

LED

1. Introduzione

Con la sigla LED si indica un diodo ad emissione luminosa (LED, Light Emitting Diode), sviluppato da Nick Holonyak Jr nel 1962.

Il dispositivo sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni a partire dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna.

Gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo drogate con impurità di tipo diverso, e cioè di tipo “N” per gli elettroni e di tipo “P” per le lacune.

Il colore della radiazione emessa è definito dalla differenza di energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune e corrisponde tipicamente al valore della banda proibita del semiconduttore in questione.

2. Assorbimento, emissione spontanea e stimolata

Il principio di funzionamento del diodo LED e del diodo LASER si basa su tre fenomeni fondamentali, tipici dell'interazione tra radiazione e materia: **l'assorbimento**, **l'emissione spontanea** e **l'emissione stimolata**, i cui processi sono schematicamente indicati nella figura 19.

A temperatura ambiente nella struttura cristallina di un semiconduttore gli atomi si trovano nello stato stabile e la maggior parte degli elettroni occupano le orbite più interne corrispondenti ai livelli energetici della banda di valenza. Fornendo energia dall'esterno (ad esempio applicando un campo elettrico), se questa è almeno pari al valore dato dall'espressione:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

dove E_2 ed E_1 rappresentano rispettivamente i livelli energetici delle bande di conduzione e di valenza, h la costante di Planck e ν la frequenza della radiazione fornita, gli elettroni di valenza possono acquisire energia sufficiente a rompere i legami che li tengono uniti ai rispettivi nuclei, e quindi superare il GAP passando nella banda di conduzione.

La transizione da un livello energetico inferiore ad uno superiore, denominata assorbimento (figura 1a), determina nella struttura atomica del semiconduttore la formazione di una lacuna avente carica positiva pari, in valore assoluto, a quella di un elettrone.

Tuttavia tale squilibrio è solo momentaneo, in quanto gli elettroni tendono a ritornare nel livello energetico di partenza (nella banda di valenza) per ricombinarsi con le lacune, restituendo l'energia acquisita nella fase di assorbimento sotto forma di radiazione luminosa avente frequenza $\nu = (E_2 - E_1)/h$ (figura 1b): è proprio questo il fenomeno dell'**emissione spontanea** in cui l'atomo eccitato, dopo un tempo più o meno lungo, ritorna spontaneamente nel suo stato iniziale emettendo energia luminosa.

La distribuzione energetica degli elettroni di valenza è casuale e rimane tale anche quando questi passano nella banda di conduzione; ciò significa che l'energia necessaria ai vari elettroni per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione è diversa per ciascuno di essi ed è pari alla differenza tra il livello energetico di partenza (nella banda di valenza) e quello di arrivo (nella banda di conduzione).

Conseguentemente, quando gli elettroni ritornano al proprio livello iniziale (nella banda di valenza), emettono fotoni che hanno frequenze diverse dipendenti dal relativo salto energetico, per cui lo spettro di emissione che ne risulta è piuttosto ampio.

La radiazione è pertanto formata da oscillazioni con fase distribuita casualmente e per questo motivo è denominata **incoerente**.

Su tale principio si basa il funzionamento del diodo LED.

È da osservare che inviando al reticolo cristallino una radiazione (fotone incidente) avente energia pari a $h\nu = E_2 - E_1$ viene prodotto un duplice effetto; infatti, da un lato vengono eccitati (assorbimento) gli elettroni che si trovano nella banda di valenza (livello energetico E_1), dall'altro gli elettroni che già si trovano nella banda di conduzione (livello energetico E_2) sono forzati a ritornare al livello E_1 , con l'emissione sia del fotone incidente sia di quello assorbito durante la fase di assorbimento che ha la stessa frequenza del primo; tale fenomeno prende il nome di **emissione stimolata** (figura 1c).

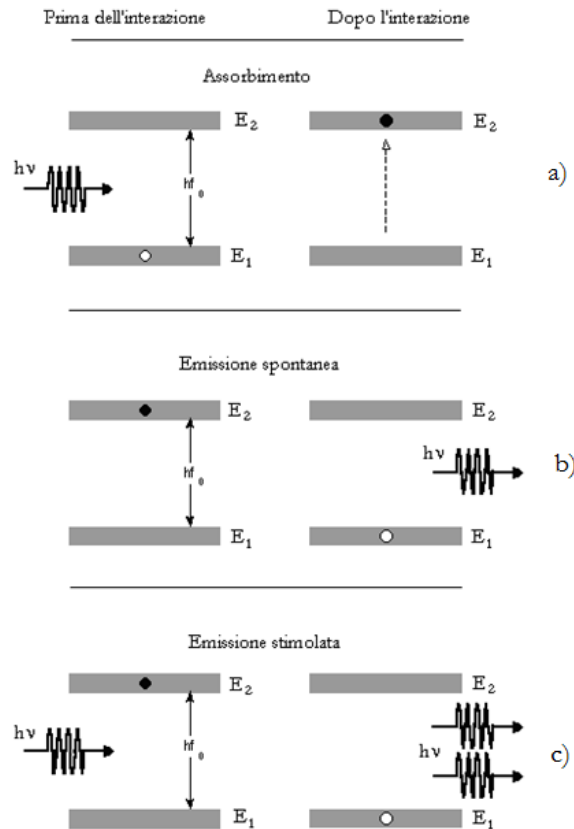


Figura 1 – Rappresentazione schematica dei fenomeni: a) assorbimento; b) emissione spontanea; c) emissione stimolata

Poiché la transizione avviene tra i livelli E_2 ed E_1 , i fotoni emessi tendono ad avere la stessa frequenza determinando uno spettro molto più stretto rispetto al caso dell'emissione spontanea; la radiazione che ne deriva è formata da oscillazioni aventi quasi tutte la stessa fase ed è quindi detta **coerente**.

La prevalenza dell'uno o dell'altro processo (emissione spontanea o stimolata) dipende dal numero degli elettroni presenti nei due livelli, cioè dalle popolazioni dei livelli energetici, in quanto il numero delle eccitazioni è funzione del numero degli elettroni $N(E_1)$ presenti nel livello ad energia E_1 , e il numero delle emissioni stimolate dipende dalla quantità di elettroni $N(E_2)$ presenti nel livello eccitato E_2 .

Pertanto se $N(E_1) > N(E_2)$ si ha assorbimento, se $N(E_2) > N(E_1)$ si ha emissione stimolata.

Normalmente è presente la prima condizione, ma è possibile ottenere artificialmente l'inversione delle popolazioni e passare quindi dall'assorbimento all'emissione stimolata.

Questo processo fu realizzato per la prima volta nel 1955 da J.P. Gordon, H.J. Zeiger e C.H. Townes, nel campo delle microonde e per questo venne chiamato **MASER** (Microwave, Amplification, by Stimulated Emission of Radiation). Successivamente, nel 1960, Maiman ottenne lo stesso processo per l'emissione stimolata della luce visibile: nacque così il **LASER** (Light Amplification, by Stimulated Emission of Radiation).

3. Principio di funzionamento del Diodo LED

Il principio di funzionamento del diodo LED, formato da una semplice giunzione PN realizzata in un semiconduttore uniformemente drogato, si basa sul fenomeno dell'emissione spontanea.

Applicando alla giunzione una polarizzazione diretta, gli elettroni di valenza acquistano l'energia necessaria per passare nella banda di conduzione e dare così il via al processo di emissione spontanea visto nella precedente unità. Ogni elettrone che ritorna nel suo livello energetico originale, non sempre però produce emissione di fotoni: al riguardo viene definito un parametro, denominato efficienza quantica interna del LED (η_i), fornito dal rapporto tra il numero dei fotoni generati ed il numero complessivo di transizioni dalla condizione di eccitazione a quella di normalità.

Questo parametro può essere migliorato utilizzando opportune geometrie nella realizzazione del dispositivo.

Inoltre, non tutti i fotoni emessi possono essere irradiati all'esterno in quanto, quelli che incidono sulla superficie di separazione *semiconduttore-mezzo esterno* con un angolo superiore all'angolo limite, vengono totalmente riflessi e rimangono confinati all'interno della struttura.

I fotoni che invece incidono con un angolo inferiore a quello limite subiscono una riflessione parziale, e quindi una parte di essi viene rifratta ed irradiata all'esterno.

È importante osservare che, essendo molto elevata la differenza tra l'indice di rifrazione del semiconduttore costituente il diodo LED ($n_s = 3,5$) e quella del mezzo esterno ($n_0 = 1$ se aria o $n_0 = 1,45$ se quarzo), l'angolo limite entro il quale la radiazione deve essere contenuta per poter essere emessa all'esterno risulta molto piccolo.

Per tener conto di questo fenomeno è stata definita l'**efficienza quantica esterna** (η_e) della sorgente, che esprime il rapporto tra il numero di fotoni che riescono a propagarsi all'esterno e quello dei fotoni complessivamente generati dal LED.

In pratica per η_e si ottengono valori di circa 1,5%, nel caso di interfaccia GaAs/aria e di circa il 4% nel caso di interfaccia GaAs/quarzo.

Per migliorare l'efficienza quantica esterna, cioè aumentare il numero dei fotoni irradiati esternamente, si può realizzare un adattamento tra il semiconduttore costituente il diodo LED e il mezzo esterno, applicando sulla superficie di emissione del diodo LED uno strato di materiale antiriflettente, avente spessore pari ad un multiplo dispari di $\lambda/4$ e indice di rifrazione $n_a = \sqrt{n_s n_0}$, dove n_s ed n_0 sono rispettivamente gli indici di rifrazione del semiconduttore e del mezzo esterno.

Il semiconduttore utilizzato per la realizzazione del diodo LED può essere **arseniuro di gallio** (GaAs), **fosfuro di gallio** (GaP), **fosfoarseniuro di gallio** (GaAsP), **carburo di silicio** (SiC), o **nitrato di gallio e indio** (GaInN). La scelta del semiconduttore determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

Il LED è un dispositivo reversibile: se la giunzione P-N viene esposta direttamente ad una fonte luminosa (ad esempio raggi solari), ai suoi terminali viene generata una tensione, il cui valore dipende dall'intensità della radiazione e dal colore del LED (massima per il blu).

Questa caratteristica viene abitualmente sfruttata nella realizzazione di sensori, per sistemi di puntamento degli impianti fotovoltaici (inseguitori solari).

4. Utilizzo dei LED

I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso; venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli optoisolatori.

Successivamente furono sviluppati LED che emettevano luce gialla e verde.

Negli anni 90 del secolo scorso furono realizzati LED con efficienza sempre più alta in una gamma di colori sempre più ampia fino a quando, con la realizzazione di LED a luce blu, non fu possibile realizzare dispositivi che, integrando tre LED (uno rosso, uno verde ed uno blu), potevano generare qualsiasi colore (sintesi RGB).

Negli ultimi anni i LED si sono diffusi in molte applicazioni dove sono richieste elevata affidabilità, lunga durata ed elevata efficienza, come ad esempio:

- telecomandi ad infrarossi;
- indicazione di stato (lampade spia);
- retroilluminazione di schermi LCD;
- semafori e luci di arresto delle automobili;
- cartelloni a messaggio variabile;
- illuminazione.

4.1 LED nell'illuminazione

I LED sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali.

Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade ad incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (a risparmio energetico), è oggi possibile con notevoli benefici.

Fondamentalmente, il limite dei LED per questo tipo di applicazione è la quantità di luce emessa (flusso luminoso espresso in lumen [lm]), che nei modelli di ultima generazione per uso professionale è di circa 120 lm, ma che nei modelli più economici raggiunge solo 20 lm.

Si tenga presente che una lampada ad incandescenza da 60 W emette un flusso luminoso di circa 550 lm.

Inoltre, i LED più luminosi sono ancora quelli a luce fredda con resa cromatica relativamente bassa.

Un altro limite illuminotecnico deriva dalle loro caratteristiche di emissione e durata, che sono fortemente condizionate dalle caratteristiche di alimentazione e dissipazione.

Diventa dunque difficile individuare rapporti diretti tra le varie grandezze, tra le quali entra in gioco anche un ulteriore parametro: l'angolo di emissione del fascio di luce, che può variare entro 4° ed oltre 120° .

Per applicazioni illuminotecniche sono indispensabili LED ad alta potenza (≥ 1 W), con correnti di esercizio minime di 350 mA.

Attualmente i LED sono molto utilizzati quando l'impianto di illuminazione necessita delle seguenti caratteristiche:

- miniaturizzazione,
- saturazione dei colori,
- effetti dinamici (variazione di colore RGB)
- valorizzazione di forme e volumi.

Riassumendo, i vantaggi dei LED dal punto di vista illuminotecnico sono i seguenti:

- durata di funzionamento (la durata dei LED è di uno-due ordini di grandezza superiore a quella delle sorgenti luminose tradizionali, specialmente in condizioni di stress meccanici, i LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore);
- prezzi contenuti;
- costi di manutenzione azzerati;
- elevato rendimento (soprattutto rispetto alle lampade ad incandescenza e alogene);
- luce pulita perché priva di componenti IR UV;
- facilità di realizzazione di ottiche efficienti in plastica;
- flessibilità di installazione del punto luce;
- circuiti di alimentazione non complessi;
- elevata velocità di commutazione;
- saturazione dei colori;
- possibilità di un forte effetto spot (sorgente quasi puntiforme);
- funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione (normalmente entro 3-24 V_{dc});
- accensione a freddo (fino a -40°C) senza problemi;
- insensibilità ad umidità e vibrazioni,
- assenza di mercurio;
- tecnologia di costruzione compatibile con quella dei circuiti integrati in silicio.

5. Caratteristiche tecniche dei LED

I LED sono alimentati in corrente continua con una resistenza in serie (R_s), il cui scopo è quello di limitare la corrente diretta al valore di regime, che può variare da 5-6 mA fino a 20 mA quando è richiesta molta luce; tale valore dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce emessa dal LED.

Inoltre, in assenza di tale resistenza, un piccolo aumento della corrente farebbe diminuire il valore della resistenza differenziale del LED.

Tale diminuzione causerebbe, a tensione costante, l'aumento della corrente e un conseguente sempre maggiore riscaldamento della giunzione P-N per effetto Joule, che porterebbe velocemente il dispositivo a deteriorarsi irreversibilmente.

Il valore di R_s può essere calcolato conoscendo la corrente di lavoro richiesta I_f , la tensione di alimentazione V_a e la tensione di soglia V_s del LED, cioè:

$$R_s = \frac{V_a - V_s}{I_f} \quad (2)$$

La tensione di soglia V_s è indicata nel datasheet del costruttore.

Se non si dispone del datasheet può considerare una V_s pari a circa 2 V e una corrente di lavoro I_f di 10-15 mA e non oltre 20 mA. Valori superiori di corrente sono in genere sopportati, ma non assicurano un funzionamento duraturo.

Pertanto, per la (2), considerano una tensione di alimentazione $V_a = 12$ V, la resistenza deve essere compresa tra questi due valori:

$$R_s = \frac{V_a - V_s}{I_f} = \frac{12 - 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 1k\Omega \quad (\text{valore standard} = 1k\Omega)$$

$$R_s = \frac{V_a - V_s}{I_f} = \frac{12 - 2}{20 \cdot 10^{-3}} = 500\Omega \quad (\text{valore standard} = 560\Omega)$$

I LED possono operare solo con tensione diretta e non devono essere sottoposti a tensioni inverse superiori a pochi volt, che potrebbero danneggiarli.

A differenza delle lampade ad incandescenza sono molto sensibili alle variazioni di tensione: basta il 10% in meno perché non si illuminino e il 10% in più per bruciarli.

La massima quantità di luce che può essere emessa da un LED è limitata essenzialmente dalla massima corrente media sopportabile, che è determinata dalla massima potenza dissipabile dal chip.

I recenti dispositivi progettati per impieghi professionali sono dotati di un adeguato dissipatore termico, necessario per smaltire il calore prodotto; sono ormai in commercio LED a luce bianca con potenza di 10 W e corrente assorbita di 1 A. Quando sono richieste potenze più elevate, si tende a non usare correnti continue, ma correnti pulsanti con ciclo operativo scelto in maniera opportuna.

Ciò permette di incrementare notevolmente la corrente, e di conseguenza alla luce emessa, mantenendo la corrente media e la potenza dissipata nei limiti consentiti.

6. Polarizzazione

Solitamente il terminale più lungo di un LED è l'**anodo (+)** ed il terminale più corto il **catodo (-)**.

Per polarizzare correttamente un diodo LED, si può sfruttare una caratteristica particolare del package: se si guarda il led dall'alto, si può notare come la parte laterale del package non sia regolare, ma squadrata da un lato (figura 2a) ad identificare il catodo (-).

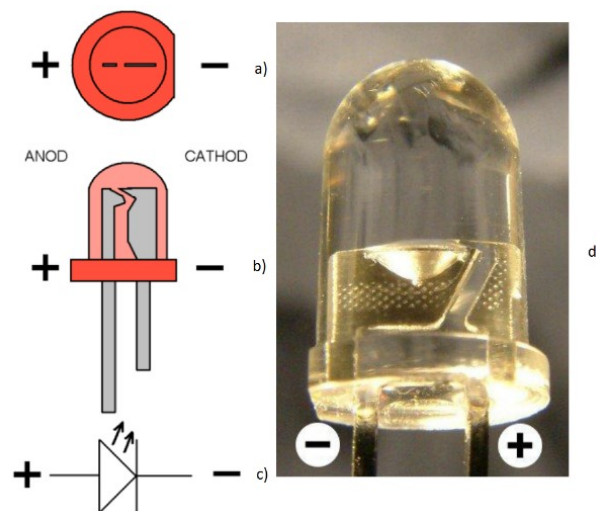


Figura 2 – a) LED visto dall'alto; LED visto lateralmente; c) simbolo del LED; d) esempio di LED

Esiste anche un metodo visivo per il riconoscimento del catodo o dell'anodo di un LED.

Guardando all'interno del package trasparente si possono vedere due parti metalliche separate di diversa grandezza collegate ai terminali; la parte più grande è sempre collegata al catodo e, di conseguenza, la più piccola all'anodo (+).

7. Colori

I LED attualmente in commercio sono composti da vari materiali semiconduttori in grado di produrre i seguenti colori:

- AlGaAs - rosso ed infrarosso;
- GaAlP – verde;
- GaAsP - rosso, rosso-arancione, arancione e giallo;
- GaN - verde e blu;
- GaP - rosso, giallo e verde;
- ZnSe – blu;
- InGaN - blu-verde e blu;
- InGaAlP - rosso-arancione, arancione, giallo e verde;
- SiC come substrato – blu;
- Diamante (C) – ultravioletto,
- Silicio (Si) come substrato – blu;
- Zaffiro (Al₂O₃) come substrato – blu.

La tensione di soglia dei LED è legata al colore della luce emessa, come indicato nella tabella 1.

Tabella 1 – Valori della tensione di soglia in funzione del colore della luce emessa

Relazione colore luce – caduta di tensione del LED	
Colore luce LED	Tensione di soglia v.
Infrarosso	1,6 V
Rosso	1,8 – 2,1 V
Arancione	2,2 V
Giallo	2,4 V
Verde	2,6 V
Blu	3,0 – 3,5 V
Bianco	3,0 – 3,5 V
Ultravioletto	3,5 V

8. LED bianchi

La luce bianca può essere prodotta usando congiuntamente tre LED di colore rosso, verde e blu (sintesi RGB). Tuttavia, la qualità del bianco che si ottiene è molto bassa in quanto sono utilizzate solo tre bande strette dello spettro visibile.

Un metodo migliore utilizza un LED blu ad alta efficienza, sfruttando le proprietà del fosforo per ottenere luce bianca.

Quando la luce del LED blu colpisce uno strato sovrastante di fosforo, drogato con granato di ittrio (YAG) e cerio (Ce^{3+}), produce una luce fluorescente gialla (figura 3); l'effetto complessivo della luce blu e gialla genera una larghezza di banda molto ampia che viene percepita dall'occhio umano come luce bianca, con una tonalità denominata **lunar white** e con indice di resa cromatica superiore a quello del bianco ottenuto combinando i LED rosso, verde e blu.

Questa tecnica è stata sviluppata da Nichia Corporation ed è utilizzata nella produzione di LED bianchi dal 1996.

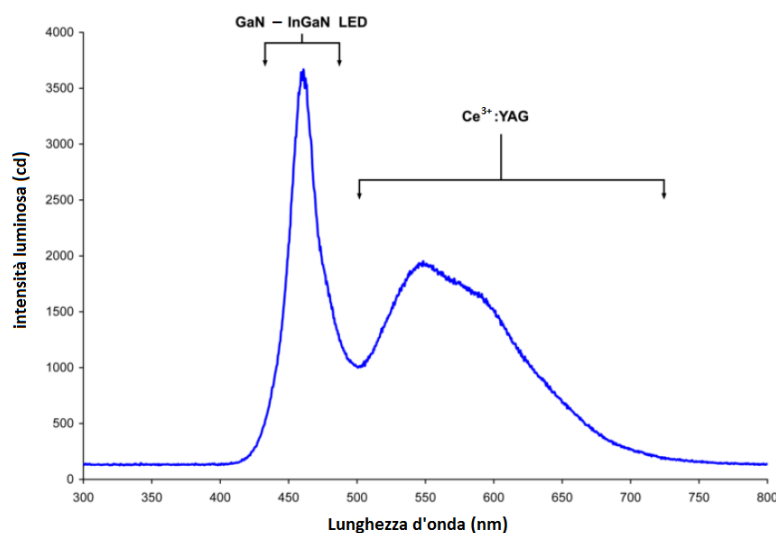


Figura 3 – Larghezza di banda della luce blu e gialla

Negli anni dieci del duemila, i LED bianchi sperimentali producevano 303 lumen per ogni W di corrente elettrica, con una durata anche di centomila ore.

Rispetto ad una lampada ad incandescenza, si ottenne quindi un sostanziale incremento dell'efficienza elettrica a parità di prezzo, a un costo inferiore.

Una tecnica alternativa per ottenere LED bianchi consiste nel ricoprire i LED che emettono nell'ultravioletto vicino (**NUV, Near Ultraviolet**) con una miscela ad alto rendimento di fosfori a base di europio (Eu), che emettono nel rosso e nel blu e di solfuro di zinco drogato con rame e alluminio, che emettono nel verde.

Il principio di funzionamento di tali LED è analogo a quello delle lampade fluorescenti, tuttavia, la luce ultravioletta causa la fotodegradazione dei materiali utilizzati nel package dei LED, riducendone la vita utile.

Inoltre, questa tecnica è meno efficiente di quella dei LED blu con fosfori Ce^{3+} :YAG, in quanto comporta un maggior sviluppo di calore, ma la luce generata presenta caratteristiche spettrali migliori.

La brillantezza dei due tipi di LED è all'incirca equivalente.

Una tecnica più recente prevede la produzione di LED a luce bianca senza impiego di fosfori, basandosi sulla crescita omoepitassiale di seleniuro di zinco (ZnSe) su un substrato dello stesso materiale, in grado di emettere simultaneamente luce blu dalla regione attiva e luce gialla dal substrato.