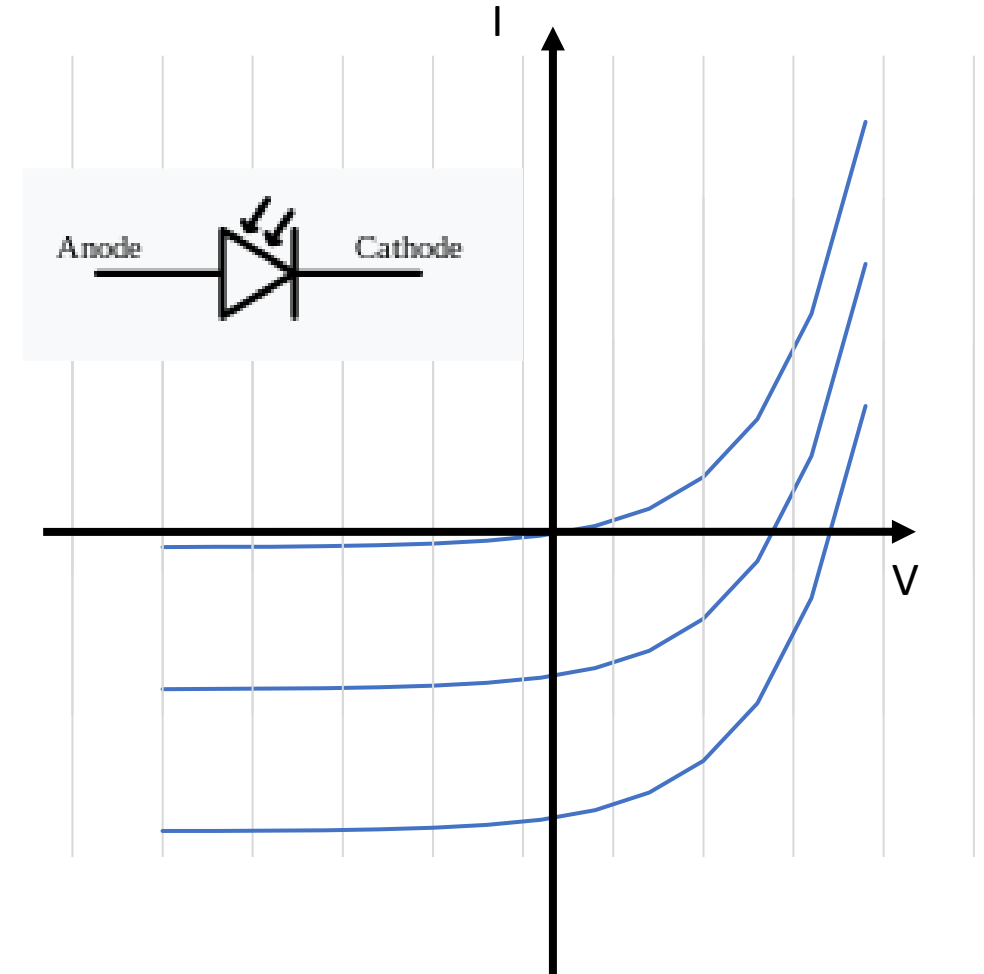


Per la corrente del fotodiodo abbiamo così due contributi:

- il primo «corrente di buio» quando il dispositivo non è illuminato e corrisponde a quella normale di un diodo
- Il secondo «fotocorrente» è la corrente dovuta al drift dei portatori di carica generati con l'effetto fotoelettrico, che fluisce da catodo ad anodo.

Le curve I-V risultano così modificate per un termine costante, che risulta essere proporzionale al numero di fotoni interagenti e quindi alla potenza trasportata dalla luce (per una certa frequenza)

In figura è mostrato l'andamento della curva caratteristica, per diversi valori di intensità luminosa (la corrente in tensione inversa aumenta in valore assoluto all'aumentare della intensità luminosa).



La cella fotovoltaica

Se il fotodiodo viene collegato ad un carico, senza alimentazione esterna oppure con una alimentazione tale che la fotocorrente sia molto superiore alla corrente di buio (diretta in verso opposto), esso può essere usato come una sorgente di energia elettrica: è il principio di funzionamento della cella fotovoltaica.



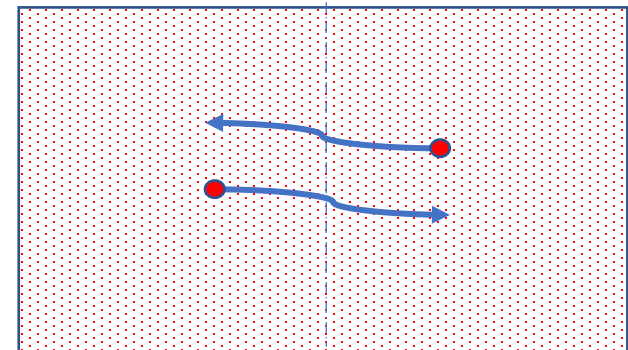
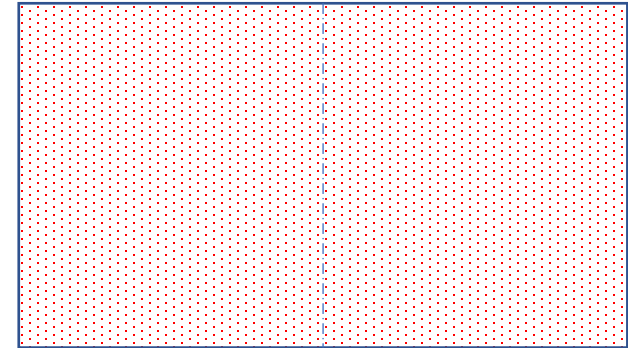
L'energia fornita da un singolo fotodiodo è piccola: per la sua massimizzazione vengono realizzate matrici bidimensionali composte da più celle. L'energia eventualmente erogata dalla cella fotovoltaica deriva da quella rilasciata dai fotoni assorbiti nel materiale.

La domanda che ci si può porre è: come si può descrivere formalmente tale energia, una volta che sono state create le coppie elettrone-lacuna?

La risposta alla precedente domanda va cercata nella disomogeneità della densità dei portatori di carica nelle varie regioni del semiconduttore (cosa che abbiamo visto trattando la loro diffusione dalle zone ad alta concentrazione a quelle a bassa concentrazione).

Immaginiamo che in un recipiente siano distribuiti degli elettroni, liberi di muoversi. In condizioni stazionarie (equilibrio) la densità degli elettroni è approssimativamente uniforme.

Ad esempio, suddividendo il volume in due parti, in media in un certo intervallo di tempo tanti elettroni passano dalla metà di sinistra a quella di destra quanti fanno il percorso inverso

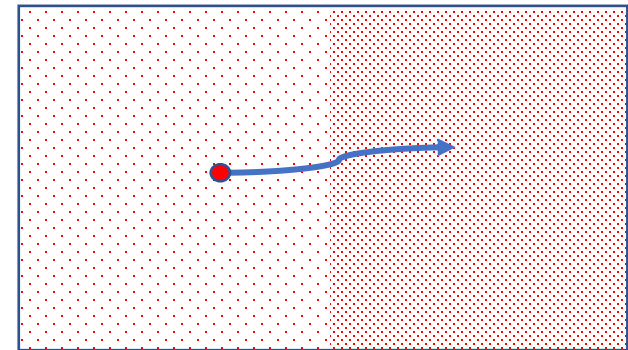
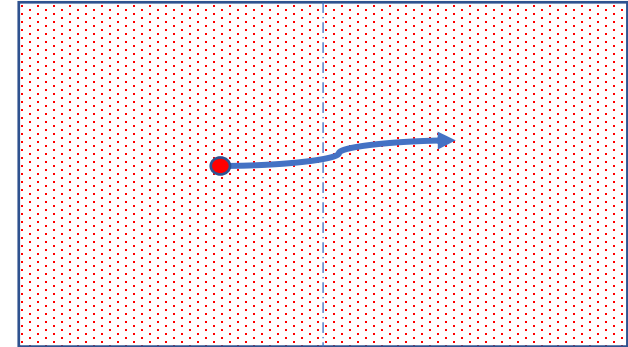


Per creare una disuniformità è necessario che qualche processo trasporti (pompi) elettroni da una metà all'altra del recipiente.

Procedendo in questo modo, si viene a creare una differenza di carica netta tra le due metà: per spostare un ulteriore elettrone sarà necessario spendere una certa quantità di energia $\Delta\mu$ (dipendente dalla differenza di carica tra le due metà del recipiente).

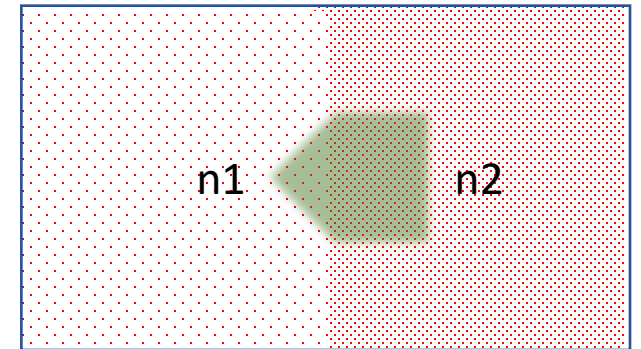
Questa energia $\Delta\mu$ può essere espressa come la differenza del valore assunto da una grandezza di stato μ nelle due parti del recipiente.

La grandezza μ viene chiamata **potenziale chimico**.



Poiché il lavoro effettuato per trasportare da una metà all'altra del recipiente è proporzionale alle densità di elettroni esistenti nelle due parti, il potenziale chimico in ciascuna delle due parti risulta proporzionale alla densità di elettroni ivi presente.

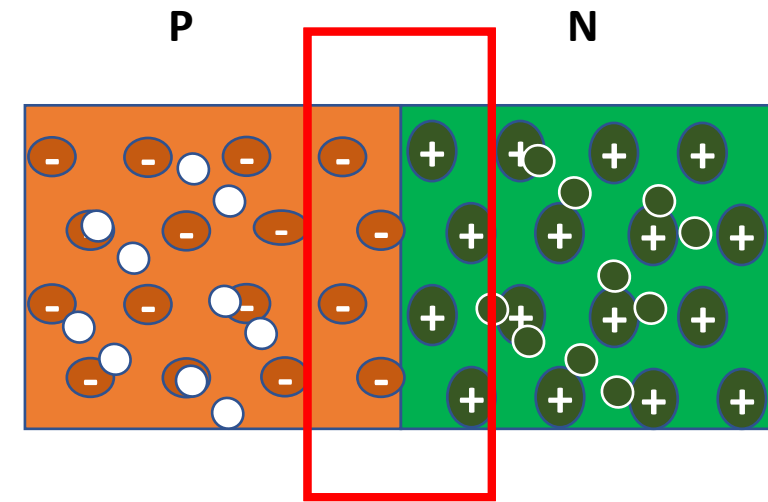
Lasciati a se stessi, gli elettroni cominceranno a diffondersi dalla zona a densità maggiore (potenziale chimico maggiore) a quella a densità minore (potenziale chimico minore)



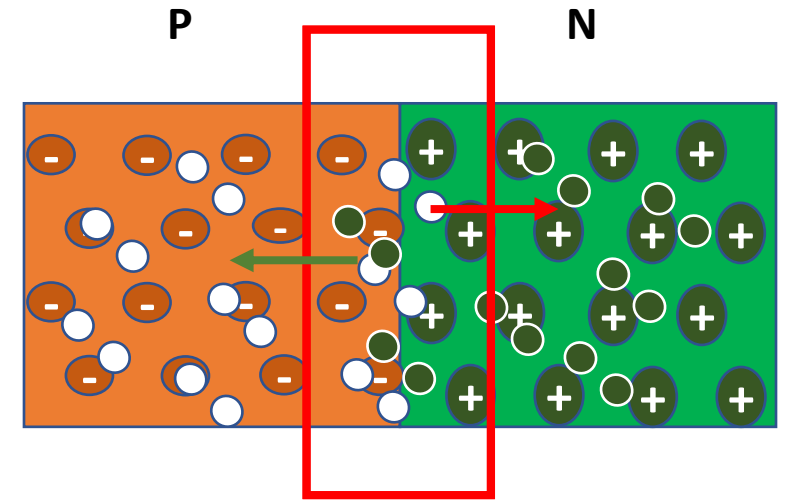
Questo accade anche quando consideriamo le lacune presenti nel materiale semiconduttore di un diodo PN: ad esse è associato un potenziale chimico proprio, indipendente da quello degli elettroni di conduzione.

Oltre a questi potenziali chimici, nella regione di svuotamento è presente anche il potenziale elettrico dovuto alla carica netta presente in essa.

Senza alimentazione, in tale regione le differenze di potenziale elettrico e di potenziale chimico si equilibrano e non vi è flusso di corrente netto.



Se però si creano coppie elettrone-lacuna nella regione di svuotamento, il potenziale chimico associato ad un tipo di portatore di carica aumenta nella regione in cui esso è maggioritario, facendo quindi fluire i portatori dalla zona a potenziale chimico maggiore a quella in cui è minore.



Il flusso di energia associato alla corrente generata dal moto di ciascuno dei portatori sarà allora pari alla differenza di potenziale chimico incontrata, per la densità di tali portatori, meno quella associata alla barriera di potenziale elettrico

$$n \Delta\mu + n q \Delta V$$

(ove q è la carica del portatore)

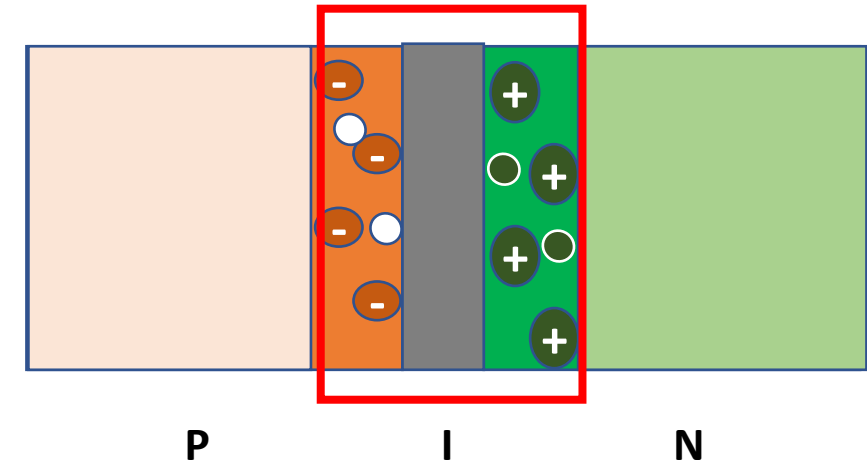
Il diodo PIN

Un problema del fotodiodo è che la regione di svuotamento, che costituisce la zona attiva alla ricezione della luce, ha dimensione estremamente piccola.

Questo può essere ovviato realizzando tra le due regioni drogate P e N una regione intrinseca (I) che in polarizzazione inversa del dispositivo risulta priva di portatori di carica.

La regione intrinseca può essere resa molto grande rispetto alla normale regione di svuotamento di un diodo a giunzione PN, rendendo il dispositivo adatto per il suo utilizzo come fotodiodo.

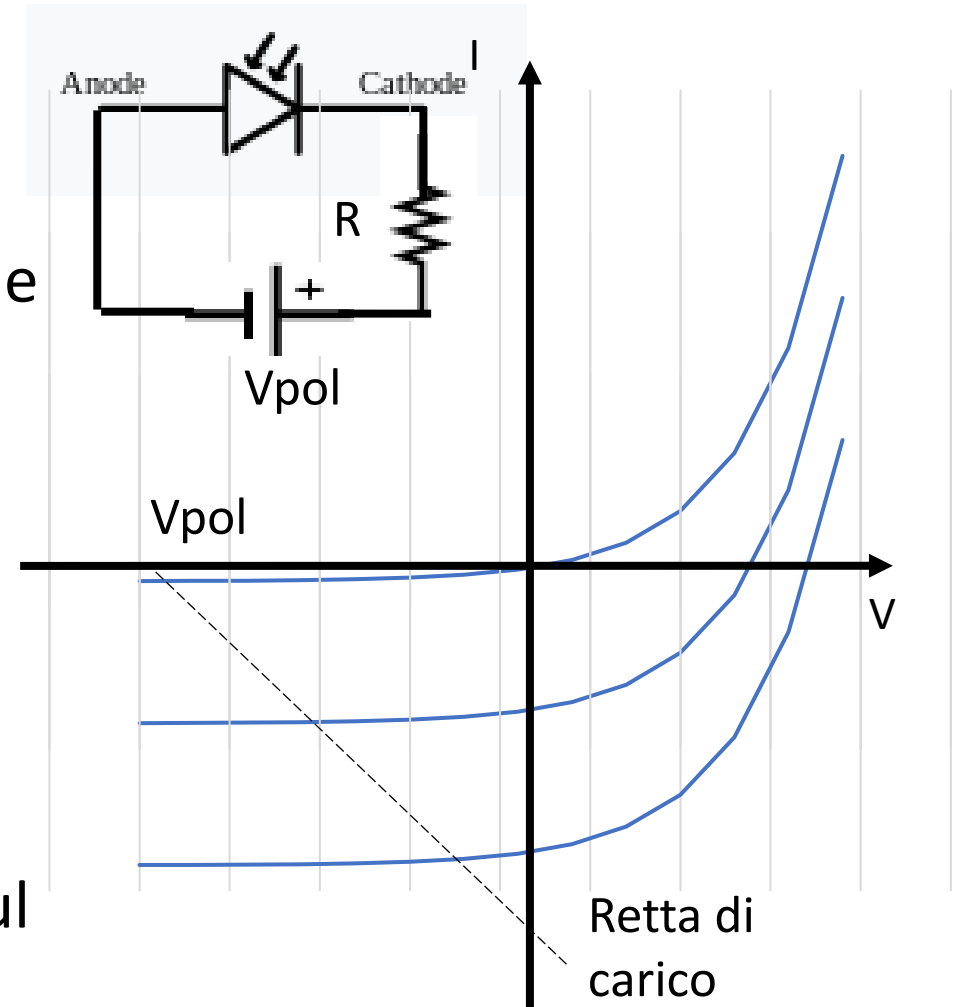
(il diodo PIN ha anche molte altre applicazioni: in questo corso ci limiteremo a citare quella nell'ambito dell'assorbimento di energia luminosa)



Il fotodiodo come sensore di luce

Se il fotodiodo viene alimentato in polarizzazione inversa (tensione V_{pol}), la corrente circolante I risulta essere proporzionale alla potenza luminosa P incidente, approssimativamente indipendente dalla tensione effettiva applicata.

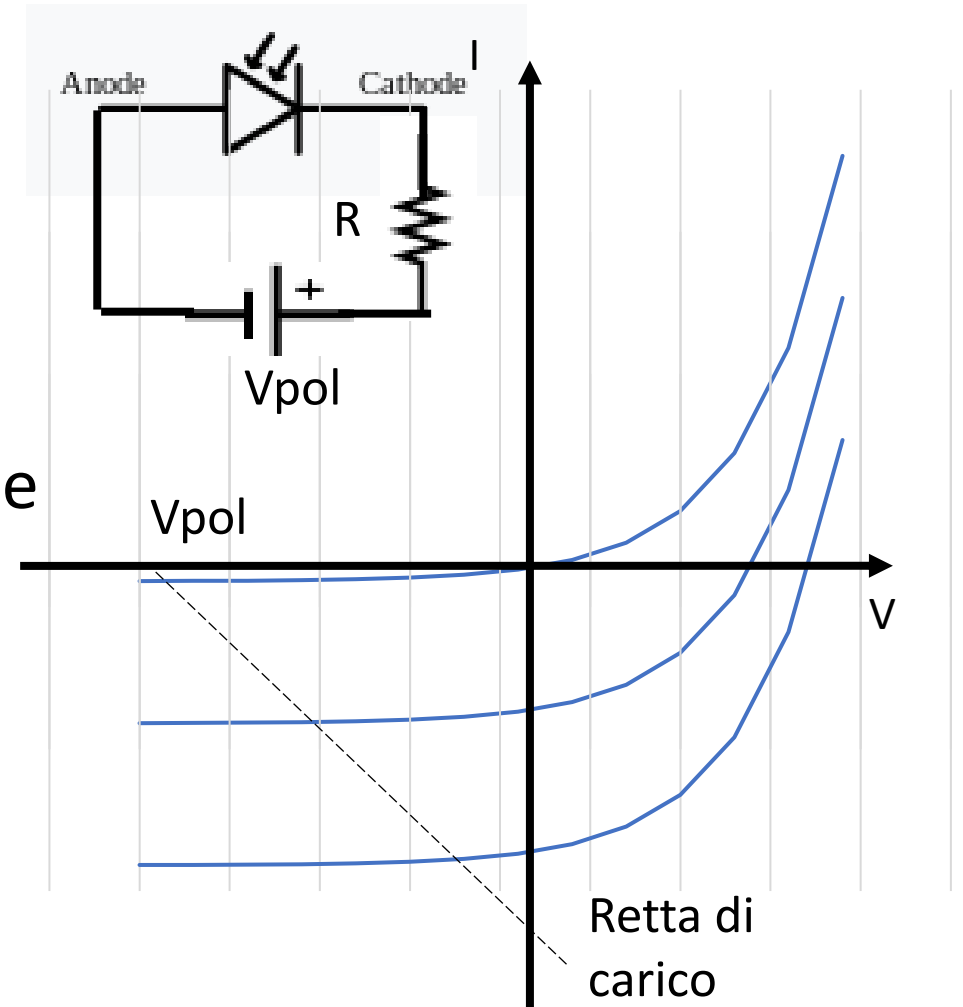
La presenza di una resistenza di carico R non modifica questa situazione ed il segnale in tensione V su di essa risulta ancora proporzionale a P . (la curva corrente-tensione sul diodo in questa configurazione segue l'andamento della retta di carico in figura)



Questo modo di funzionamento viene detto fotoconduttivo.

Il fotodiodo in questa configurazione può essere utilizzato come sensore di luce.

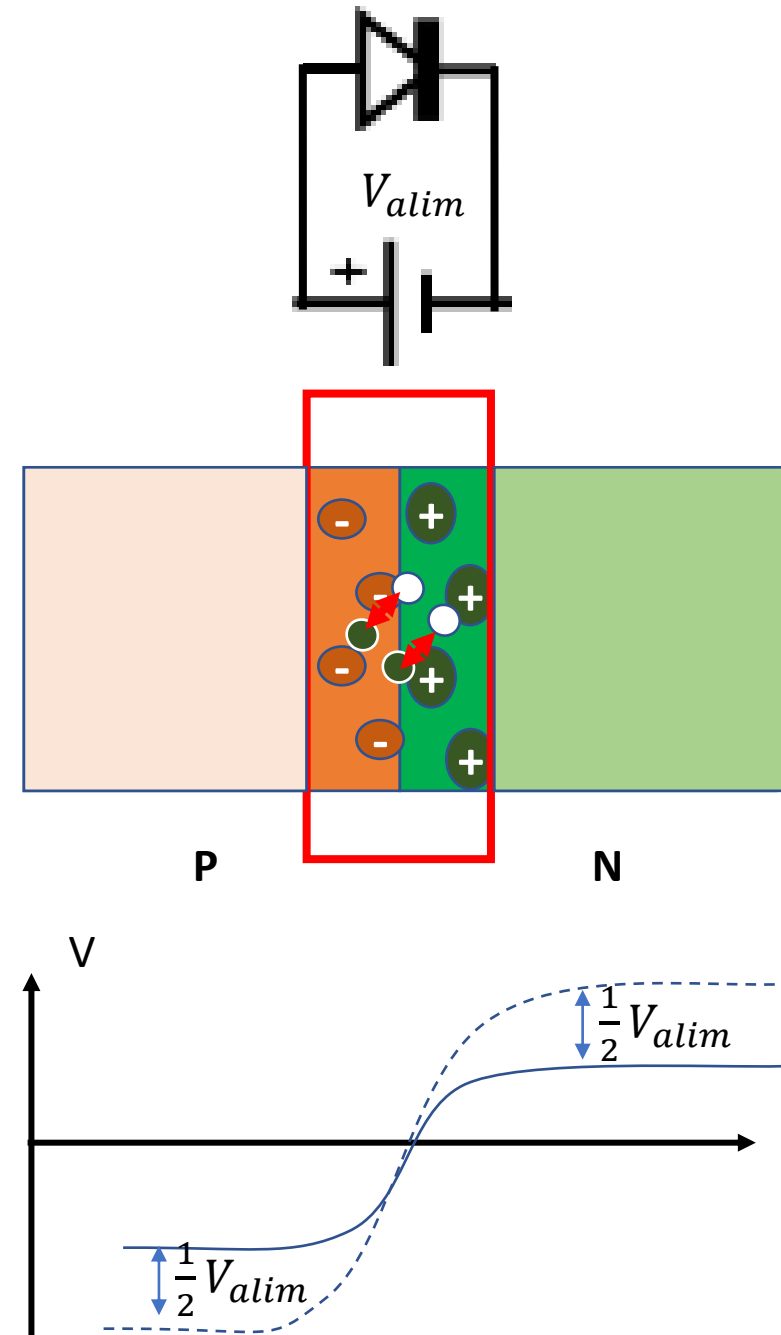
In questa categoria, il fotodiodo PIN è quello più usato, essendo un dispositivo più veloce e più sensibile del fotodiodo a giunzione PN.



Il LED (Light-Emitting Diode)

Nella lezione 12 abbiamo visto come il diodo a giunzione in polarizzazione diretta comincia a condurre per due motivi:

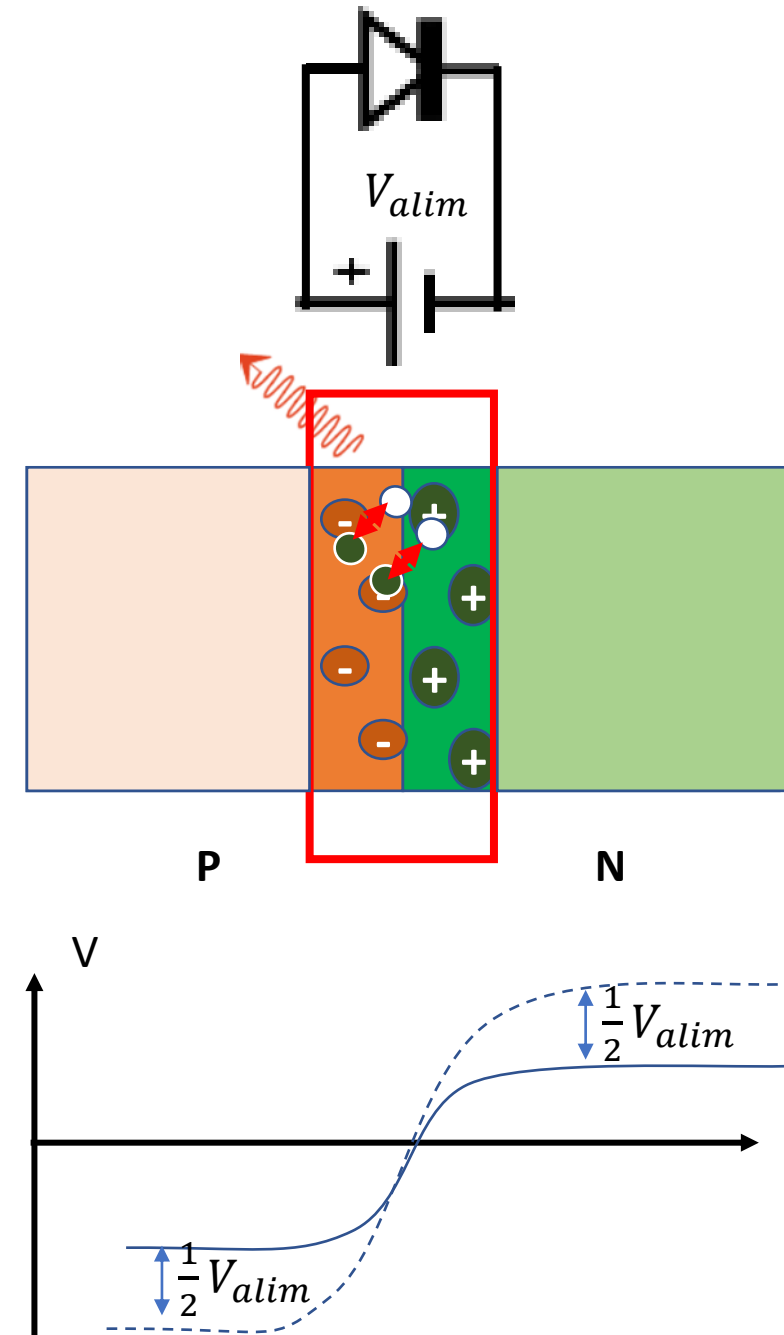
- La tensione di alimentazione riduce la barriera di potenziale alla giunzione e quindi la corrente di drift (dovuta a tale d.d.p.) diminuisce, lasciando dominante quella di diffusione, in verso opposto
- Il numero di portatori nella zona di svuotamento aumenta, perché la tensione di alimentazione «aiuta» gli elettroni di valenza a passare nella banda di conduzione e quindi a creare coppie elettrone-lacuna



Quest'ultimo fenomeno aumenta la densità di elettroni e lacune nella regione di svuotamento: ciò aumenta la probabilità che gli elettroni e le lacune si ricombinino, rilasciando una quantità di energia pari a quella del gap tra le bande di valenza e conduzione.

Nella maggior parte dei materiali semiconduttori questa energia finisce per trasformarsi in energia termica del materiale, riscaldandolo.

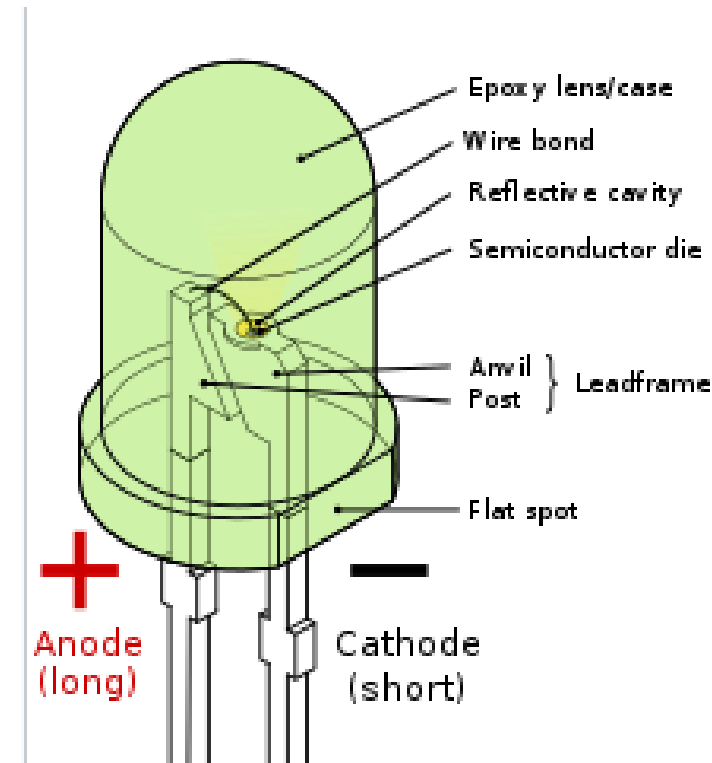
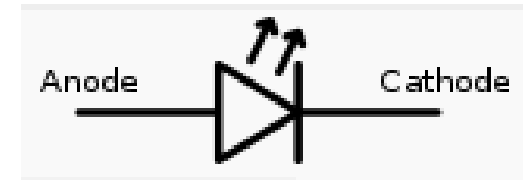
In alcuni tipi di semiconduttori però l'energia rilasciata dalla combinazione elettrone-lacuna si presenta sotto forma di fotoni, cioè di luce: questo fenomeno viene chiamato **elettroluminescenza**.



Se lo strato di semiconduttore è abbastanza sottile ed incapsulato con materiale trasparente alla luce emessa, il diodo può funzionare come sorgente luminosa, con una emissione caratterizzata da una stretta banda di frequenza per i fotoni emessi.

In figura sono rappresentati il simbolo circuitale del LED e lo schema di un dispositivo commerciale comune.

Gli elettrodi servono da supporto al diodo montato, contro stress meccanici, e il tutto è immerso in resina epossidica, che serve sia da involucro per il dispositivo, che da lente per la fuoriuscita della luce.

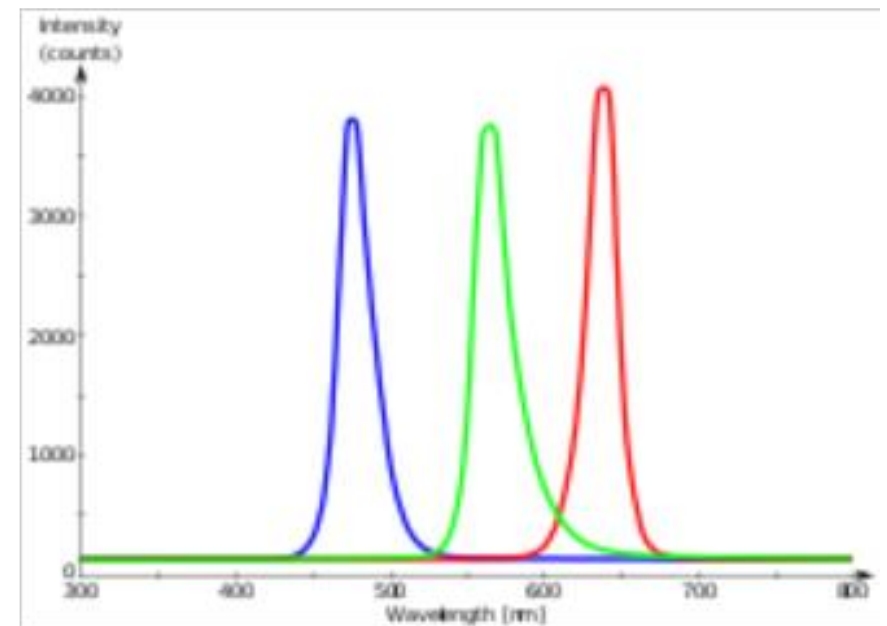


Il materiale semiconduttore utilizzato è generalmente un composto di gallio (silicio e germanio non sono adatti alla elettroluminescenza, perché la dispersione dell'energia di ricombinazione è tipicamente termica).

A seconda del composto, varia l'energia del gap e quindi la frequenza della luce emessa. Alcuni esempi di semiconduttori utilizzati a tale scopo sono riportati nella tabella accanto.

Nella figura sotto vengono visualizzati gli spettri di emissione di tre led di tipo diverso: sono caratterizzati da bande relativamente strette.

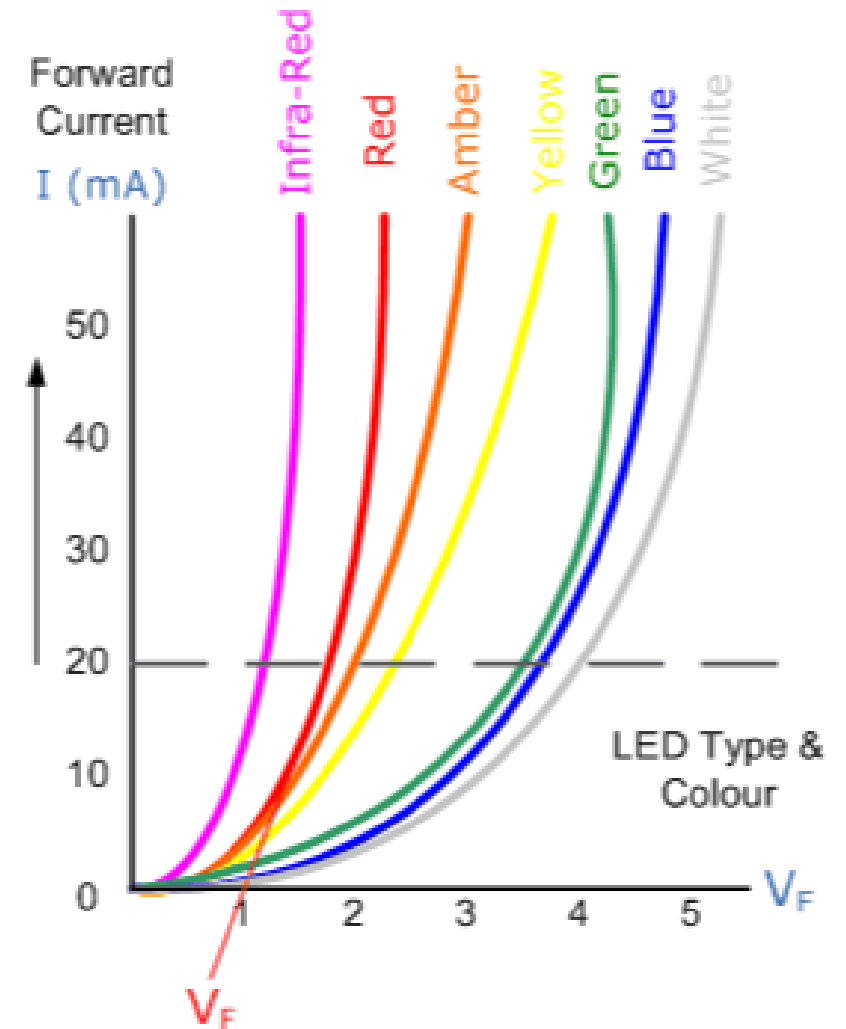
AlGaAs	-	rosso e infrarosso
GaAlP	-	verde
GaAsP	-	rosso, rosso-arancione, arancione e giallo
GaN	-	verde e blu
GaP	-	rosso, giallo e verde
ZnSe	-	blu
InGaN	-	blu-verde, blu
InGaAlP	-	rosso-arancione, arancione, giallo e verde



Il LED, come ogni altro diodo PN a polarizzazione diretta, comincia a condurre significativamente (e ad emettere luce) solo al di sopra di una certa tensione (corrispondente alla tensione di lavoro).

Questa soglia dipende dal gap in energia tra le bande del semiconduttore e quindi dal colore della luce emessa.

Altra caratteristica comune del diodo è che per tensioni troppo alte di alimentazione la potenza elettrica dissipata nel dispositivo lo distrugge (questo è un tipico errore nelle prove sperimentali: bastano pochi volt sopra la tensione di funzionamento).



Dispositivi che contengono LED che emettono i colori primari (chiamati RGB) vengono utilizzati anche per produrre luce bianca, tramite sintesi cromatica.

Oltre che come semplice sorgente luminosa, il LED (in congiunzione con un fotodiodo) viene usato per un gran numero di impieghi nell'elettronica.

Ne cito alcuni

Fotocellula: in questa categoria ricadono anche dispositivi quali i rivelatori di fumo

Optoaccoppiatore: per trasmettere segnali tra due circuiti che devono altrimenti essere isolati elettricamente tra di loro. In questa categoria ricade anche il sistema di rigenerazione del segnale in una fibra.

Lettori di CD o DVD: misurando l'intensità della luce diffratta dalla superficie del substrato del disco.

