

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA



Sistemi di illuminazione LED

Relatore

Prof. Paolo Tenti

Laureando

Simone Carraro

Anno Accademico 2009/10

Indice

Sommario.....	7
Introduzione.....	9
1 Proprietà dei LED.....	11
1.1 Principio di funzionamento dei LED.....	11
1.2 La struttura del “die” o “chip” dei LED.....	13
1.3 Materiali utilizzati per la realizzazione del chip dei LED.....	14
1.4 Il package dei LED.....	15
1.5 Potenza ottica ed efficienza dei LED.....	18
1.6 Caratteristiche ottiche ed elettriche dei LED.....	19
1.7 Grandezze illuminotecniche.....	21
2 Alimentazione delle sorgenti LED.....	24
2.1 Regolatori lineari con alimentazione a tensione costante.....	24
2.1.1 Controllo passivo.....	25
2.1.2 Controllo attivo.....	26
2.2 Regolatori lineari con alimentazione a corrente costante.....	28
2.3 Regolatori switching.....	29
3 Dissipazione termica nei Power LED.....	32
4 Durata dei LED.....	36
5 I LED a luce bianca.....	40
5.1 Generazione tramite sorgenti bicromatiche.....	40
5.2 Generazione tramite sorgenti tricromatiche.....	43
5.3 Generazione tramite sorgenti tetra e pentacromatiche.....	46
5.4 LED a luce bianca basati sulla conversione di lunghezze d’onda e sull’utilizzo di fosfori.....	46
6 L’illuminazione tramite sorgenti LED a luce bianca.....	49
6.1 Le lampade a LED (caratteristiche elettriche e ottiche).....	49
6.2 Confronto energetico ed economico tra le lampade tradizionali e le lampade LED per l’illuminazione domestica.....	51
6.3 L’illuminazione stradale a LED.....	53
6.3.1 Proprietà delle comuni sorgenti di illuminazione stradale.....	53
6.3.2 Proprietà delle sorgenti di illuminazione stradale a LED.....	55
6.4 Confronto energetico ed economico tra le lampade tradizionali e le lampade LED per l’illuminazione stradale.....	60
7 Conclusioni in merito all’illuminazione a LED.....	62
Riferimenti.....	67

Sommario

Lo scopo di questa tesina è di analizzare le principali proprietà dei recenti sistemi di illuminazione a LED a luce bianca, quali struttura, caratteristiche elettriche ed illuminotecniche insieme alle soluzioni di alimentazione e problematiche di dissipazione termica e durata di funzionamento.

Vengono anche confrontate le varie tecnologie di illuminazione tradizionali e LED nell'ambito dell'illuminazione domestica e stradale, sottolineandone le proprietà positive e negative.

Introduzione

Con l'entrata in vigore del protocollo di Kyoto tutti i paesi aderenti, tra cui l'Italia, sono chiamati a ridurre drasticamente le emissioni di gas inquinanti nell'atmosfera. Questo obiettivo può essere raggiunto utilizzando fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico, eolico, biomassa), razionalizzando i consumi e l'utilizzo dei mezzi di trasporto.

Una via parallela a queste è quella dell'utilizzo di materiali e tecnologie innovative, ormai usciti dallo stadio di prototipo e già presenti sul mercato, che permettono una significativa riduzione dei consumi rispetto alle attuali tecnologie.

Dato che circa un quarto dell'energia elettrica mondiale viene utilizzata per l'illuminazione, un contributo importante a questo progetto è dato dalla recente introduzione della luce allo stato solido, generata da componenti ben conosciuti da tempo dall'elettronica e chiamati LED.

Oltre al loro principale mestiere di "spie" luminose, i LED sono considerati le lampadine del futuro. Basta guardarsi attorno per capire che questi dispositivi sono già ovunque e appaiono, oltre che nei display d'informazione, nelle luci semaforiche e nelle automobili, dove hanno permesso di eliminare lampadine, lenti e riflettori parabolici nelle luci posteriori.

Ricordando inoltre che nel marzo 2009 è stata adottata una decisione internazionale che prevede la graduale eliminazione delle lampade a incandescenza entro il 2012 e delle lampade alogene entro il 2016 e considerando il problema dello smaltimento dei materiali pericolosi (come il mercurio) contenuti anche nelle comuni lampade a risparmio energetico, si può ben capire come l'avanzata dei LED per l'illuminazione, chiamati Power LED, trovi terreno fertile.

I LED, infatti, consentono di risparmiare molta energia elettrica a parità di luce emessa rispetto a una normale lampada ad incandescenza e hanno una durata circa 10 volte superiore, offrendo livelli di rendimento sempre più elevati e un'estrema precisione nell'indirizzamento del flusso luminoso. Le soluzioni basate sui LED offrono la possibilità di variare l'intensità luminosa e gli effetti cromatici, fondamentali per un'illuminazione dinamica sia di interni che di esterni.

Diversamente dalle sorgenti luminose tradizionali, in molte applicazioni possono garantire una durata di oltre 10 anni. Poiché questi prodotti durano molto di più di una sorgente luminosa tradizionale non occorre sostituirli; in questo modo si riducono, se non addirittura si azzerano, i costi di manutenzione e quelli legati alla periodica sostituzione delle lampadine.

Come già accennato, la tecnologia a LED non è affatto nuova e, nel **primo capitolo**, ne viene analizzato il principio di funzionamento e la struttura, oltre alle caratteristiche elettriche ed illuminotecniche.

Nel **secondo capitolo** vengono trattate le varie soluzioni per l'alimentazione dei LED, partendo dai regolatori lineari per finire ai regolatori switching, illustrando caratteristiche vantaggi e svantaggi nonché la particolare applicazione sono utilizzati.

Nel **terzo e quarto capitolo** viene dato spazio a due argomenti molto correlati tra loro, come la dissipazione termica e la durata dei Power LED utilizzati nell'illuminazione, fornendo metodi di stima e soluzioni adottate dalla maggioranza delle industrie di produzione.

Nel **quinto capitolo** vengono analizzate in modo approfondito le tecniche di produzione di luce bianca da sorgenti LED bicromatiche, tricromatiche ed il metodo di conversione di lunghezze d'onda mediante l'utilizzo di fosfori. Per ogni tecnica vengono analizzate le diverse caratteristiche che la contraddistinguono e le qualità fotometriche della luce emessa.

Nel **sesto capitolo** vengono trattate le lampade a LED per l'illuminazione domestica e stradale con l'intento di fornire un quadro generale della situazione attuale della tecnologia LED nei due diversi campi; tramite confronti in termini sia energetici che economici si è cercato di analizzare pregi e difetti delle nuove lampade a LED rispetto alle tradizionali lampade per l'illuminazione.

Nel **settimo capitolo** si richiamano gli aspetti più rilevanti dell'illuminazione a LED, esponendo in maniera critica lo stato attuale della tecnologia e le prospettive future.

1. Proprietà dei LED

1.1 Principio di funzionamento dei LED

I LED in linea di principio sono costituiti da materiale semiconduttore con specifiche proprietà elettro-ottiche tali da permettere la conversione diretta dell'energia elettrica in luce.

Alla base del funzionamento dei LED c'è la giunzione PN; una particolare struttura che viene realizzata introducendo delle impurità nella struttura cristallina del wafer di semiconduttore di partenza, tali da variare le sue concentrazioni di atomi accettori N_A e donatori N_D .

Si ottiene un semiconduttore di tipo P, caratterizzato da una concentrazione di atomi $N_A > N_D$ drogando con sostanze trivalenti (gallio, boro, alluminio) il wafer di partenza; mentre si ottiene un semiconduttore di tipo N caratterizzato da una concentrazione di atomi $N_D > N_A$ introducendo sostanze pentavalenti (fosforo, arsenico, antimonio).

Unendo due parti dello stesso semiconduttore, uno drogato N e l'altro P, a temperatura ambiente, gli elettroni del semiconduttore di tipo N si diffondono nell'altro semiconduttore e viceversa per le lacune di quello di tipo P (Figura 1.1).

In tal modo, svuotandosi di portatori liberi la zona adiacente alla giunzione, si forma una regione di carica spaziale (SCR) in cui rimangono gli ioni donori e accettori legati al reticolo cristallino.

Questi ioni producono un campo elettrico che induce una corrente di drift, la quale tende a contrastare la corrente di diffusione dei portatori minoritari fino all'equilibrio termodinamico. Il campo elettrico costituito, induce un potenziale intrinseco che tende a confinare elettroni e lacune al di fuori della SCR; tale potenziale V_D (detto tensione di diffusione) è dato da:

$$V_D = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

dove N_A e N_D sono le concentrazioni degli atomi accettori e donatori, mentre n_i è la concentrazione intrinseca (densità degli elettroni liberi) del semiconduttore. Polarizzando direttamente la giunzione, cioè applicando una ddp positiva V tra regione P e N si abbassa la barriera di potenziale creata dalla SCR con una conseguente iniezione di portatori minoritari: elettroni dalla regione N alla P e lacune in senso opposto; ottenendo così un flusso di corrente (Figura 1.2). La caratteristica corrente - tensione (I-V) di una giunzione PN è data dalla formula:

$$I_D = I_s (e^{(qV/nKT)} - 1)$$

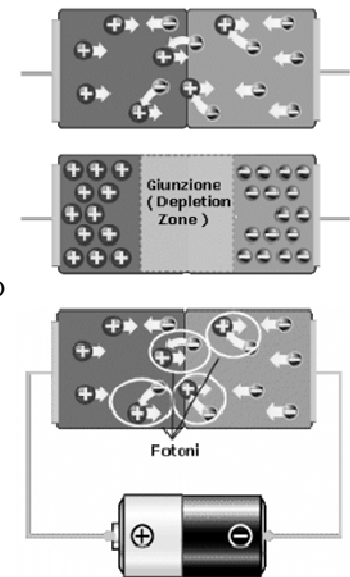


Figura 1.1: Giunzione PN all'equilibrio termodinamico e polarizzata direttamente

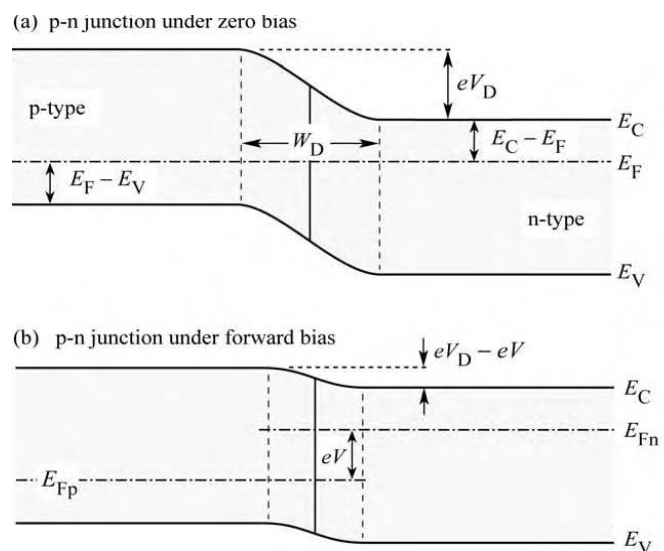


Figure 1.2: Giunzione PN: (a) non polarizzata e (b) polarizzata direttamente

dove I_s è la corrente di saturazione inversa del diodo, V è la tensione di polarizzazione applicata, q è la carica dell'elettrone ($1,60 \times 10^{-19}$ C) K è la costante di Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), n è il fattore di idealità che assume valore unitario per un diodo ideale.

Come si può intuire le caratteristiche della giunzione variano a seconda dei materiali utilizzati, in Figura 1.3, sono riportate caratteristiche (I-V) per diversi materiali alla temperatura di 295 K; mentre in Figura 1.4 ne è illustrata la relazione tra tensione di polarizzazione diretta ed energia di bandgap.

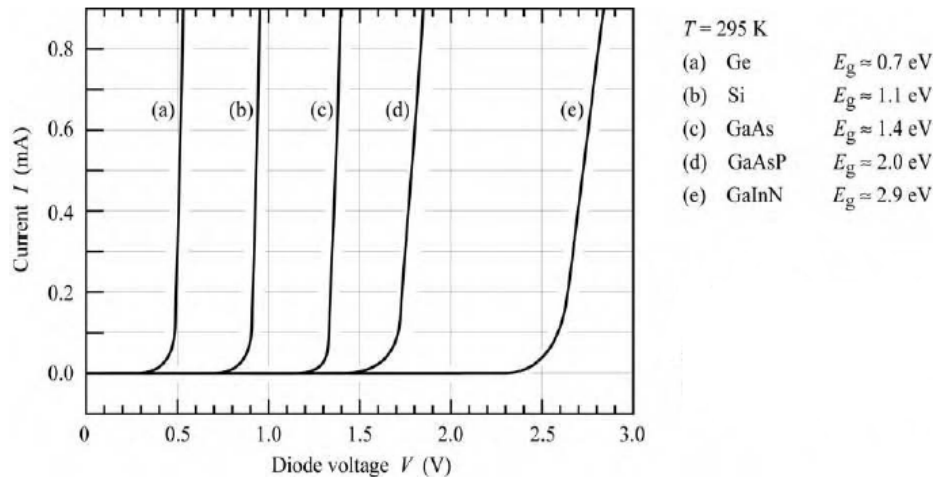


Figura 1.3: Caratteristica I-V a temperatura ambiente di giunzioni PN di diversi semiconduttori.

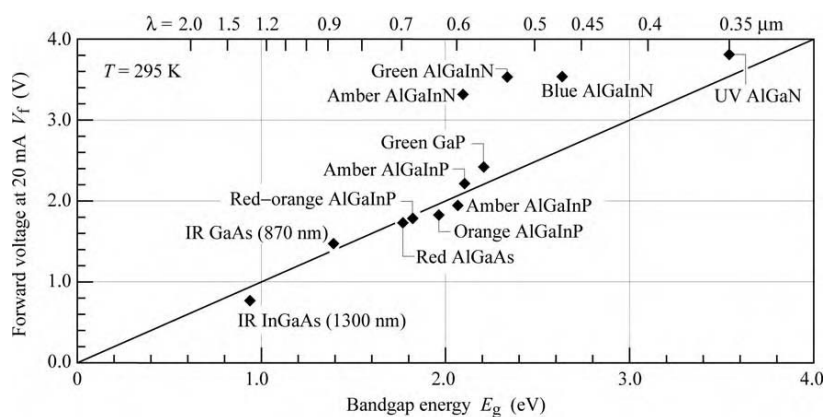


Figura 1.4: Tensione di polarizzazione diretta e energia di bandgap per LED di diversi materiali.

All'interno della giunzione avvengono continuamente fenomeni di generazione e di ricombinazione di coppie elettrone-lacuna.

Nella generazione, gli elettroni vengono promossi in banda di conduzione tramite iniezione di portatori o per illuminazione della giunzione (assorbimento), creando così una coppia elettrone-lacuna. In pratica, l'energia dei portatori iniettati nella giunzione permette agli elettroni di portarsi in banda di conduzione ad un livello energetico superiore lasciando in banda di valenza una lacuna.

La ricombinazione è il fenomeno fisico responsabile dell'emissione luminosa in seguito all'eliminazione di una coppia elettrone-lacuna. In questo caso l'elettrone in banda di conduzione torna in banda di valenza cedendo la sua energia sotto forma di un fotone (Figura 1.5). L'energia del fotone emesso è strettamente legata al materiale con cui è realizzato il semiconduttore e, idealmente, è pari al salto effettuato dall'elettrone (bandgap del semiconduttore):

$$E_f = h\nu = hc/\lambda$$

dove h è la costante di Plank ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) ν è la frequenza di radiazione, λ la lunghezza d'onda della radiazione e c la velocità della luce (3×10^8 m/s).

Come si può notare, la lunghezza d'onda della radiazione emessa dipende dal materiale utilizzato ed è strettamente dipendente dall'energia dell'elettrone emesso, causa per cui il LED idealmente emette luce monocromatica di lunghezza d'onda costante.

Nella realtà l'efficienza è ridotta perché non tutte le ricombinazioni elettrone-lacuna causano l'emissione di un fotone e lo spettro è allargato perché gli elettroni che si ricombinano non hanno tutti la stessa energia.

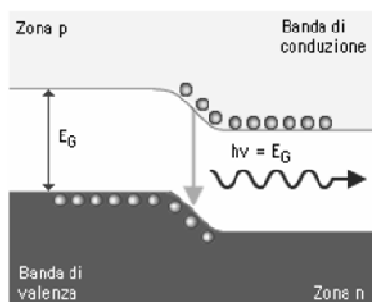


Figura 1.5: Processo di ricombinazione

1.2 La struttura del “die” o “chip” dei LED

Il wafer di semiconduttore su cui viene ricavata la giunzione prende il nome di "chip" o "die", la cui struttura può variare molto in base ai materiali usati e alla funzione che dovrà svolgere il LED; inoltre la zona del chip dove avviene l'emissione luminosa si chiama “zona attiva”.

I due substrati più utilizzati per la realizzazione dei LED sono carburo di silicio e zaffiro.

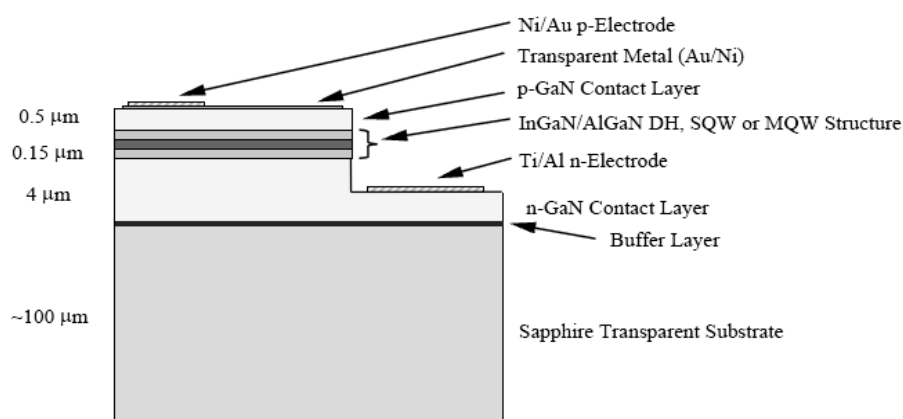


Figura 1.6: Schema del chip di un LED InGaN su substrato di zaffiro

Un LED costruito su zaffiro ha struttura orizzontale: i due contatti sono posti sulla faccia superiore del dispositivo e sopra il substrato è presente uno strato buffer, in genere GaN o AlGaIn con alluminio in bassa concentrazione. Di seguito c'è uno strato n-GaN piuttosto spesso e generalmente drogato con silicio, a cui segue la zona attiva composta di strati di InGaIn non drogato e strati di GaIn nel caso di LED in InGaIn (Figura 1.6). Sopra la zona attiva si trova uno strato di AlGaIn di tipo p ad alta concentrazione di alluminio con la funzione di confinare gli elettroni nella zona attiva. Infine è presente uno strato di GaIn di tipo p sul quale si pone il

contatto metallico. Il contatto può avere varie forme, e recentemente sono stati impiegati dei contatti speciali a griglia con lo scopo di distribuire meglio la corrente nel chip rendendo più uniforme la densità di corrente e sfruttando tutta la superficie della zona attiva. I contatti a griglia sono stati la soluzione adottata per alcuni anni al fine di massimizzare l'efficienza dei dispositivi, tuttavia la superficie occupata dalla metallizzazione non permetteva di ottimizzare l'estrazione della luce dal LED. Oggi con l'uso di strati conduttivi semitrasparenti si riesce ugualmente a distribuire la corrente su tutto il chip e si estrae più luce.

1.3 Materiali utilizzati per la realizzazione del chip dei LED

Come già accennato, la lunghezza d'onda della luce emessa dalla giunzione p-n dipende direttamente dal gap energetico del semiconduttore utilizzato. Questo significa che per produrre LED di vari colori è necessario utilizzare semiconduttori diversi.

Nella Tabella 1.7 sono riportati i materiali tipici utilizzati per ottenere diversi colori.

MATERIALE	COLORE LUCE EMESSA	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)
Gap, GaAlAs, GaAsP, InGaAlP, GaAs	ROSSO	λ : 625-740
InGaAlP, GaAs, GaAsP, GaP	ARANCIO	λ : 590-625
InGaAlP, GaAs, GaAsP, GaP	GIALLO	λ : 565-590
InGaAlP, GaAs, GaP, InGaN	VERDE	λ : 520-565
InGaN	BLU	λ : 435-520

Tabella 1.7

Nello spettro della luce visibile, compreso tra 380 e 740 nm, tra i colori tipici di luce emessa da un LED vi sono il rosso, l'arancio, il giallo ed il verde. Attualmente è stata posta grande attenzione ai LED bianchi a causa del loro uso massiccio nel settore dell'illuminazione. In base alla relazione $\lambda=hc/E$ si può notare che la lunghezza d'onda delle radiazioni emesse è inversamente proporzionale al bandgap del semiconduttore utilizzato. Si ha quindi che a bandgap bassi (silicio e germanio) corrispondono lunghezze d'onda alte nella zona dell'infrarosso; a bandgap alti invece, corrispondono lunghezze d'onda basse nella zona dell'ultravioletto.

Per riuscire ad ottenere lunghezze d'onda tali che la radiazione elettromagnetica diventi luce visibile, è necessario quindi realizzare giunzioni fatte di semiconduttori aventi bandgap maggiore per esempio di quello del silicio. A tale scopo fu introdotto l'arseniuro di gallio, il primo semiconduttore sintetico usato per realizzare i LED "storici" a luce rossa; tale semiconduttore è un composto ottenuto da arsenico e gallio (rispettivamente pentavalente e trivalente) che viene poi drogato da un lato con impurezze trivalenti per realizzare la regione P e dall'altro con elementi pentavalenti per ricavare la zona N. Si ottiene così un diodo con tensione di soglia più alta di quella di silicio e germanio, tale da emettere, in conduzione, una radiazione luminosa visibile rossa, poco sotto i 680 nm.

Da qui ci fu un processo di differenziazione della luce emessa, a partire dall'arancione giallo

verde blu e recentemente luce bianca grazie all'introduzione di svariate miscele di elementi trivalenti e pentavalenti in proporzioni capaci di determinare ognuna un certo colore.

I composti usati sono sostanzialmente i seguenti:

Arseniuro di gallio (GaAs): LED a luce rossa scura.

Arseniuro di gallio e alluminio (GaAlAs): LED a luce rossa in varie tonalità, dal più scuro al più vivo.

Fosforo e arseniuro di gallio (GaAsP): LED a luce arancione e gialla.

Fosforo di gallio e alluminio (GaAlP): LED a luce verde.

Nitrato di gallio (GaN): LED a luce verde scuro e blu.

Nitrato di gallio e indio (In-GaN): LED a luce blu e bianca.

Seleniuro di zinco (ZnSe): LED blu.

Carburo di silicio (SiC): LED a luce blu e bianca.

Particolare attenzione la meritano i LED bianchi, che sono ottenuti usando come base i diodi a luce blu e inserendo nella struttura che li compone uno strato di materiale (fosfori) in grado di convertire l'emissione blu in luce bianca; infatti è praticamente impensabile produrre luce bianca con una semplice giunzione, in quanto essa è la somma di tutti i colori. Quindi il bianco si può ottenere anche con LED tricolori (RGB) che contengono tre giunzioni (una che fa il rosso, una che fa il verde e l'altra che emette luce blu).

1.4 Il package dei LED

Il wafer di semiconduttore su cui viene ricavata la giunzione (die) è inservibile ai fini dell'emissione luminosa in quanto necessita di un "involucro" esterno fornito degli appositi elementi elettrici e ottici. Tutti i LED, quindi, sono montati in un involucro detto "package" che fornisce due contatti elettrici (anodo e catodo), degli elementi ottici in grado di dirigere il flusso luminoso in una ben determinata direzione e nel caso dei Power Led di un sistema di dissipazione termica. Il materiale d'incapsulamento, oltre ad essere ermetico e inerte, possiede un'alta trasparenza ottica, un alto indice di rifrazione e stabilità a temperature elevate.

Il package di un tipico LED a bassa potenza è raffigurato in Figura 1.8. Il chip è posizionato all'interno di una specie di "tazza" riflettente che ha il compito di riflettere e rifrangere le radiazioni luminose in modo che quest'ultime siano concentrate nell'emisfero superiore dello spazio che circonda il LED.

La tazza provvede anche a collegare il chip ad uno dei terminali elettrici (solitamente il catodo),

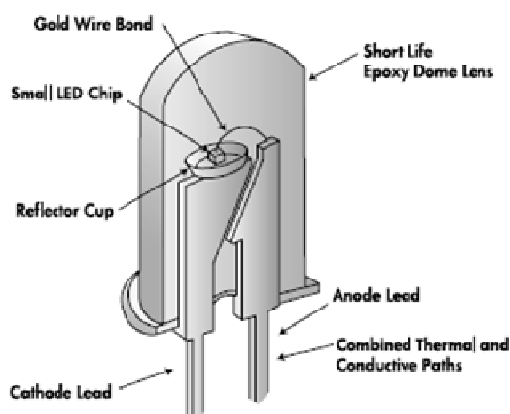


Figura 1.8: Package di un tipico LED a bassa potenza

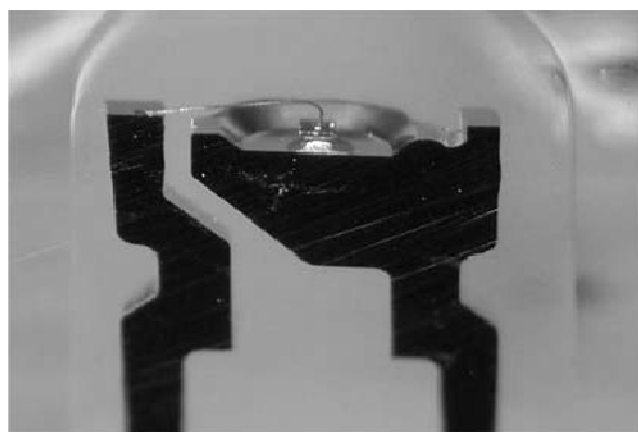


Figura 1.9: Particolare del collegamento del chip ai terminali.

mentre il collegamento all'anodo viene effettuato tramite un sottile filo d'oro (Figura 1.9).

Il package di un Power Led (Figura 1.10), a differenza degli usuali package per LED a bassa potenza, presenta un percorso termico diretto dal chip al dissipatore di calore diviso dal percorso elettrico.

Il chip del LED è collegato ad un dissipatore a piastrina metallica con resistività termica bassa che fornisce il percorso termico primario; mentre i collegamenti ad anodo e catodo avvengono sempre attraverso due sottili fili d'oro.

Una lente per temperature elevate è collegata alla custodia in materiale plastico, mentre l'interstizio fra il chip del LED e la lente viene riempito con una capsula in silicone.

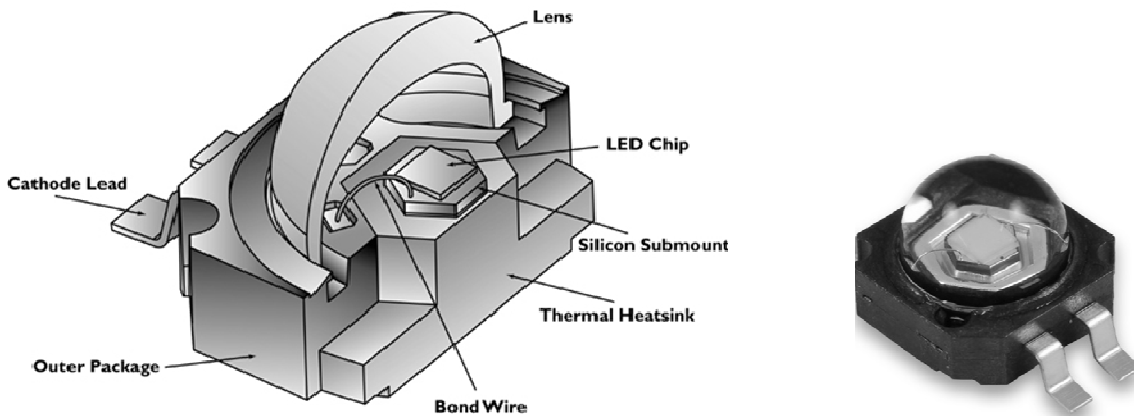


Figura 1.10: Package di un Power Led

Integrato nel chip è presente anche un sistema di protezione contro le scariche elettrostatiche (ESD), le quali rappresentano una causa di guasto rilevante in apparecchiature elettroniche e optoelettroniche.

Per esempio si consideri che una carica $+Q$ sia messa in contatto con uno degli elettrodi del diodo e che venga scaricata uniformemente in un tempo Δt , causando il passaggio attraverso il dispositivo di una corrente pari a $I = +Q / \Delta t$.

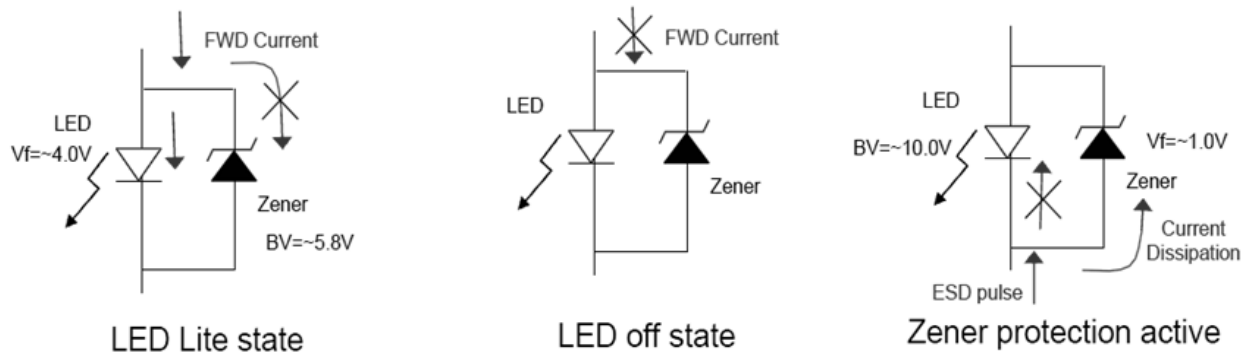
Se la carica è in contatto con il catodo il diodo risulta in polarizzazione inversa presentando una resistenza R_p di valore molto elevato rispetto alla condizione di polarizzazione diretta.

La corrente di scarica circolando attraverso la resistenza R_p dissipa nel dispositivo una potenza pari a $I^2 R_p \Delta t$.

Se invece la carica è in contatto con l'anodo il diodo risulta in polarizzazione diretta, caratterizzato da una resistenza R_s la quale causa una dissipazione di potenza nel dispositivo pari a $I^2 R_s \Delta t$.

Essendo $R_p \gg R_s$, si conclude che la potenza dissipata nel dispositivo in condizioni di polarizzazione indiretta è molto maggiore rispetto alla condizione di polarizzazione diretta, fatto che rappresenta un pericolo per il funzionamento del dispositivo.

Circuiti di protezione contro ESD possono essere costituiti da un diodo Zener che permette il flusso di corrente nel LED in condizioni di polarizzazione diretta, mentre in polarizzazione indiretta la corrente inversa attraversa il diodo Zener invece che il LED proteggendo quest'ultimo.



La resistenza termica del package del LED insieme alla temperatura massima di funzionamento determina la massima potenza che può essere dissipata nel package stesso.

La massima temperatura di funzionamento può essere determinata dalle considerazioni di affidabilità, dalla degradazione dell'incapsulamento e dalle considerazioni in materia di efficienza quantica interna.

Dalla figura 1.11 si può vedere che i primi package introdotti verso la fine degli anni 60 ed ancora usati ora per i LED a bassa potenza, hanno un'alta resistenza termica di circa 250 K/W, usando dei dissipatori fatti di Al o Cu si può arrivare a delle resistenze termiche di 6-12 K/W. Attualmente si è arrivati a resistenze termiche < 5 K/W e si conta di proseguire in tale strada realizzando package avanzati, fermo restando che l'idea di fondo è di non usare sistemi di raffreddamento attivi (ad esempio ventole), i quali pur avendo resistenze termiche < 0.5 K/W, andrebbero a ridurre l'efficienza in potenza dei sistemi d'illuminazione LED.

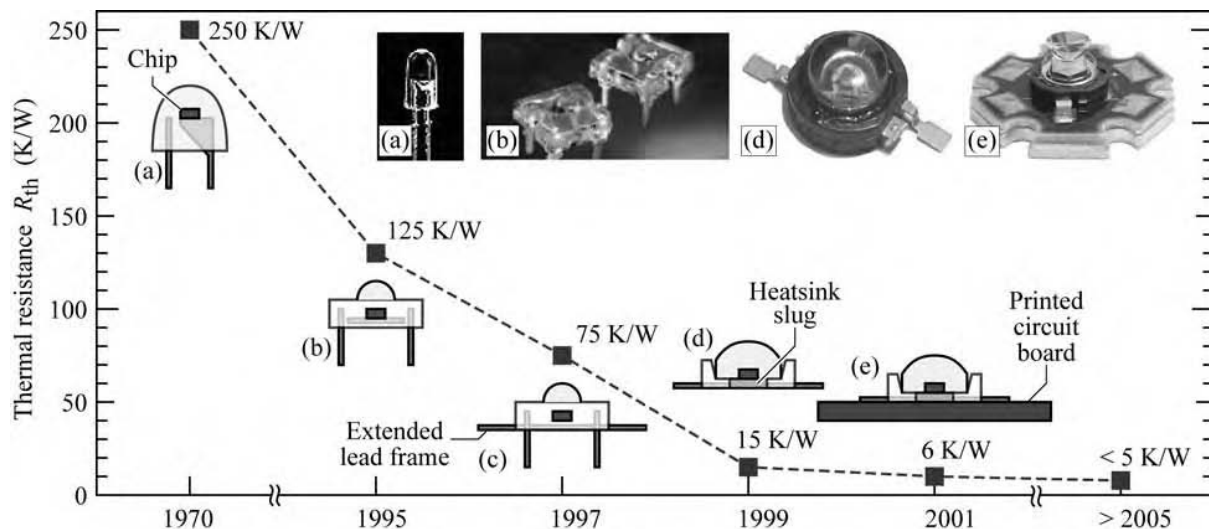


Figura 1.11: Resistenze termiche di diversi tipi di package.

1.5 Potenza ottica ed efficienza dei LED

La potenza ottica emessa da un LED può essere definita come il numero di fotoni emessi al secondo moltiplicato per la loro energia $h\nu$.

In condizioni ideali la regione attiva di un LED emette un fotone per ogni elettrone iniettato; si ha quindi un'efficienza quantica interna η_{int} unitaria.

L'efficienza quantica interna è definita come il rapporto tra il numero dei fotoni emessi dalla regione attiva in un secondo e il numero degli elettroni iniettati nel LED in un secondo:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{number of photons emitted from active region per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}}$$

ricordando che l'energia di ogni fotone è pari a $h\nu$:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{number of photons emitted from active region per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P_{\text{int}}/(h\nu)}{I/e}$$

dove P_{int} è la potenza ottica emessa, I è la corrente d'iniezione ed e è la carica dell'elettrone.

Facendo sempre riferimento ad un LED ideale si parla di efficienza di estrazione $\eta_{\text{extraction}}$ per esprimere il fatto che tutti i fotoni emessi dalla zona attiva raggiungono lo spazio aperto:

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of photons emitted from active region per second}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)}$$

dove P è la potenza ottica emessa in spazio aperto.

In un LED reale, come si può ben intuire, non tutti i fotoni emessi dalla regione attiva riescono a raggiungere lo spazio aperto; a causa di fenomeni di assorbimento interni (i fotoni emessi possono venire riassorbiti dal substrato) oppure in seguito a fenomeni di riflessione interna. Si può ora definire l'efficienza quantica esterna come il rapporto tra il numero di fotoni emessi nello spazio aperto in un secondo e il numero di elettroni iniettati nel LED in un secondo:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P/(h\nu)}{I/e} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}}$$

Infine l'efficienza in potenza è data da:

$$\eta_{\text{power}} = \frac{P}{IV}$$

definita come il rapporto tra la potenza ottica e la potenza elettrica fornita al LED.

1.6 Caratteristiche ottiche ed elettriche dei LED

In Figura 1.12 sono confrontabili gli spettri delle emissioni ottiche di diversi LED: un rosso AlGaInP, un verde GaInN e un blu GaInN. Paragonandoli si vede che il LED verde ha uno spettro di emissione più largo sia del LED blu, sia di quello rosso, a causa dei limiti tecnologici nella fabbricazione di substrati di GaInN ricchi di Indio. Inoltre difetti nel materiale semiconduttore, ad esempio delle fluttuazioni casuali nella composizione chimica della zona attiva, portano a un allargamento dello spettro.

In Figura 1.13 è riportato invece il grafico dell'intensità luminosa in funzione della corrente iniettata per gli stessi tre LED; in un LED ideale la caratteristica dovrebbe essere lineare con pendenza unitaria (in condizioni di bassa iniezione di portatori) come indicato dalla linea tratteggiata sul grafico. Il LED rosso AlGaInP ha una caratteristica con pendenza molto vicina a quella ideale mentre i LED GaInN hanno caratteristiche poco lineari e con pendenze decisamente inferiori a uno. In particolare il LED verde è quello che più si allontana dalle condizioni ideali a confermare il fatto che il materiale GaInN è di qualità troppo bassa in particolare con alte concentrazioni di Indio.

La dipendenza della potenza ottica emessa dalla temperatura è mostrata in Figura 1.14. Si nota che la potenza ottica ha una dipendenza dalla temperatura molto meno marcata nei LED GaInN rispetto al LED AlGaInP. Questo è conseguenza di due fatti: in primo luogo, la barriera di potenziale che confina i portatori è più alta nei sistemi basati su GaInN/GaN e quindi l'effetto della diminuzione del band gap a causa dell'aumento di

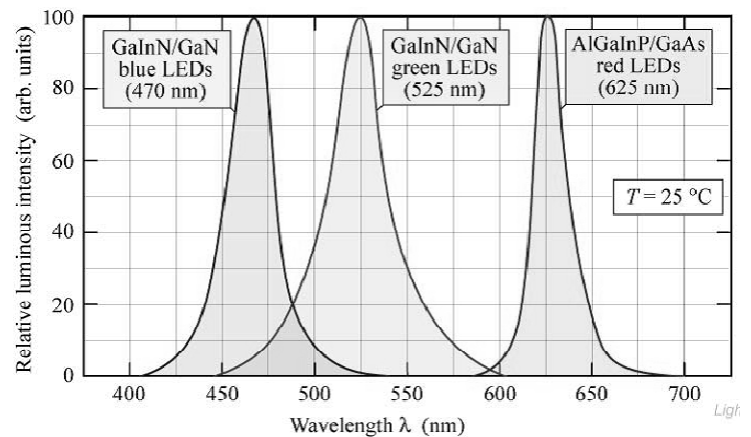


Figura 1.12: Spettro di emissione di LED blu, verdi e rossi a temperatura ambiente (25°C)

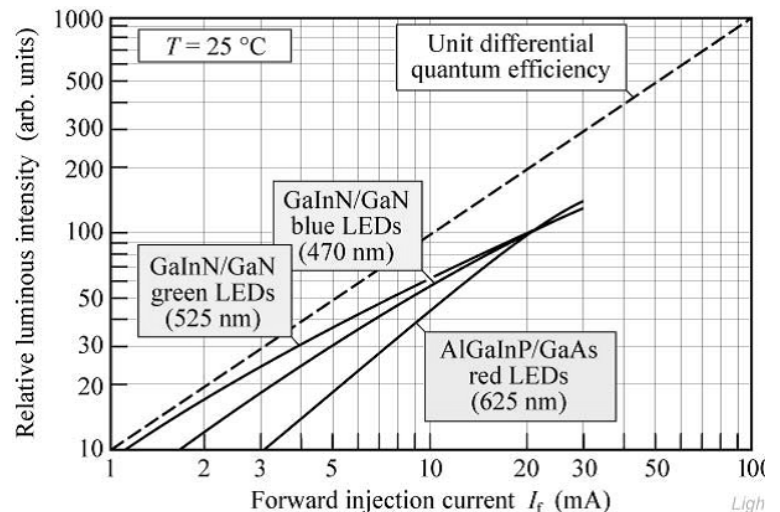


Figura 1.13: Andamento dell'intensità luminosa in funzione della corrente di iniezione a temperatura ambiente (25°C)

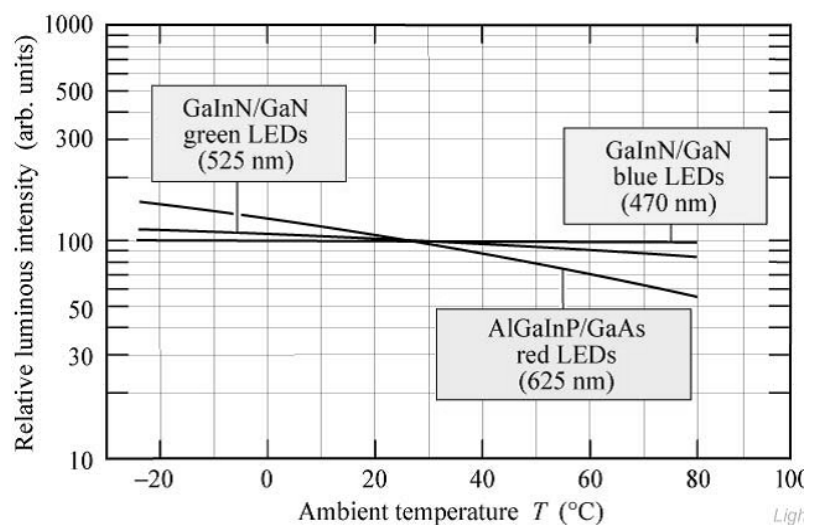


Figura 1.14: Andamento della potenza ottica in funzione della temperatura ambiente

temperatura è meno marcato; in secondo luogo, l'AlGaInP con l'aumentare della temperatura è caratterizzato dall'aumento dei fenomeni di ricombinazione non radiativa (fenomeni con assenza di emissione di fotoni) che ne diminuiscono l'efficienza radiativa.

La Figura 1.15 mostra la caratteristica corrente - tensione (I-V) di tre LED polarizzati direttamente: GaInN blu, GaInN verde e AlGaInP rosso. Si nota come la tensione diretta a cui il diodo comincia a condurre aumenta all'aumentare dell'energia di emissione, cioè è più alta per i LED che emettono su lunghezze d'onda inferiori.

La Figura 1.16 mostra la dipendenza dalla temperatura della tensione a una corrente iniettata di 30 mA. Per tutti i diodi la tensione diretta decresce all'aumentare della temperatura e la causa è il calo dell'energy gap.

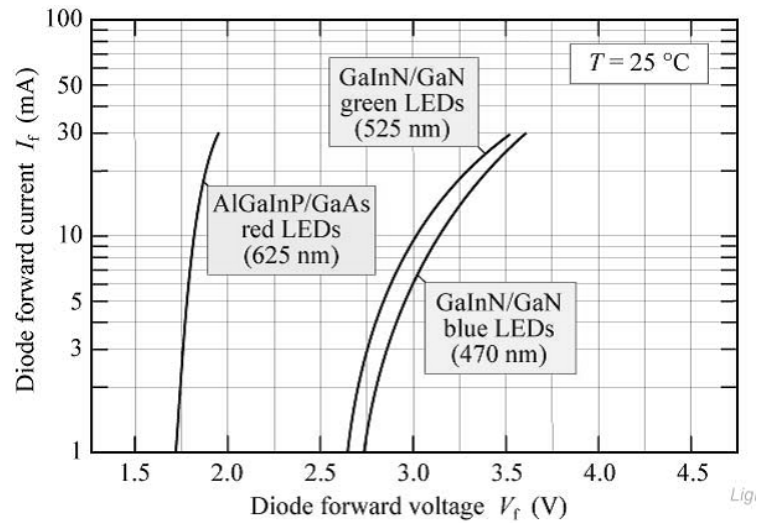


Figura 1.15: Andamento della caratteristica I-V di LED blu, verde, rosso a temperatura ambiente (25°C)

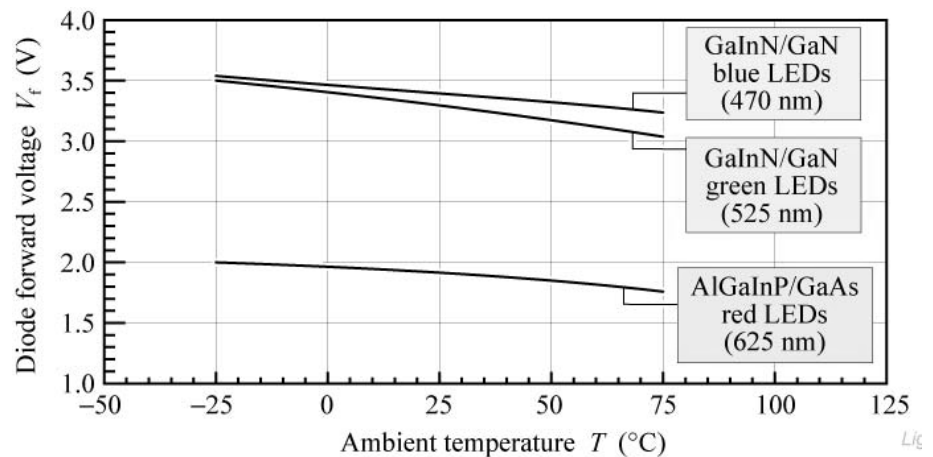


Figura 1.16: Andamento della tensione di polarizzazione in funzione della temperatura a corrente costante di 30mA

1.7 Grandezze illuminotecniche

L'occhio umano è in grado di percepire radiazioni luminose con lunghezze d'onda comprese tra circa 390 nm e 730 nm. All'interno di questa banda però la sensibilità non è costante ma ha un andamento approssimativamente a campana con picco intorno ai 555 nm (regione del verde) come illustrato nella Figura 1.17; che rappresenta l'andamento della curva di sensibilità dell'occhio in funzione della lunghezza d'onda λ ; emanato dal CIE (Commission Internationale de l'Eclairage).

L'andamento non costante della curva di sensibilità porta a percepire maggiormente colori nella zona centrale come il verde rispetto a colori ai bordi come il viola o il rosso a parità di potenza ottica.

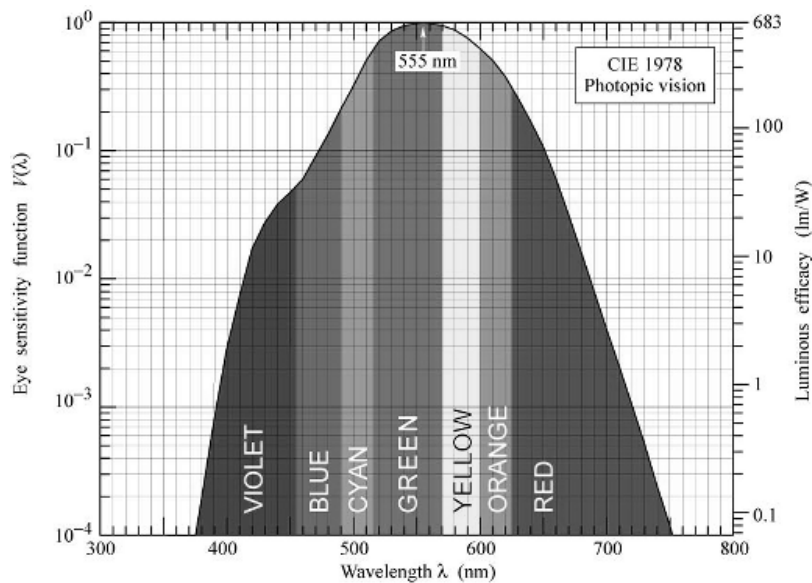


Figura 1.17: Curva della sensibilità dell'occhio in funzione della lunghezza d'onda

L'unità fotometrica "storica" per esprimere l'intensità luminosa è la *candela* (cd): 1 cd è l'intensità luminosa di una sorgente monocromatica con picco a 555 nm che emette con potenza ottica di (1/683) W in un angolo solido di 1 steradiante.

Un'altra unità che misura il flusso luminoso è il *lumen* (lm): una sorgente con intensità luminosa di 1 cd che emette in un angolo di 1 steradiante produce un flusso luminoso di 1 lm.

L'illuminamento caratterizza l'illuminazione degli ambienti (unità di misura lux) ed è così definito: una superficie pari a 1 m² che riceve un flusso luminoso di 1 lm ha un illuminamento di 1 lux. Il lux si può esprimere quindi anche in lm/m² (Figura 1.18).

La luminanza di un LED è definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa in una certa direzione (misurata in cd) divisa per l'area del chip proiettata in quella direzione.

La luminanza si misura in cd/cm² e da un'idea di quanto efficientemente l'area del chip è utilizzata per ottenere, fissata la corrente di iniezione, una certa intensità luminosa.

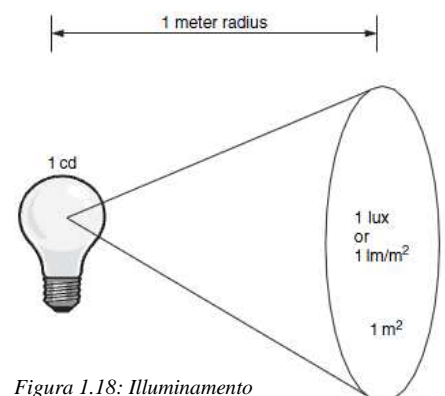


Figura 1.18: Illuminamento

L'efficacia luminosa della radiazione ottica che rappresenta l'efficienza nella conversione da potenza ottica (P) a flusso luminoso (Φ_{lum}) è così definita:

$$\text{Efficacia luminosa} = \frac{\Phi_{\text{lum}}}{P} \text{ [lm/W]}$$

Per valutare l'efficienza di un dispositivo si usa l'efficienza luminosa:

$$\text{Efficienza luminosa} = \frac{\Phi_{\text{lum}}}{IV} \text{ [lm/W]}$$

dove a denominatore si ha la potenza elettrica fornita al dispositivo.

Dato che la sensibilità dell'occhio umano è un parametro estremamente soggettivo, soprattutto per quanto riguarda la percezione del colore, la CIE ha emanato uno standard che stabilisce delle curve di sensibilità al rosso $x(\lambda)$, al verde $y(\lambda)$ e al blu $z(\lambda)$, dove la curva relativa al verde coincide con la curva di sensibilità totale (Figura 1.19).

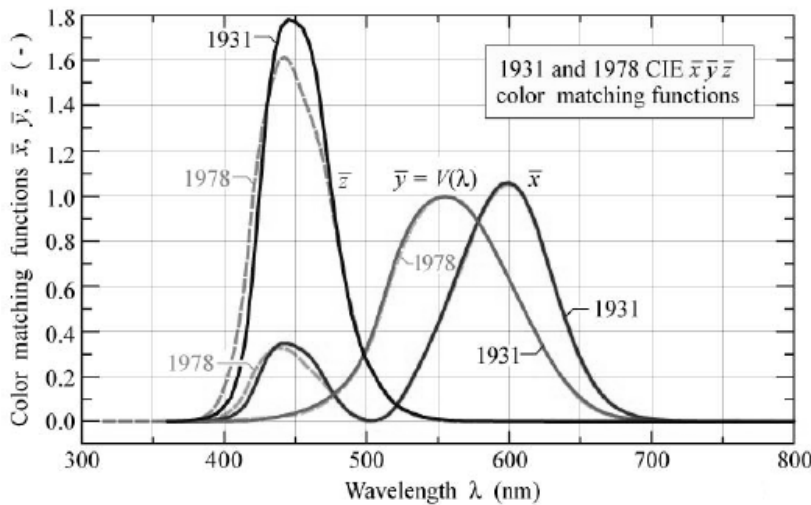


Figura 1.19: Curve di sensibilità CIE a radiazioni blu, verde, rossa

Da queste curve si possono ottenere i livelli di stimolo ai tre colori nota la potenza ottica $P(\lambda)$:

$$X = \int \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad Y = \int \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad Z = \int \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

livelli che servono anche ad identificare le coordinate cromatiche all'interno del diagramma cromatico:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = 1-x-y$$

Tramite queste coordinate tutti i colori sono individuabili; ad esempio come illustrato in Figura 1.20 il celeste a 490 nm avrà coordinate (0.05;0.3;0).

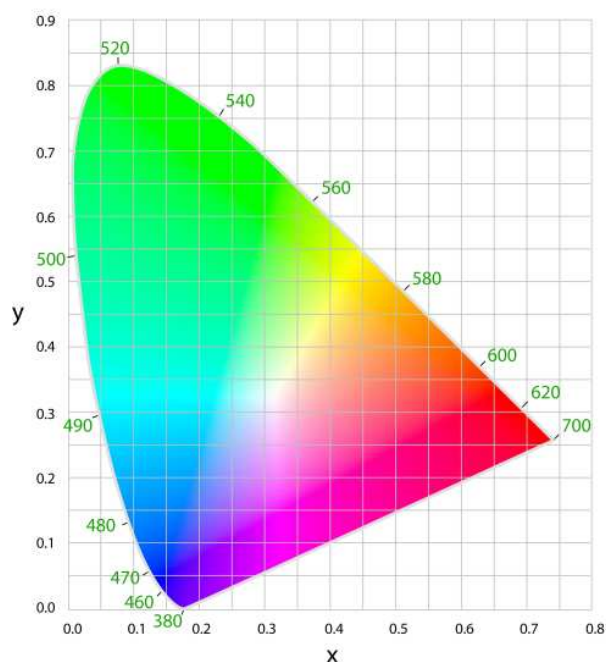


Figura 1.20: Diagramma cromatico

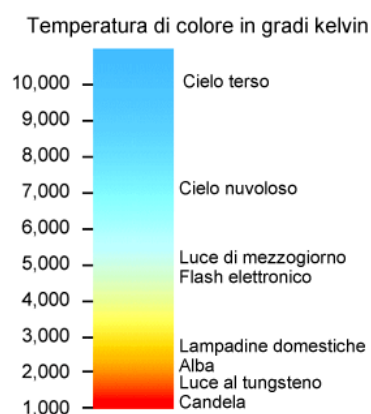


Figura 1.21: Temperature di colore di varie sorgenti luminose

La combinazione o il mix di due o più sorgenti luminose è usata in molte applicazioni, ad esempio (come si vedrà nei prossimi capitoli), per produrre luce bianca.

Come si può notare, nella parte centrale del diagramma di cromaticità c'è il bianco, che può assumere vari livelli a seconda delle intensità delle sorgenti luminose combinate.

Il bianco è più puro in modo proporzionale a quanti più colori partecipano alla sua formazione dando uno spettro piatto su tutta la banda del visibile.

Per individuare tutti i possibili livelli di bianco si utilizza il concetto di temperatura di colore; più alta è la temperatura di colore di una sorgente, tanto più prossima sarà al colore bianco, prendendo come paragone la luce del sole. Alcuni esempi: una lampadina a filamento ha una temperatura di colore di 2856 K, una sorgente alogena 2800-3200K, il sole a mezzogiorno 5000 K (Figura 1.21).

Per poter caratterizzare la qualità di una sorgente si è definito il CRI (Color Rendering Index), figura di merito assegnata alle varie fonti luminose e normalizzata a 100 sulla luce del giorno. Più il CRI di una sorgente si avvicina a 100 più questa riproduce fedelmente la radiazione solare. La luce bianca ottenuta mediante lampade a incandescenza ha CRI prossimo a 100, quella ottenuta con lampade a fluorescenza ha invece CRI circa pari a 60, mentre come si vedrà in seguito i LED permettono di generare luce bianca con CRI vicino a 80.

2. Alimentazione delle sorgenti LED

Un LED, all'interno di un circuito si comporta come un carico a tensione costante, il cui valore dipende dal materiale e dalla temperatura a cui si trova il dispositivo.

Il materiale semiconduttore di cui è costituito il LED non è un conduttore perfetto e quindi presenta una resistenza intrinseca che viene modellata come una resistenza ESR (equivalent series resistance) addizionale posta in serie al diodo di valore inversamente proporzionale alla corrente di pilotaggio del LED.

Fondamentalmente ci sono due metodi per pilotare un LED o un'array di LED: il primo fa uso di regolatori lineari in grado di variare all'occorrenza la tensione e la corrente della sorgente di alimentazione mentre il secondo metodo si basa sull'utilizzo di regolatori switching.

2.1 Regolatori lineari con alimentazione a tensione costante

Pilotare un carico a tensione costante come un LED attraverso una sorgente a tensione costante è molto difficile, dato che l'unica differenza fra le due tensioni è la caduta di potenziale sulla resistenza ESR. Nel caso l'ESR sia di valore molto basso le due tensioni (fornita e assorbita) risultano quasi equivalenti, in modo che una leggera variazione di una delle due tensioni causa un'alta variazione nel valore della corrente come illustrato in Figura 2.1.

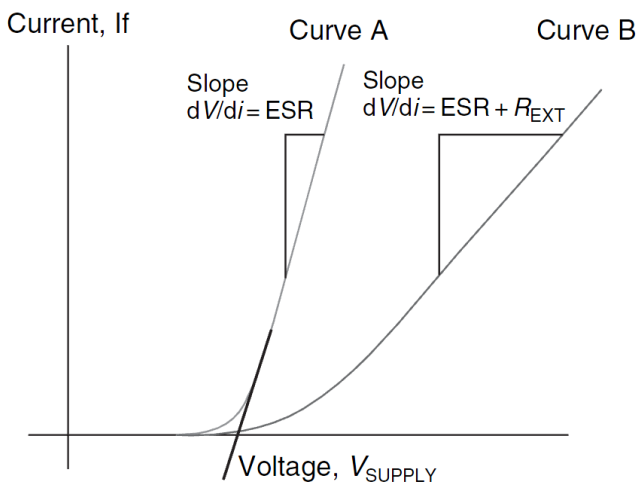


Figura 2.1: Andamento della corrente del LED in funzione della tensione di alimentazione

Supponendo che siano conosciute la variazione della tensione V_{SOURCE} e la tensione V_F la conseguente variazione di corrente può essere calcolata.

Va ricordato che la tensione V_F del LED è soggetta a tolleranze di fabbricazione ed è dipendente dalla temperatura di funzionamento, inoltre il generatore di tensione in genere ha una tolleranza del 5% che può salire a valori maggiori per alimentatori non stabilizzati.

Assumendo che il valore della resistenza ESR sia costante si ha:

$$I_{MIN} = \frac{V_{SOURCE_MIN} - V_{F_MAX}}{ESR}$$

$$I_{MAX} = \frac{V_{SOURCE_MAX} - V_{F_MIN}}{ESR}$$

Come si può vedere dalle formule se c'è una forte differenza fra le tensioni V_F e V_{SOURCE} e se il valore della resistenza ESR è elevato le correnti I_{MIN} e I_{MAX} del diodo assumono valori vicini, situazione che può essere sufficiente per pilotare un LED con correnti fino a 50 mA.

Tuttavia, nel caso dei Power LED una elevata caduta di tensione nella ESR è inaccettabile, renderebbe il dispositivo totalmente inefficiente e genererebbe dei problemi di dissipazione termica.

E' da dire che il valore dell'ESR cala con l'aumentare della potenza del LED, per esempio un LED standard da 20mA ha un ESR di 20Ω, mentre un LED con una corrente di 350mA tipicamente ha una ESR di 1-2Ω.

Da notare che in un Power LED la variazione di 1V nella tensione di alimentazione può voler dire un aumento della corrente di 1A, (proporzionalmente la stessa situazione si presenta per LED standard a bassa corrente); per tal motivo è necessario introdurre un sistema di controllo della corrente.

Principalmente ci sono due metodi per controllare il flusso di corrente in un sistema di illuminazione LED alimentato da un generatore a tensione costante: il controllo passivo e quello attivo.

2.1.1 Controllo passivo

Osservando la Figura 2.1 si può notare che mentre l'aumento della tensione V_F sposta la curva del grafico verso destra, la pendenza della curva è dovuta unicamente al valore della resistenza ESR: maggiore è il valore di quest'ultima minore sarà la pendenza della curva e quindi minore sarà la variazione di corrente a parità di variazione di V_F .

Per LED con correnti deboli una resistenza anche di valore elevato, posta in serie agli stessi, può essere utile per diminuire la pendenza della curva nel grafico I-V e quindi la variazione di corrente in seguito ad una variazione del valore di V_F .

Come fatto in precedenza è possibile calcolare i valori di I_{MIN} e I_{MAX} di un LED alimentato a tensione costante questa volta però con l'aggiunta di una resistenza in serie R_{EXT} di valore noto. Nelle equazioni sotto, la tensione del carico V_{LOAD} comprende la caduta di potenziale nella resistenza ESR.

$$I_{MIN} = \frac{V_{SOURCE_MIN} - V_{LOAD_MAX}}{R_{EXT}}$$

$$I_{MAX} = \frac{V_{SOURCE_MAX} - V_{LOAD_MIN}}{R_{EXT}}$$

Generalmente nei sistemi di illuminazione sono necessari più LED per fornire un fascio di luce sufficiente.

Un collegamento tipico è l'array, costituito da stringhe di serie di LED collegate in parallelo, aventi perciò tra loro la stessa tensione di alimentazione.

Tuttavia, a causa delle variazioni nella tensione di soglia V_F di ogni LED in seguito a variazioni di temperatura e difetti di fabbricazione, la tensione totale di ogni stringa differisce da quella delle altre stringhe, inoltre, per assicurare un flusso luminoso omogeneo e uniforme è necessario che ogni stringa di LED sia attraversata dalla stessa corrente.

Per assicurare tali condizioni, il metodo più semplice è quello di connettere una resistenza esterna in serie ad ogni stringa e di alimentare tutte le stringhe con un'unica sorgente di tensione costante.

Questo metodo anche se economico richiede una sorgente di tensione costante molto stabile, inoltre è molto inefficiente a causa dell'alto consumo di potenza e conseguente dissipazione di calore nelle resistenze aggiunte.

2.1.2 Controllo attivo

Come detto in precedenza il controllo di corrente passivo tramite l'introduzione di resistenze esterne non è una buona tecnica, specialmente quando la sorgente di alimentazione ha una grande tolleranza; in tali casi si fa uso del controllo di corrente attivo.

Il controllo di corrente attivo usa dei transistor e delle catene di feedback per mettere in atto la regolazione.

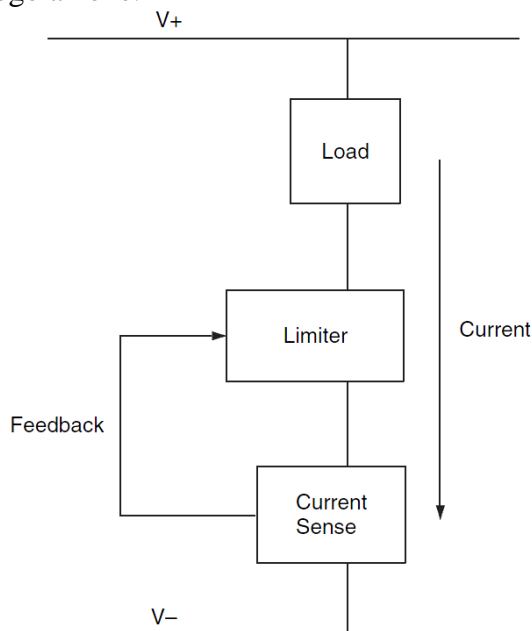


Figura 2.2: Controllo di corrente attivo

Un limitatore di corrente è composto da un dispositivo di regolazione solitamente MOSFET o BJT, una resistenza di valore opportuno che funge da sensore di corrente e una catena di feedback (con o senza guadagno) dal sensore di corrente al dispositivo di regolazione (Figura 2.2).

Il limitatore di corrente più semplice è costituito da un MOSFET a svuotamento.

Il flusso di corrente tra il source e il drain è controllato dalla tensione presente tra gate e source; con tensioni $V_{gs} \geq V_{TH}$ il transistor è acceso e conduce, mentre per tensioni $V_{gs} < V_{TH}$ il transistor commuta nello stato OFF (Figura 2.3).

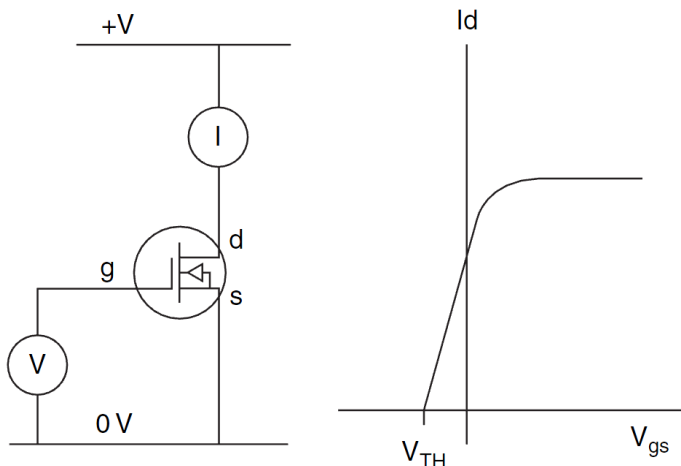


Figura 2.3: Mosfet a svuotamento e relativa caratteristica

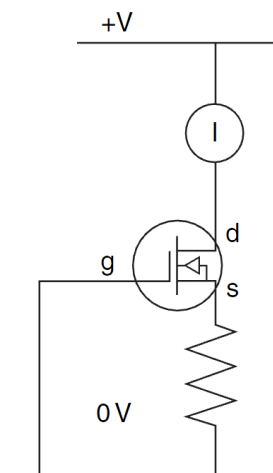


Figura 2.4: Limitatore di corrente a mosfet

La Figura 2.4 mostra un circuito di limitazione di corrente costituito con un MOSFET a svuotamento e un resistore che funge da sensore di corrente.

All'aumentare della corrente I_R che attraversa la resistenza aumenta la tensione V_R ; la tensione $V_{GS} = V_G - V_R$ diventa negativa fino a raggiungere il valore di pinch-off del transistor che ne causa lo spegnimento.

Lo svantaggio principale nell'uso dei MOSFET a svuotamento sta nel fatto che la tensione di pinch-off a causa di difetti di fabbricazione è molto variabile. Per esempio un MOSFET con V_{th} tipico di $-2.5V$ avrà un range di soglia tra $-1.5V$ e $-3.5V$.

Per ottenere una regolazione più efficiente ed accurata si ricorre ad un limitatore di corrente integrato, che consiste nel porre al posto del MOSFET un regolatore di tensione LM317 come illustrato in Figura 2.5 .

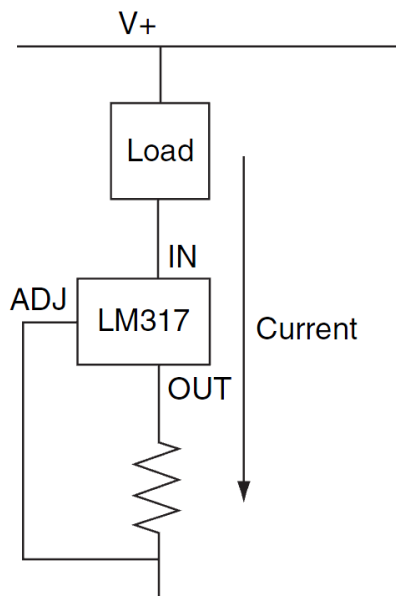


Figura 2.5: Limitatore di corrente basato su regolatore di tensione integrato LM317

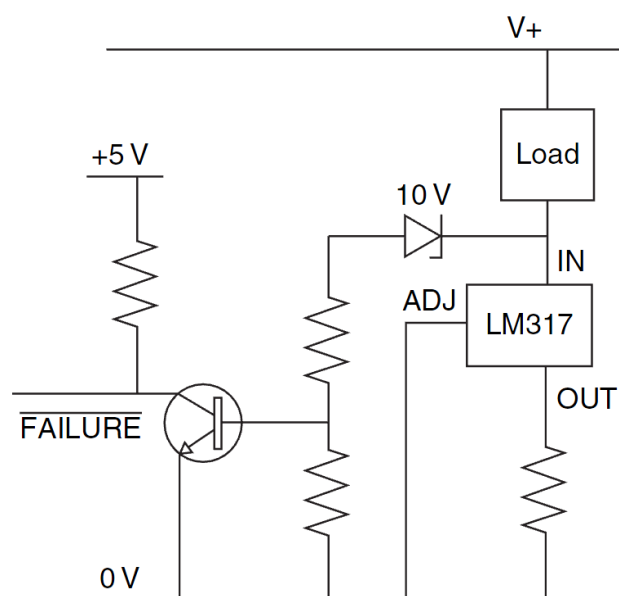


Figura 2.6: Rivelatore di corto-circuito

Tale integrato, oltre a richiedere una tensione V_{REF} di riferimento, possiede un pin di feedback ADJ il quale regola il flusso di corrente in seguito ad un confronto tra la tensione di riferimento e quella ai capi della resistenza R.

Se nel sistema complessivo vengono usati limitatori di corrente accurati, è possibile connettere in parallelo alla stessa sorgente di tensione più stringhe avendo la garanzia che tutte le stringhe siano percorse dalla stessa corrente, sinonimo di un fascio di luce omogeneo e costante.

Il circuito di limitazione di corrente offre anche una protezione del sistema da eventuali cortocircuiti.

In caso di cortocircuito del LED la corrente e la tensione ai capi dell'integrato LM317 aumentano bruscamente causando una grande dissipazione di potenza e quindi calore, il quale fa scattare un dispositivo di arresto termico integrato nell'LM317.

Nei casi in cui sia necessario segnalare all'utente il guasto del sistema, (ad esempio in campo automobilistico), si può far ricorso al circuito illustrato in Figura 2.6, il quale individua un aumento di tensione ai capi dell'integrato LM317 ponendo a zero la linea FAILURE (normalmente alta).

2.2 Regolatori lineari con alimentazione a corrente costante

Poiché un LED si comporta come un carico a tensione costante si può pensare di connetterlo direttamente ad un generatore di corrente, in cui la tensione ai capi di ogni LED o stringa di LED è determinata dal tipo di LED utilizzati e dalla temperatura di esercizio.

Se il generatore di corrente è in grado di fornire una corrente maggiore di quella richiesta dai LED è necessario introdurre un sistema di limitazione della corrente che sia anche in grado di alimentare ogni stringa di LED con la stessa corrente, ossia un circuito di current-sharing.

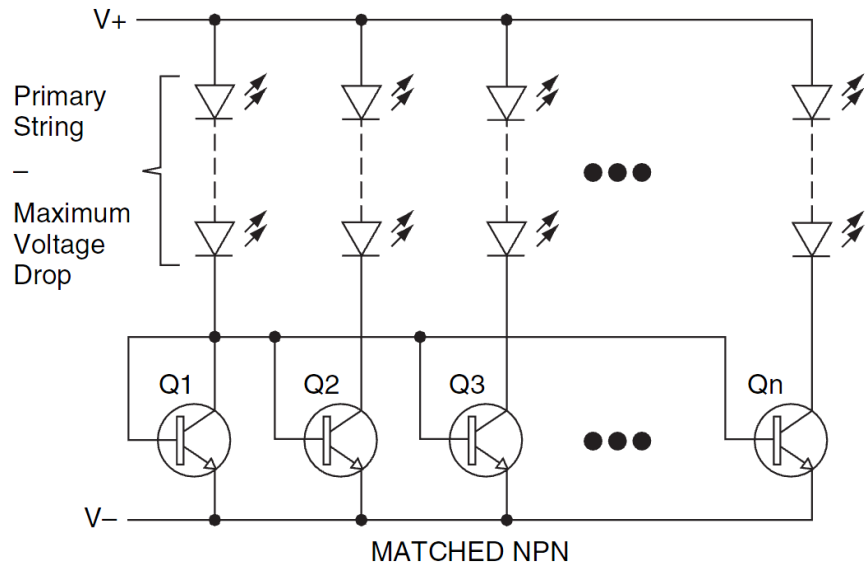


Figura 2.7: Specchio di corrente

Lo specchio di corrente (Figura 2.7) è il circuito più semplice in grado di ripartire ugualmente la corrente tra tutte le stringhe di LED in base al flusso di corrente presente nella prima stringa, detta stringa primaria.

Il principio di funzionamento di tale circuito si basa sul fatto che transistor tra loro accoppiati, tutti con la stessa tensione tra base ed emettitore, avranno la stessa corrente di collettore.

Come già detto il flusso di corrente in tutte le stringhe è controllato dalla stringa primaria: poiché il collettore e la base del transistor Q1 sono collegati tra loro $V_{CB}=0V$, il transistor condurrà finché la tensione di collettore V_c non sarà ad un valore abbastanza basso tale da portare il BJT in OFF.

Tutti gli altri transistor (Q2-Qn) avendo le basi collegate tutte alla base di Q1 condurranno la stessa corrente di collettore di Q1, in modo che la corrente totale tra Q1 e Qn sarà uguale alla corrente fornita dal generatore. La differenza di potenziale dei LED nella stringa primaria deve essere superiore alla tensione di qualsiasi altra stringa per assicurare il funzionamento del circuito, a causa delle cadute di tensione V_{CE} tra collettore ed emettitore nei transistor Q2-Qn. Le stringhe a valle della primaria provvederanno a regolare il flusso di corrente in modo tale che questo sia equivalente a tutte le stringhe.

Nel nostro caso il carico è costituito da dei LED, e la tensione erogata dal generatore dipende dal numero e dal tipo di LED in ogni stringa.

In pratica, il generatore in base a come è stato progettato avrà una tensione di uscita massima; si rivela quindi necessario un circuito detto over-voltage detector in grado di limitare il valore di tensione per ogni stringa di LED.

Le norme di sicurezza per apparecchi a bassa tensione SELV (Safety Electrical Low Voltage) impongono di limitare ogni potenziale a 60V DC oppure 42.4V AC; si ha quindi che il numero di LED per stringa è limitato in modo che in totale le stringhe abbiano una tensione massima di 60V.

In un circuito a corrente costante, un guasto di un singolo LED può provocare lo spegnimento del solo LED (short circuit LED) o dell'intera stringa in cui il LED è connesso (open circuit LED).

Nel caso di open circuit LED, ovvero se la rottura del LED crea un circuito aperto, si ha un brusco aumento del valore della tensione in uscita dal generatore a causa della "virtuale" rimozione del carico.

L'aumento di tensione può essere rilevato da un over-voltage detector e tramite una linea FAILURE comunicato all'utente.

Se il driver dell'array di LED è costituito da uno specchio di corrente, il circuito avrà comportamenti diversi a seconda di dove è avvenuto il guasto.

Se il guasto (open circuit LED) avviene nella stringa primaria si avrà lo spegnimento di tutto l'array di LED, in quanto non essendoci flusso di corrente nella stringa primaria, per la proprietà dello specchio di corrente, non ci sarà flusso di corrente in nessuna altra stringa.

Come prima, un over-voltage detector può essere la soluzione per rivelare il guasto.

Se invece, il guasto avviene nella seconda o n-esima stringa, si avrà un aumento della corrente nelle altre stringhe senza che ci sia un brusco aumento della tensione e quindi non sempre rilevabile tramite un over-voltage detector.

In seguito al guasto, la tensione al collettore del transistor della stringa guasta sarà nulla in quanto inesistente il collegamento all'alimentazione, condizione che può essere verificata e segnalata tramite una linea di guasto.

2.3 Regolatori switching

Per tensioni di alimentazione molto variabili, nel caso di applicazioni a corrente medio - alta come ad esempio i Power LED, l'uso di regolatori lineari è sconsigliato a causa dell'alto consumo di potenza e bassa efficienza.

Per esempio nel pilotaggio di un tipico LED con $V_F=3.5V$, con una sorgente a 5V e 1A utilizzando un regolatore lineare l'efficienza massima del sistema di pilotaggio è pari al 70%; se nelle stesse condizioni operative, la tensione della sorgente dovesse aumentare da 5V a 12V l'efficienza calerebbe al 30%.

Per prevenire questi problemi si ricorre all'utilizzo di regolatori più efficienti, ma più complessi e costosi, chiamati regolatori switching.

I regolatori switching rispetto ai regolatori lineari offrono diversi vantaggi, come l'elevata efficienza di conversione e la possibilità di elevare (boost), abbassare (buck) o elevare e abbassare (buck-boost) la tensione o la corrente di uscita rispetto a quella di ingresso.

In genere, la tipologia di regolatore switching da utilizzare viene scelta valutando un compromesso tra costo e livello di efficienza desiderato, ad ogni modo nel caso di alimentazione di dispositivi di illuminazione LED il regolatore viene configurato come una sorgente di corrente costante.

Un regolatore switching è un circuito che utilizza componenti capaci di immagazzinare energia (induttanze, capacità) per trasferire l'energia dall'ingresso all'uscita a pacchetti temporali. I circuiti di retroazione regolano il trasferimento di energia per mantenere una tensione costante in uscita entro i limiti di carico del circuito.

Con questo tipo di regolatori è possibile ottenere alte efficienze di conversione anche con grandezze di input e output variabili; ad esempio nella situazione di prima sostituendo il regolatore lineare con un uno switching di tipo buck (abbassatore) si ha un'efficienza pari a 95% e 98% in seguito all'aumento della tensione di ingresso da 5V a 12V rispettivamente.

L'unico svantaggio del regolatore switching, oltre al costo e alla complessità, è la generazione di rumore in seguito al continuo spostamento di carica in pacchetti discreti tra stadio di ingresso e uscita; il quale però può essere ridotto usando tecniche specifiche di controllo e mediante una attenta e accurata selezione dei componenti del regolatore.

In Figura 2.8 è raffigurato lo schema di principio di un regolatore buck a tensione costante; il controllore mantiene costante la tensione di uscita regolando il valore del duty cycle (D) o la frequenza di switching.

La tensione di uscita desiderata viene fissata tramite l'equazione:

$$V_O = V_{FB} \frac{R_{FB1} + R_{FB2}}{R_{FB1}}$$

Il valore dell'induttanza L determina il valore del ripple ΔI_{PP} di corrente mentre il valore della capacità C condiziona il valore del ripple di tensione d'uscita.

A regime si ha che la corrente media circolante nell'induttanza è pari alla corrente di carico, la quale perciò può essere fissata controllando il ripple di corrente in L. Modificando leggermente lo schema di Figura 2.8 si ottiene un regolatore buck a corrente costante (Figura 2.9) adatto a pilotare i LED.

Il regolatore così ottenuto è in grado di fornire in uscita un valore di corrente costante che viene fissato dimensionando opportunamente i componenti tramite l'equazione:

$$I_F = \frac{V_{FB}}{R_{FB}}$$

Affinché si abbia una regolazione attiva della corrente in uscita e il ripple sia confinato a livelli di tolleranza adeguati (solitamente 5%-10% per i Power Led) è necessario poter rilevare continuamente il valore della corrente circolante nell'induttanza tramite la resistenza R_{FB} .

Questo provoca inevitabilmente un consumo di potenza tanto maggiore quanto più elevata è la tensione di riferimento del controllore V_{FB} . Negli ultimi tempi sono stati sviluppati controllori per LED con tensioni V_{FB} particolarmente basse (50mV-100mV).

Ci sono molte caratteristiche che rendono i regolatori buck dispositivi efficienti e di largo impiego nel campo dell'illuminazione LED; oltre alla semplicità di configurazione come sorgenti di corrente costante, sono relativamente semplici ed economici rispetto agli altri regolatori switching.

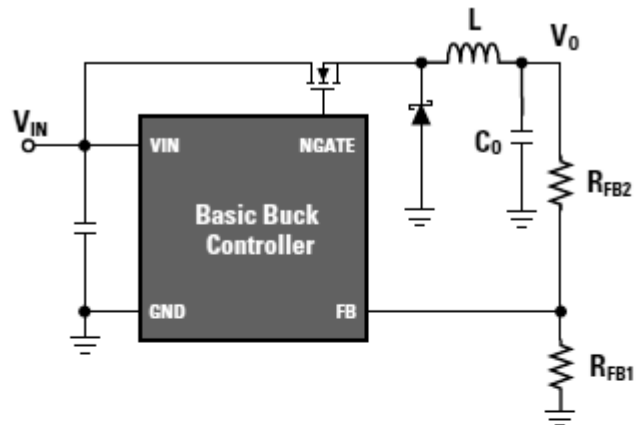


Figura 2.8: Regolatore buck a tensione costante

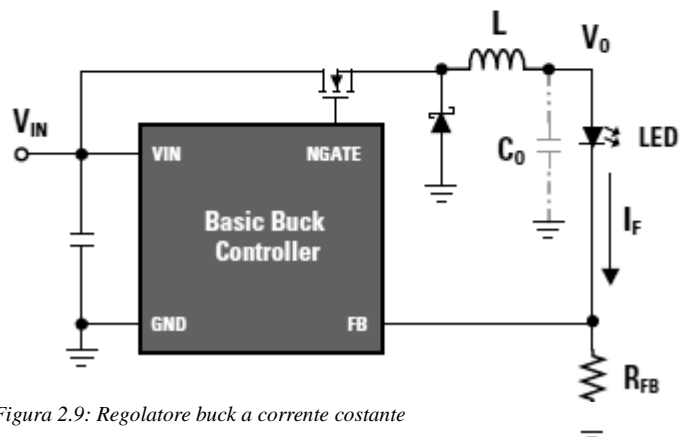


Figura 2.9: Regolatore buck a corrente costante

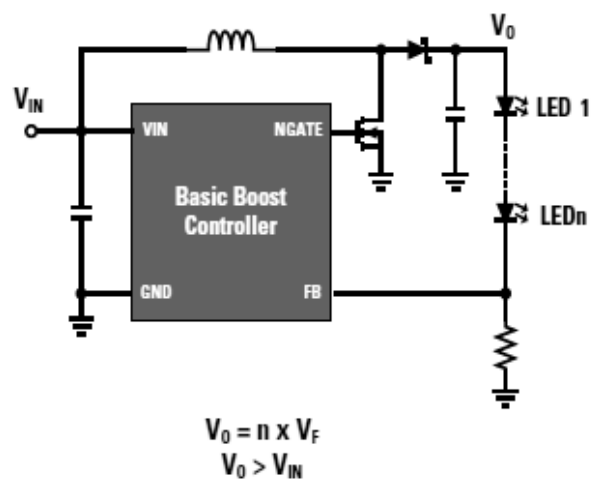


Figura 2.10: Regolatore boost

Tuttavia, in applicazioni quali l'illuminazione residenziale e commerciale, dove sono richiesti migliaia di lumen attraverso lunghe stringhe di LED, può capitare di avere a disposizione una sorgente con valori di tensione minore della tensione assorbita dalla stringa.

In questo caso è richiesto l'uso di un regolatore boost (o buck-boost) come quello raffigurato in Figura 2.10 in grado di aumentare il valore di tensione a valori sufficienti a pilotare le stringhe di LED.

Uno svantaggio legato all'uso dei regolatori switching è la generazione di interferenze elettromagnetiche EMI causate dalle componenti di corrente e tensione ad alta frequenza. Specifiche norme limitano il valore di tali radiazioni e impongono l'uso di appropriati filtri in grado di ridurre l'entità dell'interferenza incrementando dimensioni e costo del regolatore switching finale.

L'utilizzo di regolatori lineari o switching è molto legato alla tipologia di applicazione, al tipo di LED e dalle caratteristiche della sorgente di alimentazione.

Nel caso di regolatori lineari l'efficienza risulta essere molto bassa quando si ha a disposizione una tensione di alimentazione molto maggiore della tensione assorbita dal carico di LED; in questo caso si hanno problemi di dissipazione termica ed è richiesto l'uso di sistemi di raffreddamento.

Se invece la tensione di alimentazione è leggermente maggiore della tensione assorbita, l'efficienza di un regolatore lineare risulta essere maggiore di quella di un regolatore switching; con la conseguente riduzione di costi e complessità del driver.

Da notare che l'utilizzo di regolatori lineari con alimentazione dalla rete elettrica necessita l'utilizzo di trasformatori a 50-60Hz di considerevoli dimensioni e peso, talvolta ingombranti.

Una forte limitazione nell'uso di tali regolatori sta nel fatto che la tensione di alimentazione deve essere sempre maggiore della tensione assorbita dal carico, condizione che ne limita considerevolmente l'uso in svariate applicazioni.

In tali applicazioni è da preferirsi l'uso di regolatori switching tenendo ben presente i problemi di generazione di interferenze con altri sistemi e l'utilizzo di filtri "anti" EMI.

In particolare in applicazioni medicali e automobilistiche, questo rappresenta un grosso problema che obbliga l'uso di regolatori lineari che sono privi di EMI, anche a fronte di una minore efficienza.

A titolo d'esempio in Figura 2.11 è illustrato un alimentatore per LED con uscita a corrente costante.

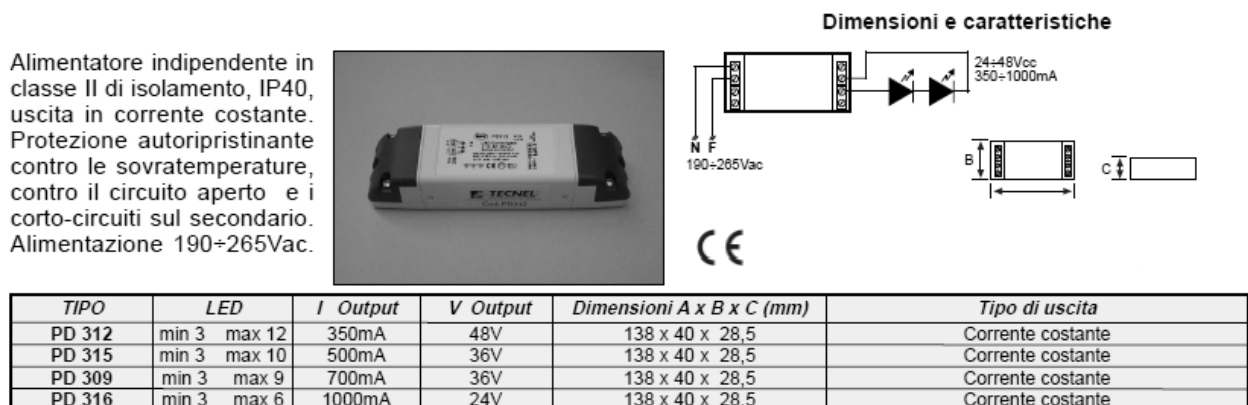


Figura 2.11

3. Dissipazione termica nei PowerLED

I LED e tutte le apparecchiature elettroniche sono molto sensibili al calore in quanto ne degrada prestazioni e durata di funzionamento, motivi per i quali è necessario eliminare ogni eccesso di calore attraverso sistemi di raffreddamento più o meno sofisticati.

Le sorgenti di illuminazione tradizionali come le lampadine ad incandescenza convertono una minima parte dell'energia assorbita in luce mentre la maggior parte viene dissipata sotto forma di calore e trasferita all'ambiente esterno per radiazione (metodo attraverso il quale il calore viene trasferito sottoforma di radiazioni nella zona dell'infrarosso).

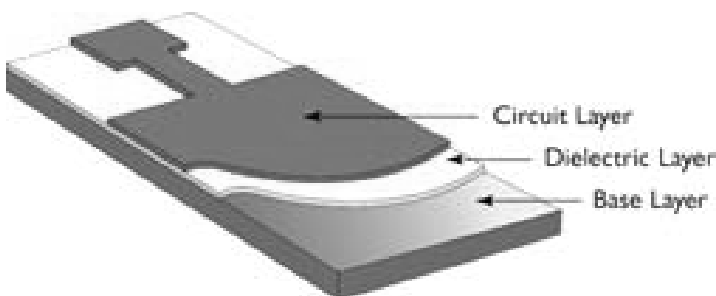
A differenza delle lampade ad incandescenza nei LED il calore dal chip viene trasferito per conduzione (trasferimento di calore tra due corpi in contatto) al dissipatore termico e successivamente per convezione dal dissipatore allo spazio circostante.

Conoscere la temperatura a cui si porta la giunzione dei LED é importante perché l'eccessivo riscaldamento della giunzione causa perdita di prestazioni e minore affidabilità. Infatti l'elevata temperatura raggiunta dal dispositivo durante il funzionamento provoca diminuzione dell'efficienza, traslazione dello spettro e limitazioni in termini di vita del LED, in particolare molti meccanismi di degrado durante l'invecchiamento dei dispositivi sono attivati termicamente.

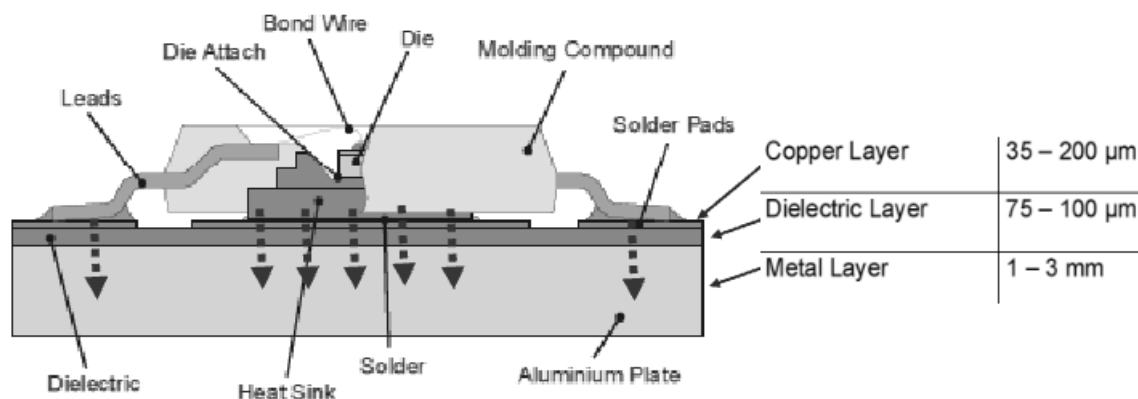
Come già detto nei capitoli precedenti, una variazione di temperatura comporta delle variazioni nelle proprietà elettriche e ottiche del LED; risulta perciò indispensabile una accurata caratterizzazione termica al fine di conoscere la reale temperatura di funzionamento in condizioni normali, nonché un sistema di dissipazione termica efficiente e quanto più economico.

Una soluzione adottata nella maggior parte dei Power Led fa uso di una scheda a circuito stampato con anima metallica su cui è montato il dispositivo LED chiamata MCPCB (Metal-Core-Printed-Circuit-Board).

In Figura 3.1 è rappresentata la scheda MCPCB mentre in Figura 3.2 si può vedere il package completo di un dispositivo LED montato su scheda MCPCB.



A sinistra Figura 3.1: Sezione di una scheda MCPCB
Sotto Figura 3.2: Power LED montato su scheda MCPCB



La scheda funge da connessione elettrica, ma anche da interfaccia per la dissipazione termica; è costituita da uno strato di rame per la realizzazione delle piste, da uno strato di materiale dielettrico per l'isolamento elettrico tra i due metalli e da uno strato di materiale detto di base (spesso in alluminio). I substrati termici MCPCB minimizzano l'impedenza termica e conducono il calore più efficacemente ed efficientemente che le schede stampate standard, infine sono meccanicamente più robusti. Tradizionalmente, per raffreddare un circuito stampato standard si ricorreva ad un sistema con staffe e viti per montare il dissipatore, con un grande ingombro e un largo impiego di materiali; con l'uso di schede ad alta conducibilità termica quindi si riducono le dimensioni dei dissipatori di calore, e si migliorano le prestazioni: vita più lunga, temperatura di funzionamento più bassa e quindi migliori emissioni luminose nonché aumento della potenza dissipabile.

Le piste del circuito stampato sono in rame ed hanno uno spessore che varia tra 35 e i 200 μm nei casi più comuni; lo strato di dielettrico offre l'isolamento elettrico con resistenza termica minima ed è l'elemento chiave della scheda termica in quanto lega il metallo dello strato di base ed il metallo delle piste.

Il dielettrico è costituito da una miscela di polimeri e materiali ceramici con proprietà elettriche eccellenti: il polimero offre proprietà elettriche d'isolamento e capacità di resistere all'invecchiamento termico mentre la parte di ceramica aumenta la conducibilità termica e la resistenza dielettrica. Il risultato è uno strato di isolamento che può avere ottime proprietà anche a 75 μm di spessore; in commercio sono disponibili dielettrici con spessori da 75 μm a 100 μm , secondo le diverse necessità d'isolamento elettrico.

Parte dell'energia elettrica applicata ad un dispositivo a semiconduttore viene convertita in calore, di conseguenza si ha un aumento della temperatura di giunzione.

Questo accade perché la parte attiva del dispositivo, quella che genera calore, è separata dall'ambiente esterno secondo un percorso termico come quello indicato in Figura 3.3.

Ogni porzione del percorso termico, dalla sorgente all'ambiente esterno, è modellato da una resistenza termica di valore opportuno in base alle caratteristiche del materiale utilizzato nella sezione.

Per un qualsiasi dispositivo a semiconduttore, la resistenza termica $R\theta$ è definita come l'incremento della temperatura di giunzione causato dalla potenza dissipata P_D nel dispositivo:

$$R\theta_{JX} = \Delta T_J / P_D$$

I due pedici di $R\theta$ indicano i punti tra cui è misurata la resistenza termica: mentre con J si indica sempre la giunzione, X indica il punto di riferimento utilizzato.

Ad esempio X può essere C per indicare il contenitore o A per indicare l'ambiente esterno.

Questi ultimi sono inoltre i due parametri di resistenza termica più utilizzati: dalla giunzione al contenitore $R\theta_{JC}$ e dalla giunzione all'ambiente $R\theta_{JA}$.

La resistenza termica totale $R\theta_{JA}$ di un dispositivo è data dalla somma delle singole resistenze del percorso termico giunzione-ambiente.

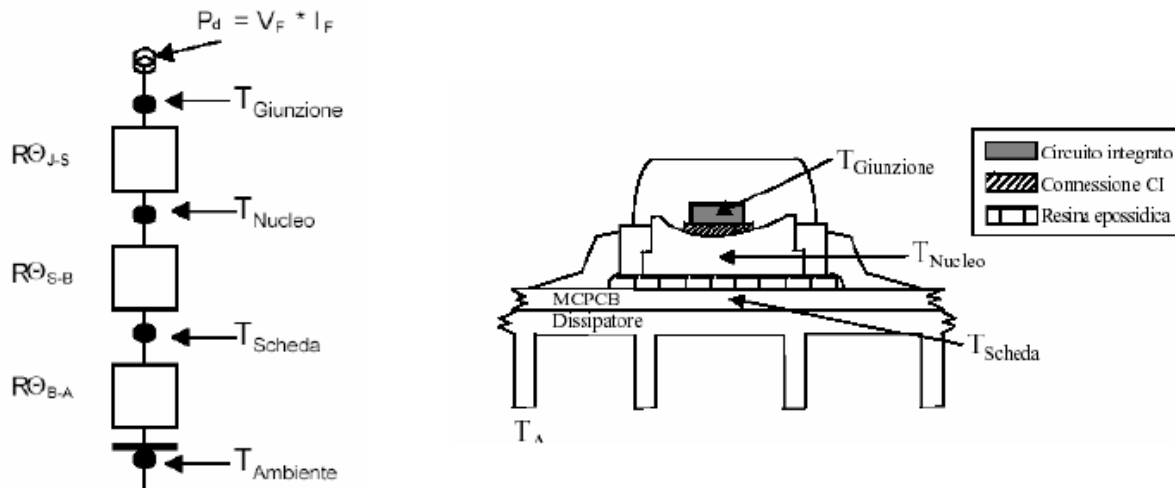


Figura 3.3: Modellizzazione tramite resistenze termiche del percorso termico tra giunzione e ambiente esterno

Utilizzando il parametro resistenza termica è facile ottenere informazioni sulla temperatura di funzionamento del dispositivo. Infatti, valutando la potenza realmente dissipata da un dispositivo, si può ottenere la temperatura di giunzione nota la temperatura ambiente o del contenitore. Considerando un generico dispositivo a semiconduttore con una data resistenza termica $R\theta_{JA}$, la temperatura di giunzione può allora essere ottenuta dalla temperatura ambiente nota l'esatta potenza dissipata dal dispositivo:

$$T_J = T_A + \Delta T_J = T_A + R\theta_{JA} P_D$$

Perciò se viene definita una temperatura massima di giunzione per il corretto funzionamento del dispositivo, è facile determinare la zona di funzionamento di sicurezza in termini di potenza dissipata e temperatura ambiente.

Al fine di ridurre al minimo la resistenza termica nelle sorgenti luminose a LED il percorso termico giunzione-scheda viene ottimizzato.

La resistenza termica totale per sistemi ad emettitori multipli si può determinare con il modello a resistenze termiche parallele illustrato in Figura 3.4. In questo modello ciascun emettitore è rappresentato da singole resistenze termiche in parallelo.

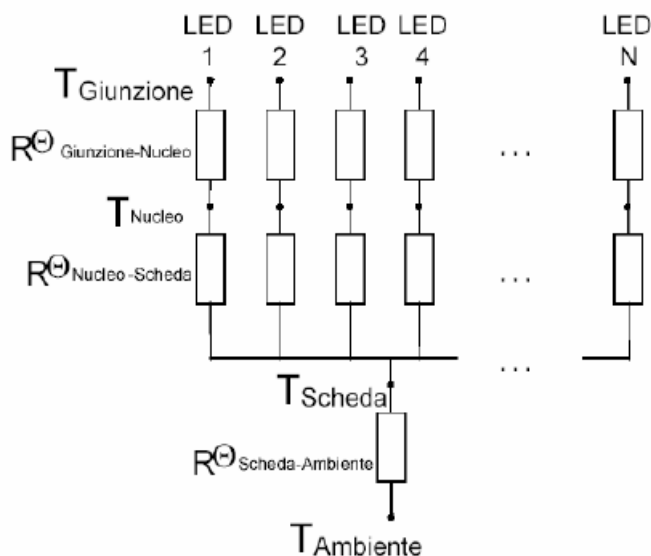


Figura 3.4: Modellizzazione tramite resistenze termiche del percorso termico tra giunzione e ambiente esterno di un sistema di emettitori multipli

La resistenza termica $R_{\theta_{JB}}$ tra giunzione e scheda, dell'array di emettitori multipli è data dall'equazione:

$$\frac{1}{R_{\theta_{JB}} \text{ Totale_Array}} = \frac{1}{R_{\theta_{JB}} \text{ LED}(1)} + \dots + \frac{1}{R_{\theta_{JB}} \text{ LED}(N)}$$

Dal momento che tutte le resistenze parallele si possono ritenere equivalenti, l'equazione diventa:

$$\frac{1}{R_{\theta_{JB}} \text{ Totale_Array}} = \frac{N}{R_{\theta_{JB}} \text{ LED}}$$

oppure:

$$R_{\theta_{JB}} \text{ Totale_Array} = \frac{R_{\theta_{JB}} \text{ LED}}{N}$$

Dove:

$$R_{\theta_{JB}} \text{ emettitore LED} = R_{\theta_{JS}} + R_{\theta_{SB}}$$

N = numero di emettitori

Si può notare come in questo modo sia stato possibile diminuire il valore della resistenza termica totale.

4. Durata dei LED

Per le sorgenti di luce tradizionali, storicamente, si intende come “vita utile” il lasso di tempo intercorso dall’accensione al momento in cui una certa percentuale di lampade smette di funzionare.

Il parametro di riferimento è generalmente definito da una mortalità del 10% delle sorgenti luminose (indicata dalla sigla B10); una mortalità del 50% definisce invece la cosiddetta “vita media” (indicata dalla sigla B50).

Per interpolare questi dati si utilizza la variabile aleatoria di Weibull che definisce una curva di sopravvivenza delle sorgenti e che viene normalmente utilizzata in ambito industriale per tutte le applicazioni elettroniche (Figura 4.1).

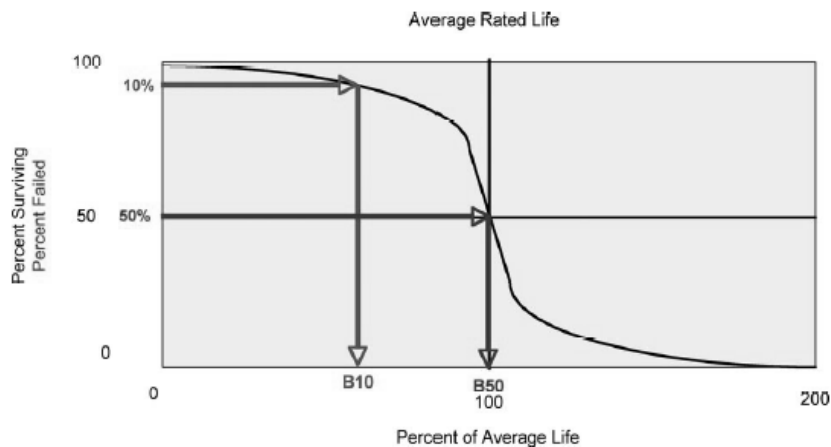


Figura 4.1: Curva di sopravvivenza di Weibull

Le sorgenti luminose a LED invece non tendono a spegnersi improvvisamente esaurita la loro vita utile: i diodi LED nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale fino ad esaurirsi completamente in un periodo molto lungo (a meno di rotture improvvise).

Per questo motivo occorre provvedere con termini di confronto che sono del tutto diversi da quelli utilizzati per le comuni sorgenti di illuminazione come le lampadine ad incandescenza. Il parametro più utilizzato nella definizione di vita utile è stato definito da un gruppo industriale produttore di Power LED, la “Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies” (ASSIST), la quale ha determinato che il mantenimento del 70% del flusso luminoso iniziale corrisponde al limite inferiore al di sotto del quale l’occhio umano percepisce una riduzione della luce emessa. In poche parole si può supporre che una riduzione del flusso luminoso iniziale del 30% sia accettabile per la maggioranza delle applicazioni; per questo motivo viene definita come vita utile di un LED il tempo trascorso dalla prima accensione al raggiungimento di questo limite indicato come L70 (Lumen Maintenance 70%).

Per definire il mantenimento del flusso luminoso nel tempo esistono diverse metodologie, ad oggi la più usata risulta quella definita dallo standard IES LM-80 “Measuring lumen maintenance of LED light sources”. Il metodo si basa sulla misurazione del flusso luminoso di una sorgente LED pilotata a diversi valori di corrente a tre diverse temperature (55°C, 85°C, ed una terza a scelta) per un periodo di tempo non inferiore a 6000 ore (con misurazioni almeno ogni 1000 ore).

Il test non dà informazioni riguardo all’eventuale previsione di decadimento e quindi di vita utile attesa al di fuori delle ore di prova effettuate; si può solo provvedere ad interpolare i dati raccolti in modo da avere una stima futura come illustrato in Figura 4.2.

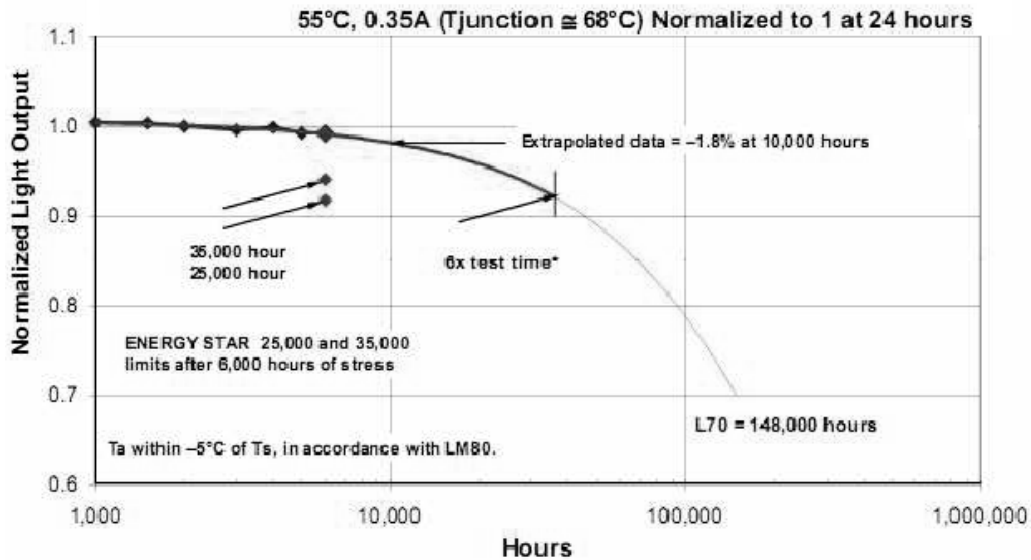


Figura 4.2: Interpolazione dei dati raccolti dal test

In questo caso il produttore ha definito come tempo massimo di interpolazione un tempo pari a 6 volte il tempo realmente impiegato nel test dato che all'aumentare del tempo di previsione aumenta in modo esponenziale l'incertezza esponenziale.

Il grafico, come già detto, fornisce solo un'indicazione di massima dato che già a 15000 ore l'incertezza è molto elevata: per esempio pensando ad una media di 4200 ore di funzionamento all'anno proporzionalmente è come fare una stima su 35 anni di vita basandosi sul funzionamento di circa un anno e mezzo.

Basandosi su queste evidenze sperimentali si può osservare come non siano estremamente importanti ai fini di una buona durata del diodo LED solo la temperatura di giunzione e la corrente di pilotaggio, ma anche la temperatura dell'ambiente esterno e la capacità dissipativa della piastra su cui sono saldati i LED.

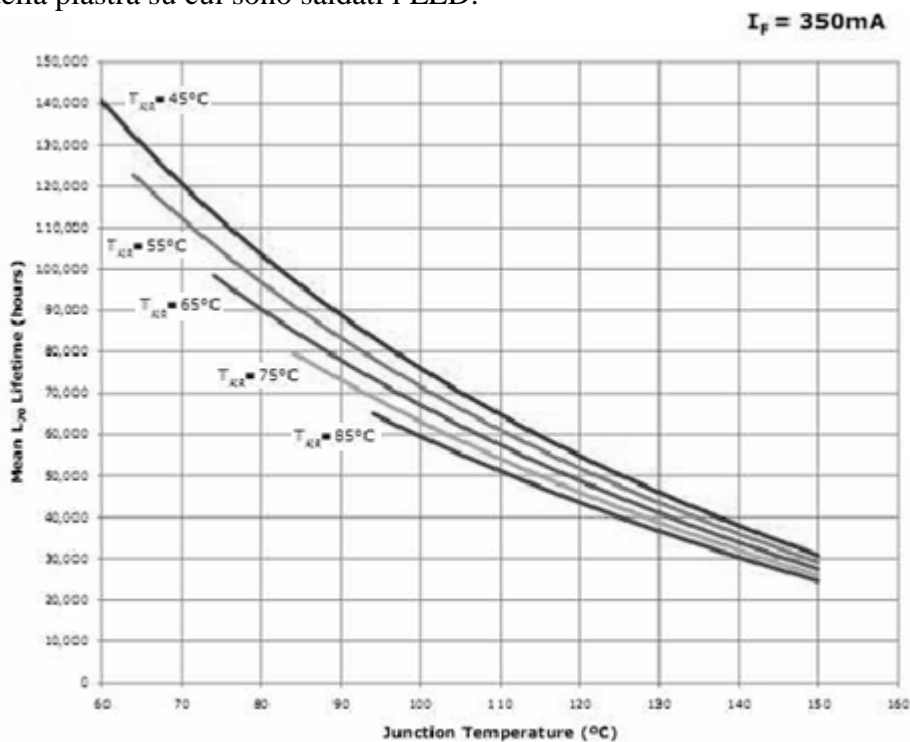


Figura 4.3: Andamento della durata in ore di un LED alimentato a corrente costante di 350mA in funzione della temperatura di giunzione e della temperatura ambiente (T_{AIR})

Dai grafici di Figura 4.3 e 4.4 si può osservare come l'aumento della temperatura di giunzione, della temperatura dell'ambiente circostante o l'aumento della corrente di pilotaggio porti ad una drastica riduzione della vita utile.

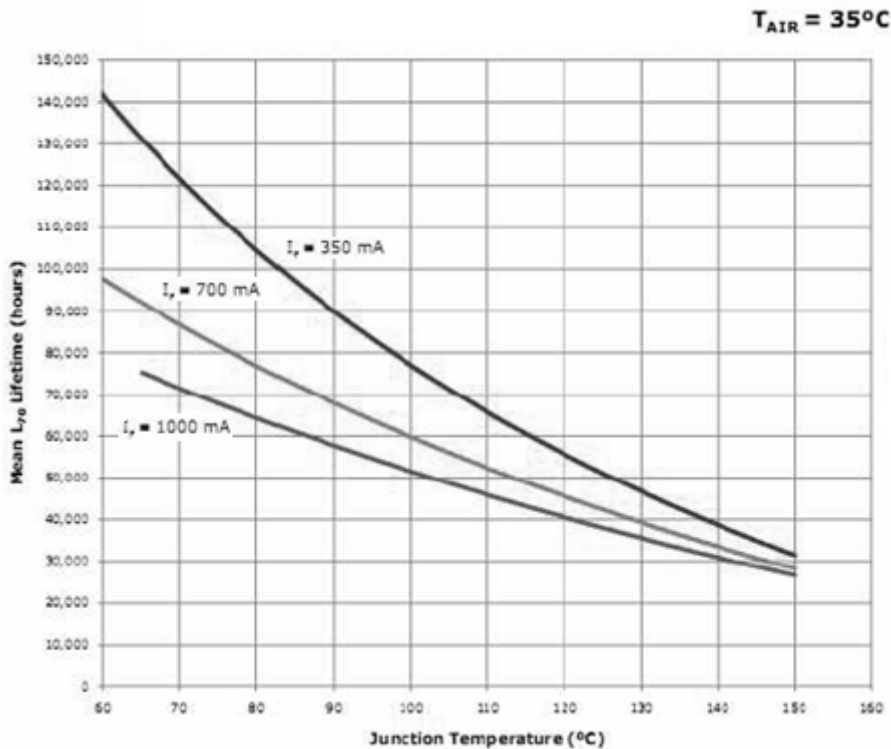


Figura 4.4: Andamento della durata in ore di un LED in funzione della temperatura di giunzione (a temperatura ambiente costante di 35°C) e della corrente di pilotaggio (I_F)

Come già detto in precedenza, a livello sperimentale risulta abbastanza complicato definire una durata attesa di oltre 100000 ore sulla base di sole 6000 ore di funzionamento; inoltre mancano del tutto informazioni relative alla percentuale di sorgenti a LED il cui flusso risulta al di sotto dei risultati attesi,

perché se è vero che quasi nessun LED nelle prove sperimentali si spegne improvvisamente, è altrettanto vero che molti di questi presenteranno un flusso luminoso al di sotto delle curve di interpolazione presentate nei grafici precedenti.

Per questo motivo

alcuni produttori indicano la percentuale di LED che si attestano su valori di flusso luminoso al di sotto dell'intervallo dei valori attesi per la curva considerata. Dai grafici riportati in Figura 4.5 e 4.6 si può osservare di come passare da una percentuale di

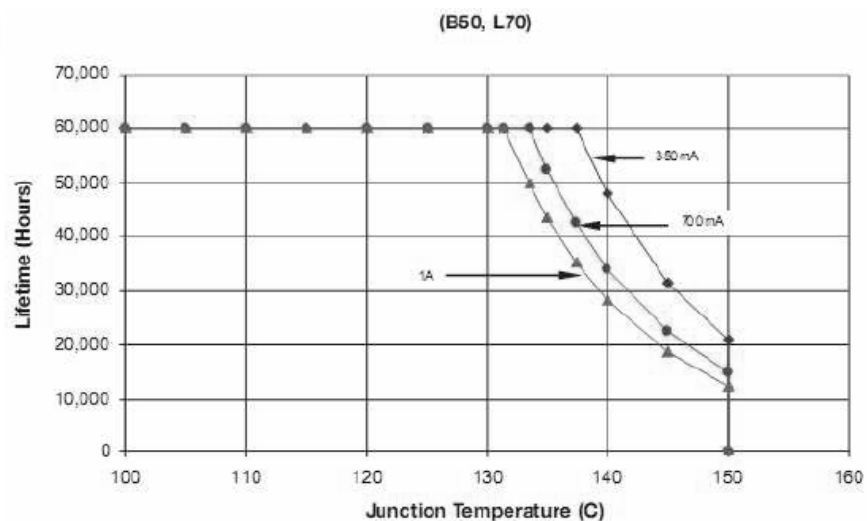


Figura 4.5: Andamento della durata in funzione della temperatura di giunzione con una percentuale di fallimento delle unità sottoposte al test del 50%

fallimento del 50% ad una del 10% comporti una restrizione notevole nei valori di aspettativa di vita utile.

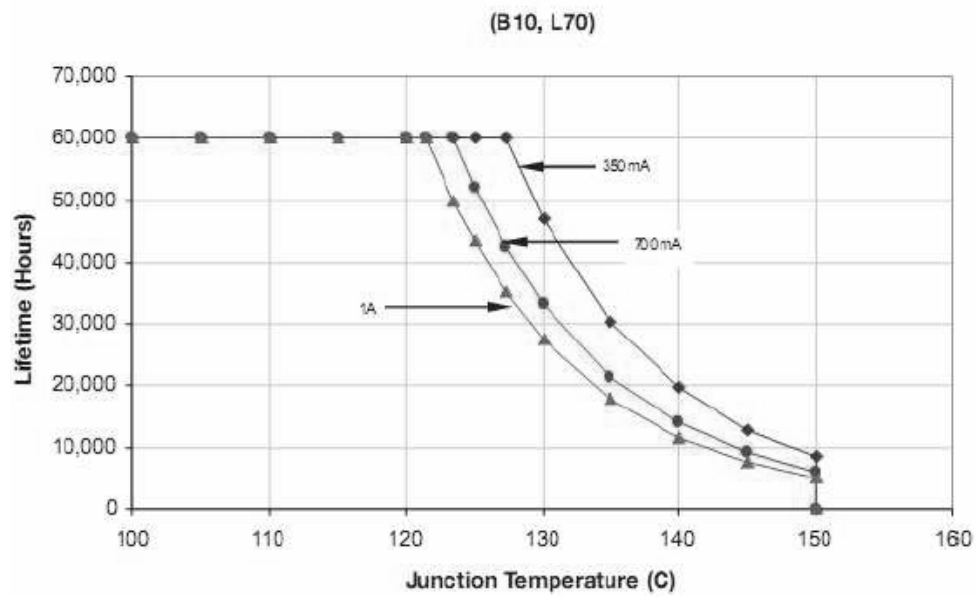
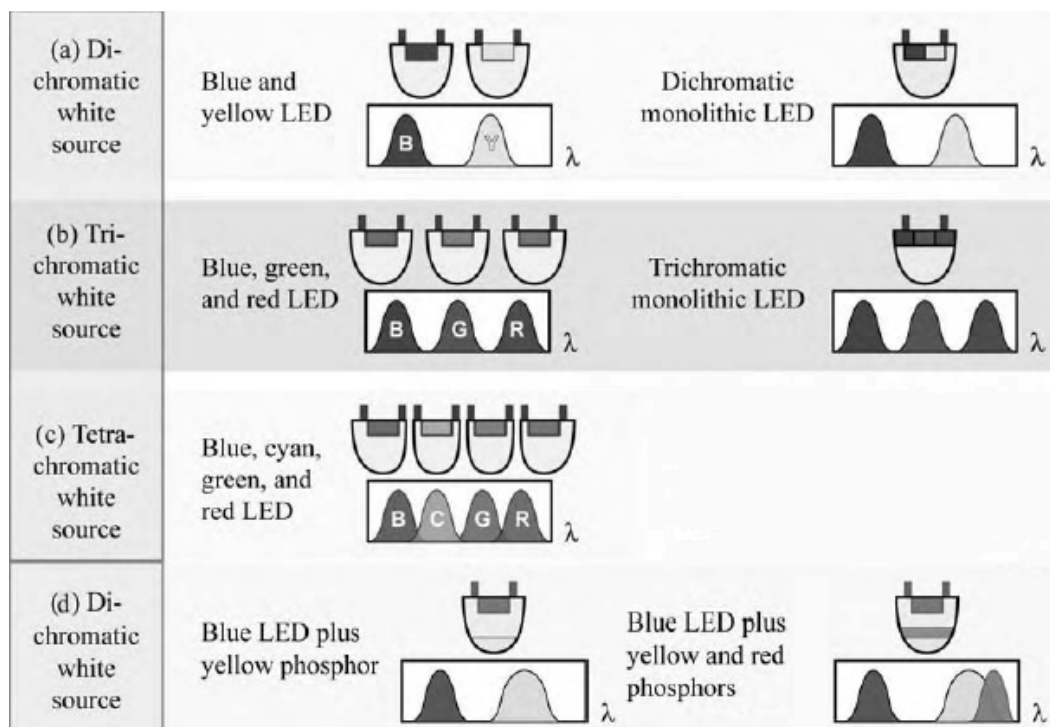


Figura 4.6: Andamento della durata in funzione della temperatura di giunzione con una percentuale di fallimento delle unità sottoposte al test del 10%

5. I LED a luce bianca

Come si è detto, tutti i diodi luminosi emettono luce con spettri a banda stretta (luce pressoché monocromatica). La luce eterocromatica necessaria per illuminare gli ambienti si ottiene miscelando le radiazioni. In pratica si seguono varie modalità per le sintesi:

- luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di due colori complementari;
- luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di tre colori primari (RGB);
- luce eterocromatica (bianca) per sintesi additiva di quattro - cinque colori;
- luce eterocromatica (bianca) per conversione delle lunghezze d'onda.



5.1 Generazione di luce bianca da fonti bicromatiche

La luce bianca può essere generata in parecchi modi diversi; è ben noto che l'insieme di due colori complementari oppure dei tre colori primari (rosso, verde, blu) dà come risultato il colore bianco.

Nell'ambito dei LED la tecnica basata sulle sorgenti bicromatiche fa uso di due strette bande di emissione, (dette lunghezze d'onda complementari) corrispondenti a due colori complementari; che ad un determinato rapporto di intensità, sono in grado di generare luce bianca.

Le lunghezze d'onda dei colori complementari che danno vita a luce bianca per diversi valori di potenza sono indicate nella Figura 5.1 mentre i relativi rapporti di potenza sono riportati in Tabella 5.2.

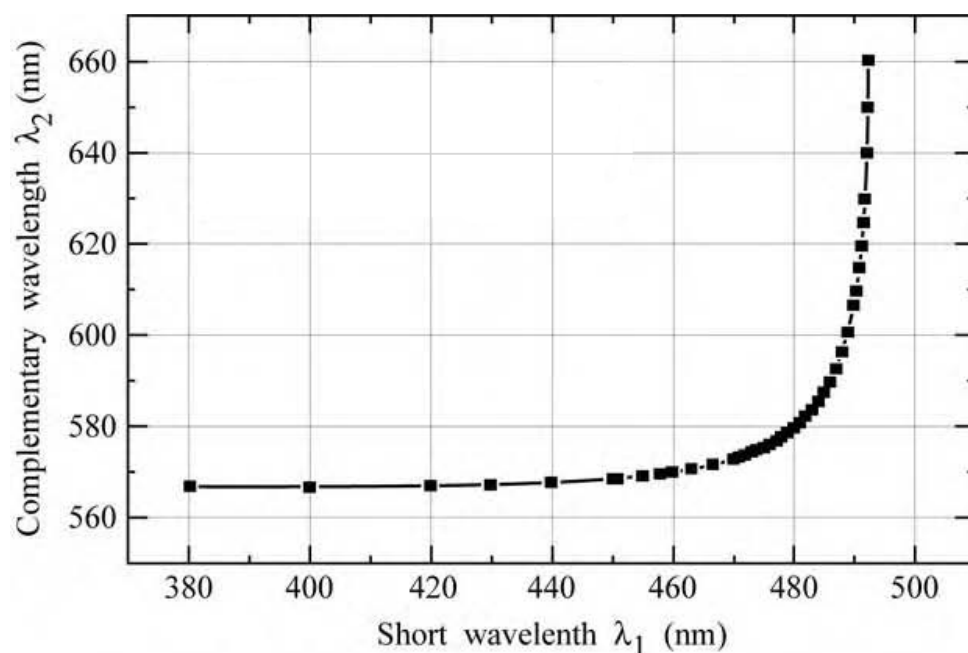


Figura 5.1: Andamento delle lunghezze d'onda complementari che danno vita a luce bianca

Complementary wavelengths			Complementary wavelengths		
λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	$P(\lambda_2) / P(\lambda_1)$	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	$P(\lambda_2) / P(\lambda_1)$
380	560.9	0.000642	460	565.9	1.53
390	560.9	0.00955	470	570.4	1.09
400	561.1	0.0785	475	575.5	0.812
410	561.3	0.356	480	584.6	0.562
420	561.7	0.891	482	591.1	0.482
430	562.2	1.42	484	602.1	0.440
440	562.9	1.79	485	611.3	0.457
450	564.0	1.79	486	629.6	0.668

Tabella 5.2: Valori delle lunghezze d'onda complementari e relativi rapporti di potenza in grado, se miscelate, di generare luce bianca.

Assumendo che le due linee di emissione abbiano una distribuzione gaussiana, la densità spettrale di potenza della radiazione luminosa risultante è data da:

$$P(\lambda) = P_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\sigma_1} \right)^2} + P_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_2}{\sigma_2} \right)^2}$$

dove P_1 e P_2 sono le potenze ottiche delle due linee di emissione e λ_1 e λ_2 sono le lunghezze d'onda di picco.

L'efficacia luminosa della radiazione risultante dalla fonte dicromatica è riportata in Figura 5.3; si può notare che l'efficacia luminosa maggiore pari a 440 lm/W corrisponde ad una lunghezza d'onda della sorgente bicromatica primaria $\lambda_1 = 445$ nm.

L'elevato valore dell'efficacia rivela il grande potenziale delle fonti dicromatiche.

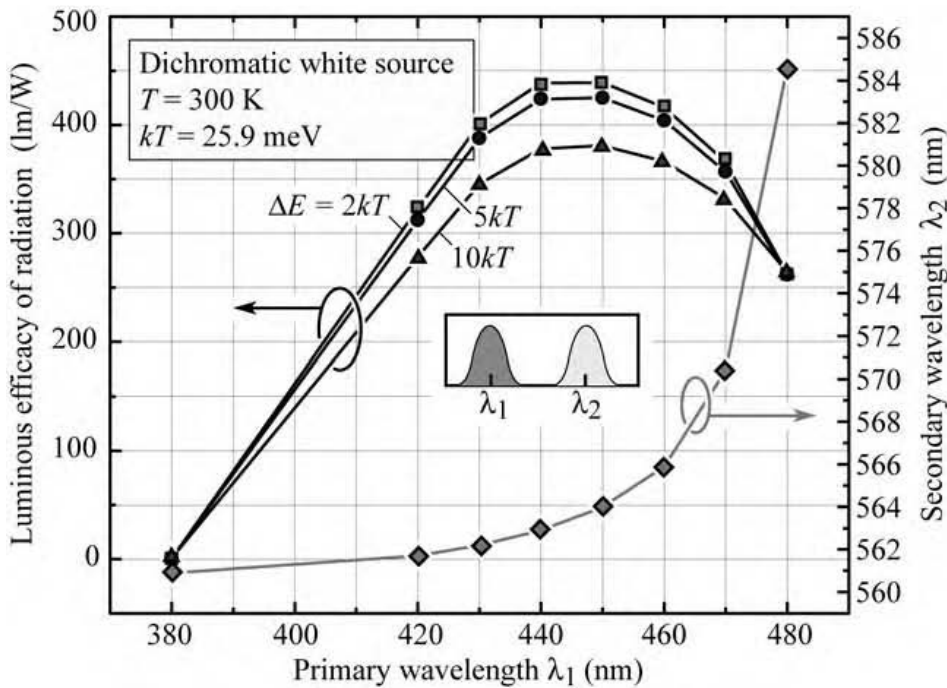


Figura 5.3: Andamento dell'efficacia luminosa in funzione delle lunghezze d'onda complementari λ_1 λ_2

Ad oggi, sono stati dimostrati parecchi metodi per la generazione di luce bianca mescolando due colori complementari, uno di questi usa la mescolanza di radiazioni blu e gialle le quali possono provenire da due chip distinti (multiple-chip) montati sullo stesso package, oppure da due regioni attive ricavate da un unico substrato (single-chip).

Un esempio di una recente struttura single-chip (Figura 5.4) fa uso di un LED GaInN con due regioni attive separate da un sottile strato di GaN in grado di emettere radiazioni a 465nm e 525nm.

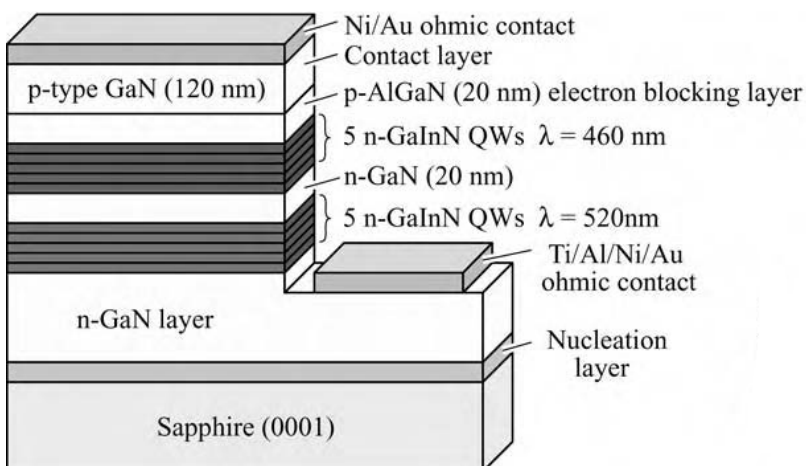


Figura 5.4: Struttura di un LED bicromatico single-chip

Come si può vedere in Figura 5.5 lo spettro della radiazione risultante emessa dal dispositivo presenta due bande di emissione centrate a 450nm e 510nm; valori che rimangono costanti anche in presenza di variazioni della corrente di iniezione.

Si ha invece una variazione consistente nel rapporto tra l'intensità dei picchi delle due radiazioni,

causa da ricercarsi nei diversi fenomeni di ricombinazione radiativa e non, che avvengono con intensità diversa nelle due zone attive.

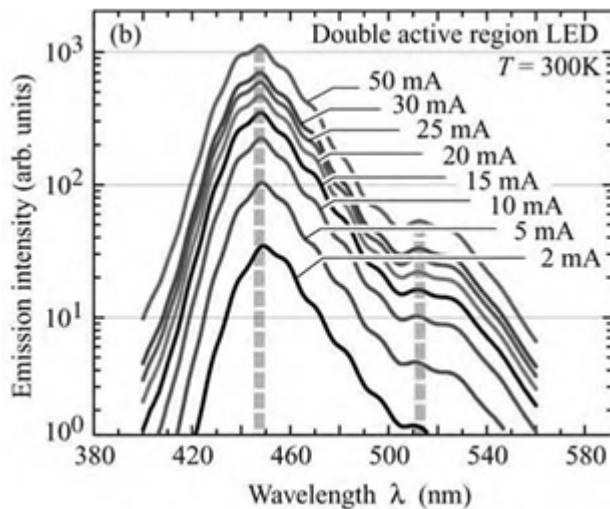


Figura 5.5: Spettro della radiazione risultante da un LED bicromatico

5.2 Generazione di luce bianca da fonti tricromatiche

In applicazioni quali l'illuminazione, è richiesta una luce bianca di qualità, ossia più pura e con indice CRI più elevato possibile; obiettivo che viene raggiunto con tecniche di generazione tri, tetra e pentacromatiche, in quanto la tecnica bicromatica precedentemente discussa, pur offrendo buone potenze di emissione, non garantisce una qualità adeguata della luce prodotta. È stato dimostrato che la mescolanza di radiazioni aventi lunghezze d'onda di picco vicino a 450 nm, 540 nm e 610 nm producono una fonte luminosa di alta qualità, mentre radiazioni vicino ai 500 nm e 580 nm sono da evitarsi.

Lo spettro di emissione tricromatico basato su tre LED con lunghezza d'onda delle radiazioni di 455 nm, 525 nm e 605 nm è raffigurato in Figura 5.6; da notare la simmetria delle distribuzioni in termini di lunghezza d'onda.

Ci sono tantissime combinazioni di lunghezza d'onda possibili per le fonti tricromatiche; ma per raggiungere un'alta efficacia di radiazione le fonti vicino alla regione dello spettro visibile (rosso-cupo e violetto-scuro) dovrebbero essere evitate.

In Figura 5.7 sono riportati i diagrammi dell'efficacia luminosa di radiazione e dell'indice di resa cromatica CRI di una fonte tricromatica con temperatura di colore di 6500 K in funzione delle tre lunghezze d'onda λ_1 , λ_2 , λ_3 .

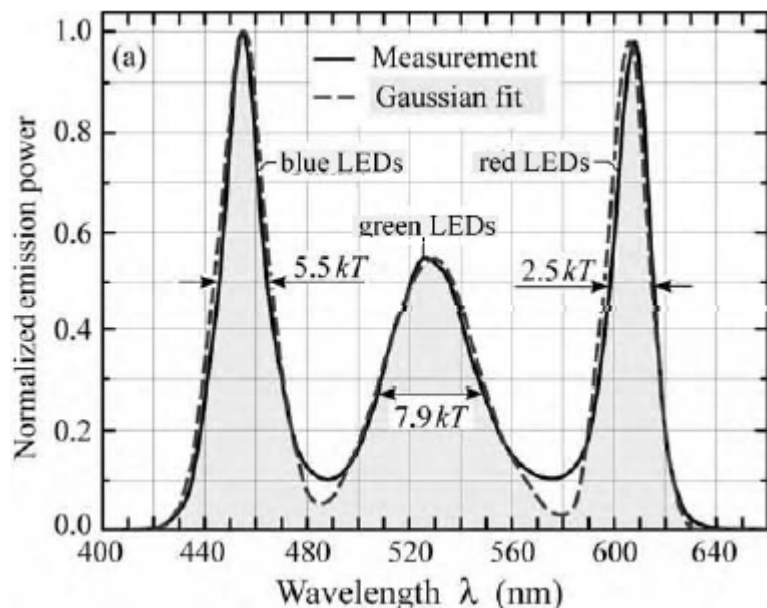


Figura 5.6: Spettro di emissione di una sorgente LED tricromatica RGB

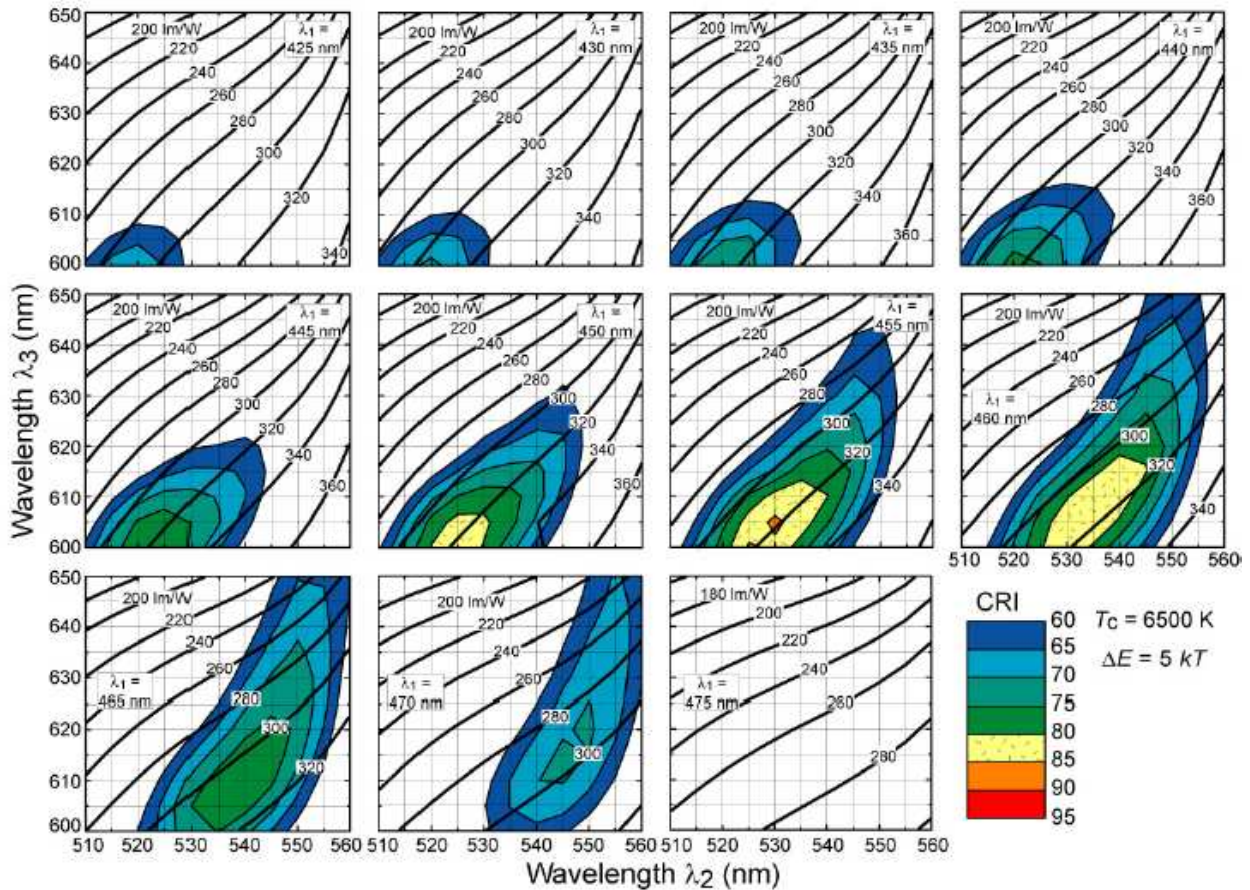


Figura 5.7: Andamento dell'efficacia luminosa e dell'indice CRI in funzione delle tre lunghezze d'onda di un LED tricromatico

Si può notare come lunghezze d'onda pari a $\lambda_1 = 455\text{nm}$, $\lambda_2 = 530\text{nm}$ e $\lambda_3 = 605\text{nm}$ sono particolarmente favorevoli in termini di indice CRI e come tale indice sia sensibile ai valori di picco delle tre lunghezze d'onda.

Per esempio una variazione per la radiazione rossa dal valore di picco 605nm a 620nm comporta una diminuzione del CRI da 85 a 65; allo stesso modo una variazione per la radiazione verde da 530nm a 550 nm fa scendere il CRI ad un valore inferiore a 60.

L'emissione luminosa è fortemente dipendente dalla temperatura della giunzione, in quanto la potenza di emissione (P), lunghezza d'onda di picco λ_{peak} e larghezza spettrale $\Delta\lambda$ dipendono dalla temperatura secondo un coefficiente differente l'uno dall'altra.

Di conseguenza si ha che il punto di cromaticità (nel diagramma CIE) di una sorgente multi-LED (tre nel nostro caso) è dipendente dalla temperatura.

Si consideri una fonte tricromatica con emettitori nei colori rosso, verde e blu, i cui coefficienti di temperatura relativi alla lunghezza d'onda di picco dell'emissione, alla larghezza spettrale e alla potenza di emissione sono raccolti nella tabella seguente.

	Blue	Green	Red
$d\lambda_{\text{peak}}/dT$	0.0389 nm/°C	0.0308 nm/°C	0.156 nm/°C
$d\Delta\lambda/dT$	0.0466 nm/°C	0.0625 nm/°C	0.181 nm/°C
$T_{\text{characteristic}}$	493 K	379 K	209 K

Si ipotizzi che i valori delle tre correnti che alimentano il LED rosso, verde e blu siano tali che l'emissione risultante (ad una temperatura del dispositivo di 20 °C) abbia un punto di cromaticità in posizione (x,y).

Tuttavia, con l'aumento della temperatura del dispositivo, si verifica uno spostamento del punto di cromaticità dalla posizione iniziale (x,y) ad una nuova posizione (x',y') a causa della variazione dei valori P , λ_{peak} , $\Delta\lambda$ in base ai propri coefficienti di temperatura.

Come si può vedere dalla Figura 5.8 se la temperatura del dispositivo aumenta, il punto di cromaticità si sposta verso temperature di colore più elevate. Ciò può essere spiegato dalla forte dipendenza dalla temperatura della potenza luminosa d'emissione del LED rosso. Ad alte temperature, infatti, la componente rossa della sorgente luminosa diminuisce più fortemente che le componenti verde e blu, le quali sono particolarmente stabili (Figura 5.9).

La variazione del valore di cromaticità della luce emessa a causa delle variazioni di temperatura può essere eliminata regolando opportunamente la potenza di emissione delle tre fonti del LED, fondamentalmente attraverso due tecniche.

La prima fa uso di una catena di retroazione la quale opera un controllo sullo spettro della luce emessa regolando secondo certi valori di riferimento la potenza di emissione; mentre nella seconda tecnica viene costantemente

monitorato il valore di temperatura del dispositivo è di conseguenza vengono variati i valori della potenza ottica delle tre sorgenti secondo coefficienti che esprimono la dipendenza delle tre sorgenti dalla temperatura. Il secondo metodo è più facile ed economico da implementare a causa della semplicità con cui viene eseguita la misura di temperatura; tuttavia questa tecnica non permette di operare una compensazione in grado di ridurre gli effetti di invecchiamento del dispositivo.

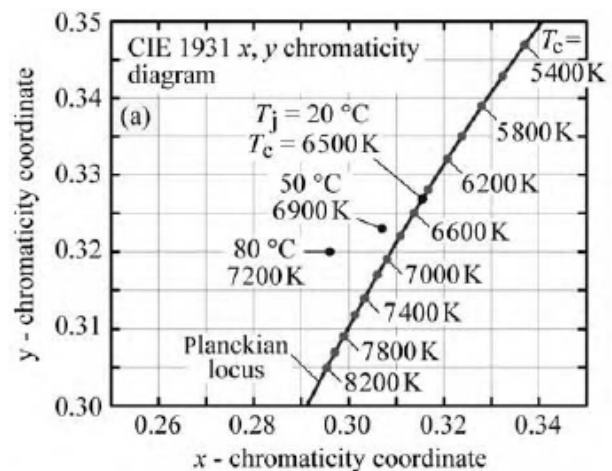
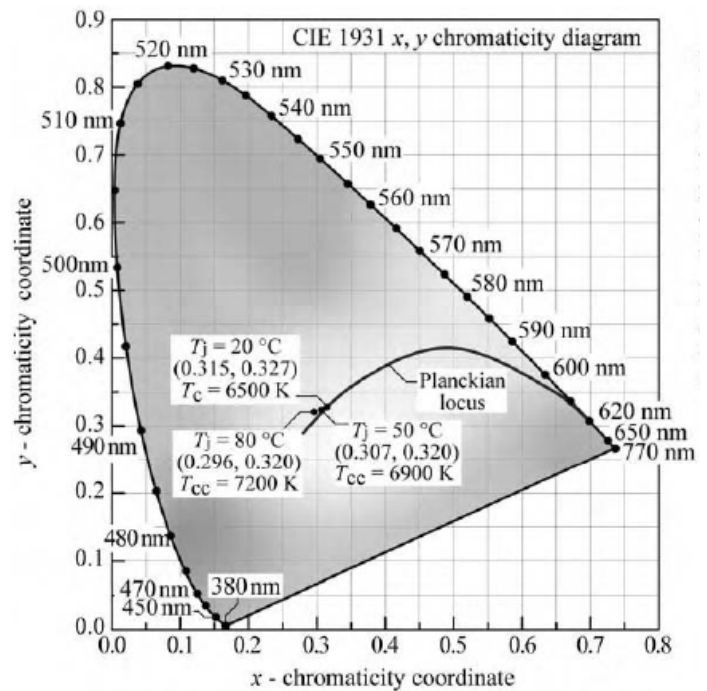


Figura 5.8: Variazione del punto di cromaticità all'aumentare della temperatura

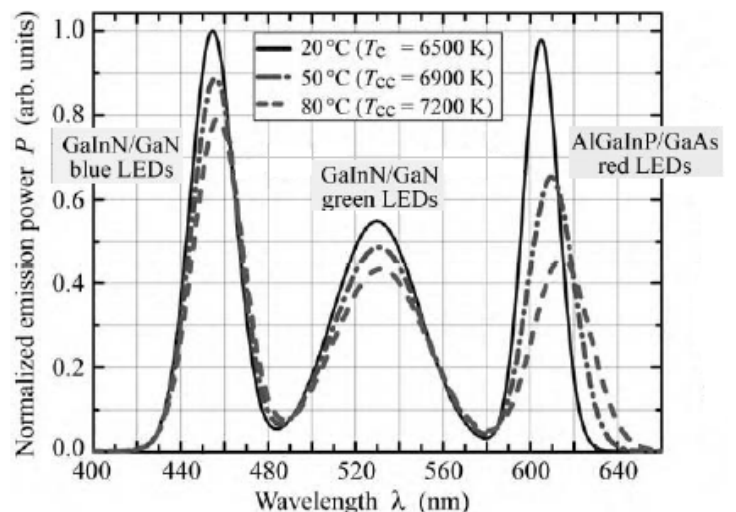


Figura 5.9: Andamento dello spettro di emissione di un LED tricromatico a valori di temperatura diversi

5.3 Generazione di luce bianca da fonti tetracromatiche e pentacromatiche

La generazione di luce bianca da fonti tetracromatiche e pentacromatiche fa uso di quattro e cinque tipi di LED rispettivamente.

L'indice CRI di fonti policromatiche, generalmente, aumenta con l'aumentare del numero delle fonti mentre si verifica una diminuzione dell'efficacia luminosa; ad esempio si ha che l'indice CRI e l'efficacia luminosa di una fonte tetra cromatica sono rispettivamente maggiore e minore di quelli di una fonte tricromatica o bicromatica.

Questo discorso è di validità generale, in quanto si hanno dei comportamenti diversi a seconda della scelta delle lunghezze d'onda della sorgente, tuttavia avendo più sorgenti e quindi una scelta più vasta di lunghezze d'onda è possibile creare dispositivi con un indice CRI ed una efficacia luminosa soddisfacente.

5.4 LED a luce bianca basati sulla conversione di lunghezze d'onda

Molte fonti di luce bianca basate su LED a semiconduttore fanno uso di materiali detti convertitori di lunghezze d'onda (λ -converter), in grado di emettere una radiazione con lunghezza d'onda maggiore di quella assorbita. Principalmente i λ -converter sono costituiti da materiali quali fosfori, semiconduttori e dyes caratterizzati da diversi parametri, come la lunghezza d'onda di assorbimento, la lunghezza d'onda di emissione e l'efficienza quantica. L'efficienza generale η di un λ -converter è definita come:

$$\eta = \eta_{\text{ext}} \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

dove η_{ext} è l'efficienza quantica esterna del λ -converter definita dal rapporto:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space by } \lambda\text{-converter per second}}{\text{number of photons absorbed by } \lambda\text{-converter per second}}$$

mentre λ_1 e λ_2 sono rispettivamente la lunghezza d'onda dei fotoni assorbiti ed emessi dal λ -converter.

Tra i materiali utilizzati per la costruzione dei λ -converter vengono analizzati i fosfori, in quanto più diffusi rispetto agli altri due. I fosfori sono costituiti da un materiale inorganico drogato con una sostanza

otticamente attiva; i materiali più comuni sono detti garnets (granati) e hanno una formula chimica generica del tipo $A_3 B_5 O_{12}$ dove A e B sono elementi chimici e O è ossigeno.

Tra i garnets il più comune è il YAG

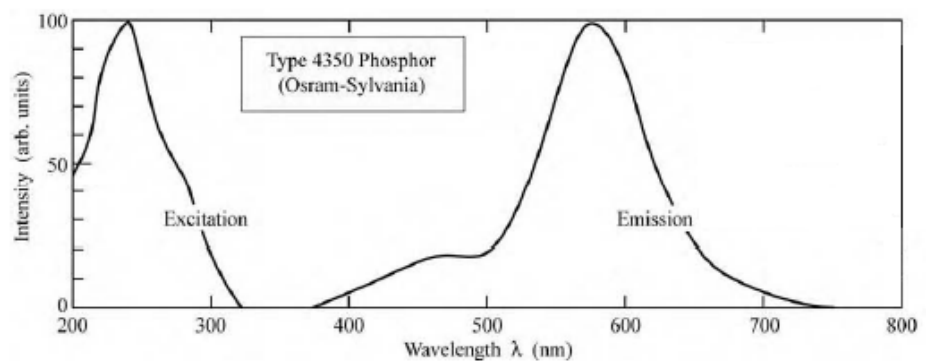


Figura 5.10: Spettro di assorbimento ed emissione di un λ -converter basato sull'utilizzo di fosfori

(yttrium aluminum garnet ossia granato di alluminio di ittrio), $Y_3Al_5O_{12}$, fosfori contenenti tale

materiale prendono il nome di fosfori YAG; mentre il drogante otticamente attivo è costituito di terre rare come il cerio (Ce).

In Figura 5.10 sono illustrati gli spettri di assorbimento ed emissione di un λ -converter basato sull'utilizzo di fosfori.

Una possibile realizzazione di un LED a luce bianca basato sull'utilizzo di fosfori fa uso di un LED GaInN/GaN a luce blu in grado di eccitare uno strato di fosfori YAG posti sopra la die sottoforma di resina (Figura 5.11).

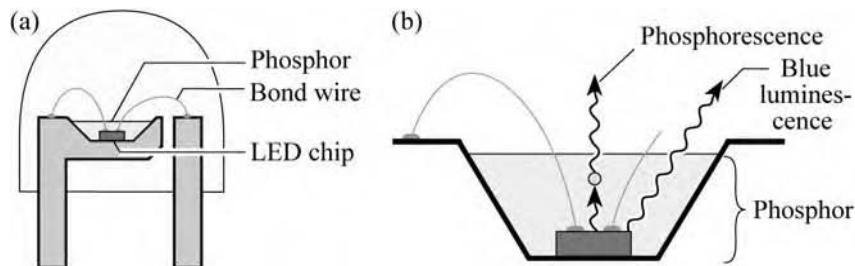


Figura 5.11: Struttura di un LED a luce bianca basato sull'utilizzo di fosfori.

Come indicato in Figura 5.12, una frazione della luce blu viene assorbita dal fosforo e re-emessa con una lunghezza d'onda maggiore mentre una parte passa inalterata; lo spettro di emissione del dispositivo consiste così nell'insieme degli spettri della luce blu emessa dal die e dalle radiazioni emesse dai fosfori.

Variando lo spessore dello strato di fosfori è inoltre possibile modificare tali spettri in modo da ottimizzare l'efficienza luminosa e l'indice CRI.

Osservando infatti lo schema di Figura 5.13 si può notare come la radiazione risultante abbia coordinate nella zona bianco-bluastro, fatto che si può verificare immediatamente osservando la luce emessa dal dispositivo (Figura 5.14).

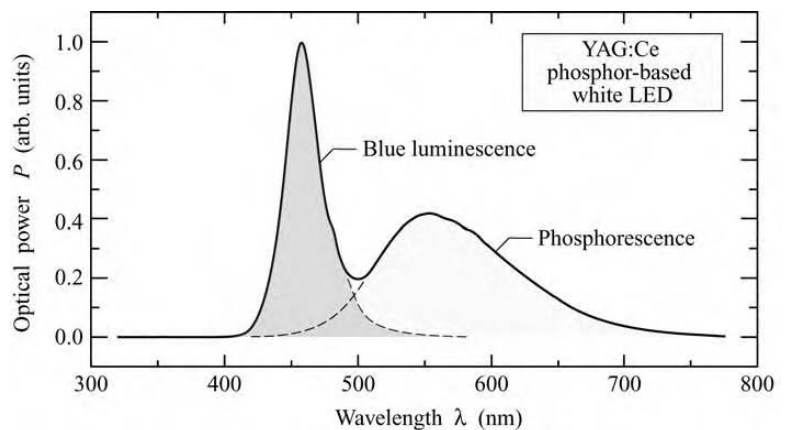


Figura 5.12: Spettro di emissione di un LED a luce bianca (radiazioni blu e fosfori)

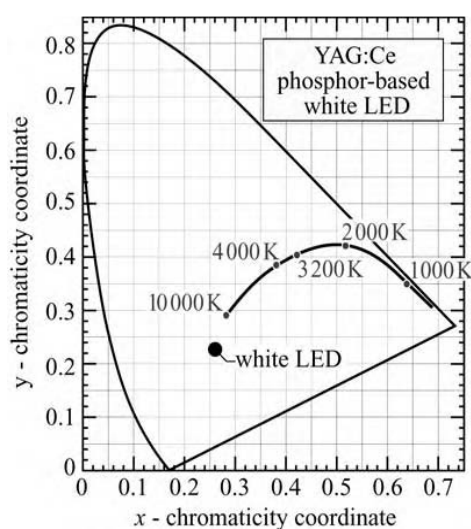


Figura 5.13: Coordinate cromatiche della radiazione risultante



Figura 5.14: Luce emessa da un LED a radiazione blu con l'utilizzo di fosfori

Per migliorare lo spettro della radiazione emessa in termini di indice CRI, si può aggiungere al dispositivo uno strato di fosfori supplementare, che se eccitati da radiazioni blu con $\lambda = 460\text{nm}$ emettono radiazioni aventi lunghezza d'onda di picco $\lambda_{\text{peak}} = 655\text{nm}$ con larghezza spettrale elevata.

Di conseguenza, l'emissione risulta spostata nella gamma del rosso in modo da ridurre il picco della componente blu/stra e ottenere uno spettro più omogeneo con meno discontinuità, fatto che si traduce immediatamente in un indice CRI molto elevato (Figura 5.15). LED basati su questa tecnologia vengono detti High CRI LED.

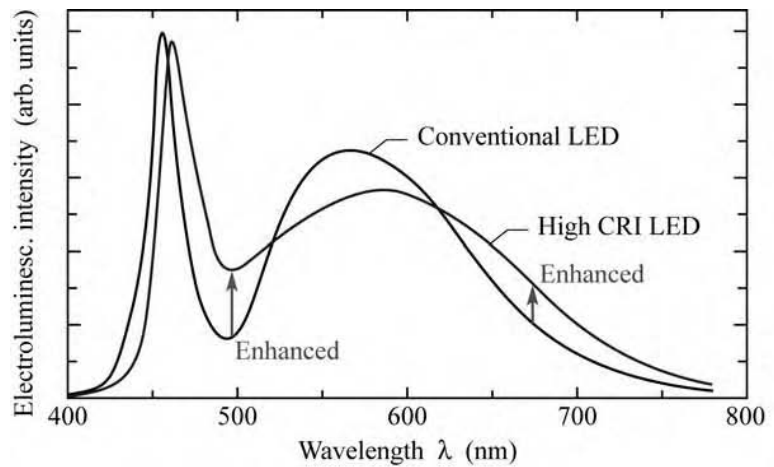


Figura 5.15: Spettro di emissione di un High CRI LED

Anche se per la produzione industriale dei LED si impiegano macchinari altamente automatizzati il processo di fabbricazione e di applicazione dei fosfori è molto delicato e passibile di errori, con la conseguenza che in un lotto di LED ogni componente presenterà caratteristiche diverse, anche minimamente, da tutti gli altri dello stesso lotto.

In pratica ogni esemplare prodotto presenta delle variazioni in termini di proprietà elettro-ottiche intorno a valori medi comuni.

Nell'impossibilità di garantire una perfetta uguaglianza della proprietà dei LED fabbricati, i produttori adottano sistemi di classificazione o binning per intervalli di tolleranza: per le proprietà elettriche si indicano due limiti (minimo e massimo) che determinano un bin della tensione di polarizzazione.

Per le proprietà ottiche il bin è definito da un'area a quattro lati nel diagramma cromatico CIE, dove ogni area ha quattro vertici di cui sono specificate le coordinate cromatiche.

La Figura 5.16 indica una possibile suddivisione in bin per LED "cold white".

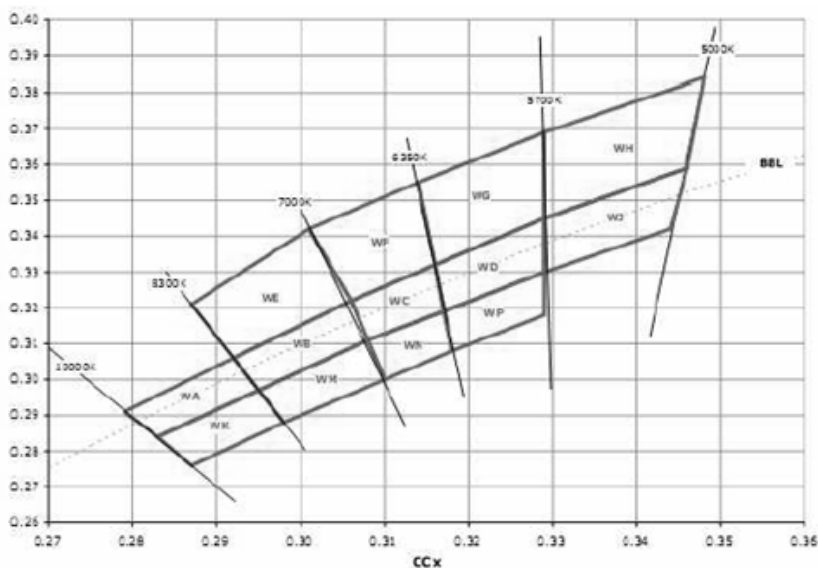


Figura 5.16: Aree di binning per la classificazione cromatica dei LED

6. L'illuminazione tramite sorgenti LED a luce bianca

6.1 Le lampade a LED (caratteristiche elettriche e ottiche)

I LED utilizzati per l'illuminazione, ossia i "LED di potenza" (Power LED) differiscono dai normali "LED di segnalazione" proprio per la loro funzione di sorgente luminosa; essi infatti emettono luce sufficiente per molte applicazioni come l'illuminazione di interni (uffici, case), segnaletica (semafori, campo automobilistico) ed illuminazione di esterni dai piccoli giardini alle piazze e alle strade.

Il colore del LED per illuminazione è classificato in Warm White, Natural White e Cold White. I Power LED "Cold White" emettono una luce con temperatura di colore tipica di 5600 K molto indicata per applicazioni esterne; i Power LED "Warm White" invece emettono una luce molto più calda, con una temperatura di colore media di 3250 K con un CRI pari a 80, adatti per applicazioni d'interno e dovunque ci sia la necessità di evidenziare i colori in maniera viva e brillante.

I Power LED "Natural White", nascono da un compromesso tra luminosità, temperatura di colore e CRI dei due tipi precedenti e sono indicati per abbinamenti a sorgenti luminose di tipo Warm e Cold White già presenti nell'ambiente di esercizio.

I singoli Power LED hanno solitamente potenze di 1W, 2W, 5W; vi sono però prodotti detti High Power LED che possono raggiungere potenze di 10W, 20W e addirittura 100W.

Queste grandi potenze sono ottenute raggruppando LED di minor potenza in un piccolo circuito stampato; ad esempio l'High Power LED da 100W (Figura 6.1) è ottenuto riunendo 100 Power LED da 1W in una finestra di soli 4cm². In questo modo si possono raggiungere intensità di emissione luminosa dell'ordine di 5000/6000 lm con una temperatura di colore di 6500K a fronte però di svantaggi quali la difficoltà di smaltimento del calore vista la piccola superficie del prodotto e l'alta corrente di alimentazione di circa 3500mA.

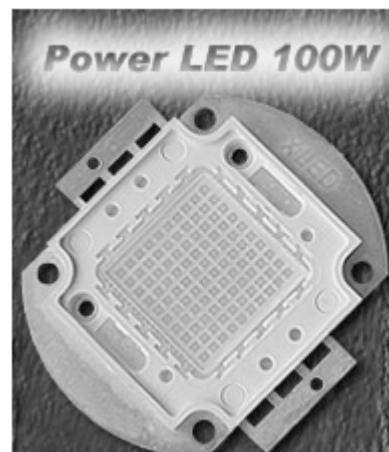


Figura 6.1

I Power LED con potenze di 1W e 2W costituiscono l'unità base con la quale vengono costruiti la maggior parte dei dispositivi di illuminazione allo stato solido; di seguito ne vengono riportate le caratteristiche più rilevanti.

- LED 1W:

Tensione di alimentazione nominale: 1,5 - 3,5 V

Corrente di Alimentazione nominale: 350mA cc

Intensità luminosa: 50 - 80 lm (l'intensità luminosa dipende dal colore stesso del LED):

Bianco 60 - 80 lm

Bianco Warm 55 - 75 lm

Blu 18 - 22 lm

Giallo 35 - 40 lm

Verde 55 - 65 lm

Rosso 35 - 40 lm

- LED 2 W:

Tensione di alimentazione nominale: 1,5 - 3,5 V

Corrente di alimentazione nominale 700mA cc

Intensità luminosa: 100 - 130 lm (l'intensità luminosa dipende dal colore stesso del LED):

Bianco 130 - 150 lm

Bianco Warm 120 lm

Blu 26 - 30 lm

Giallo 70 - 80 lm

Verde 100 - 120 lm

Rosso 65 - 75 lm

In commercio esistono lampade per l'illuminazione di interni costituite da un singolo LED da 2W come la "NOVALLURE 2W" prodotta dalla Philips.

Tensione di alimentazione: 230 - 240V

Potenza 2W

Durata di vita media 15000 hr

Colore Bianco Warm

Temperatura di colore 3000K

Indice di resa cromatica 80

Flusso luminoso 50 lm

Efficienza luminosa 25 lm/W



Per migliorare le caratteristiche, come accennato prima, bisogna utilizzare più LED per la costruzione delle lampade stesse in modo da aumentarne la potenza luminosa.

Data la particolare caratteristica dei LED di avere un angolo di emissione molto stretto sono presenti diversi tipi di lampada in base alle applicazioni: lampade a bulbo e lampade Spot.

Le lampade a bulbo consentono l'irradiazione della luce in tutte le direzioni ed essendo alimentabili direttamente con la tensione di rete, sono una valida alternativa alle lampade di uso comune.

Le lampade Spot, invece, presentano un fascio di luce stretto ma molto intenso; avendo tutte le caratteristiche dei LED, si ha che esse generano una luce priva di raggi UV e infrarossi e quindi ottime per l'illuminazione di oggetti sensibili al calore (alimenti, dipinti, materiali organici..).

Un esempio di lampada LED a bulbo è data dalla Philips MASTER LEDbulb A60, lampada da 7W di colore bianco caldo (Warm White) caratterizzata da:

Tensione di alimentazione: 230V

Potenza 7W

Durata di vita media 30000 hr

Colorazione Warm White

Temperatura di colore 3000K

Flusso Luminoso 400 Lm

Indice di resa cromatica 80

Efficienza luminosa 57 Lm/W



Da notare l'incremento del flusso luminoso dovuto all'aggregazione di più Power LED nella stessa lampada.

6.2 Confronto energetico ed economico tra le lampade tradizionali e le lampade LED per l'illuminazione domestica

I prodotti fin qui esposti sono adatti ad applicazioni di illuminazione di potenza modesta, come l'illuminazione domestica di interni ed esterni, e perciò validi sostituti di lampadine ad incandescenza, alogene e fluorescenti, le cui caratteristiche più rilevanti sono trattate di seguito al fine di operare un'analisi comparativa in termini energetici ed economici della tecnologia LED rispetto alle sorgenti di illuminazione comuni.

La lampada ad incandescenza è una sorgente luminosa in cui la luce viene prodotta per effetto Joule dal riscaldamento (fino a circa 2700 K) di un filamento di tungsteno attraversato da corrente elettrica. E' caratterizzata da un basso rendimento, infatti si ha che solo il 5% dell'energia viene convertita in luce, mentre il resto viene perso in calore.

Presenta quindi una bassa efficienza luminosa (8-15 lm/W) e una vita limitata a 1000-1500 ore di funzionamento a causa della continua degradazione del filamento. E' tuttavia caratterizzata da un'ottima resa dei colori (CRI=100), assenza di apparecchiature ausiliarie per l'accensione ed un costo basso.

La lampada alogena è una particolare lampada ad incandescenza, in cui al gas contenuto nel bulbo viene aggiunto iodio, kripton, e a volte xeno per permettere il riscaldamento del filamento fino a oltre 3000 K, in modo da aumentare sia l'efficienza luminosa fino a valori di 16/25 lm/W che la temperatura di colore e la durata, la quale può arrivare alle 2000-3000 ore di funzionamento.

La lampada fluorescente, invece, è costituita da un tubo di vetro al cui interno è dapprima praticato il vuoto, poi introdotto un gas nobile (argon, xeno, neon, o kripton) a bassa pressione ed una piccola quantità di mercurio liquido, che in parte evapora mescolandosi al gas nobile. Per accendersi ha bisogno di una tensione di innesco elevata che si crea grazie allo starter e di un dispositivo (reattore) che limiti la corrente di funzionamento. E' caratterizzata da un'efficienza luminosa più alta rispetto alle lampade viste prima (40/90 lm/W), una durata di funzionamento media che va da 5000-6000 ore per le lampade fluorescenti compatte alle 12000-15000 ore per quelle tradizionali a tubo. A differenza delle altre lampade si ha che la durata di funzionamento è fortemente influenzata dal numero di accensioni e spegnimenti; inoltre il flusso luminoso emesso decade con il passare del tempo variando quindi l'efficienza luminosa.

Nella tabella seguente vengono riassunte le caratteristiche principali delle sorgenti d'illuminazione comuni e a LED.

	INCANDESCENZA	ALOGENA	FLUORESCENTE COMPATTA	LED
Potenza [W]	40	28	10	7
Flusso luminoso [lm]	420	325	550	400-500
Efficienza luminosa	10	12	55	64
Temperatura di colore [K]	2650	2800	2500	Cold White 6000 Warm White 3000
CRI	100	100	85	75-80
Durata di vita [h]	1500	2000	15000	30000

Dai valori riportati in tabella si può osservare che le lampade a LED assorbono meno potenza a parità di flusso luminoso emesso, sono caratterizzate quindi da un'alta efficienza luminosa; inoltre presentano una durata di vita assai maggiore rispetto a tutte le altre concorrenti.

Fin qui si può comprendere come tale tecnologia presenti prestazioni assai migliori rispetto a qualsiasi altra sorgente luminosa, perfino contro le diffusissime lampade fluorescenti compatte (cosiddette a risparmio energetico).

Naturalmente tutti questi benefici "si pagano" con un costo d'acquisto elevato; nella tabella seguente sono riportati i costi d'acquisto delle lampade precedentemente considerate, insieme a parametri come il costo annuo ed il consumo annuo delle singole sorgenti in modo da operare un confronto economico tra le tecnologie.

Per tale analisi viene considerato un tempo di funzionamento giornaliero di 8 ore (2920 ore annue), vengono escluse rotture o malfunzionamenti ed infine viene fissato un costo dell'energia elettrica pari a 0,20 €/kWh.

	INCANDESCENZA	ALOGENA	FLUORESCENTE COMPATTA	LED
Potenza [W]	40	28	10	7
Flusso luminoso [lm]	420	325	550	400-500
Durata di vita [h]	1500	2000	15000	30000
Costo acquisto [€]	2	4	5	35
Anni di funzionamento (2920 h/anno)	0.51	0.68	5.14	10.27
Costo annuo [€/anno]	3.92	5.88	0.97	3.41
Consumo annuo [€/anno]	23.36	16.35	5.84	4.08
Costo totale annuo (Costo+Consumo annuo) [€/anno]	27.28	22.23	6.81	7.49

Dall'analisi dei costi e dei consumi si può facilmente notare che le lampade ad incandescenza ed alogene, risultano essere molto più costose rispetto a lampade a LED o alle più comuni fluorescenti compatte.

Da una prima analisi si può arrivare alla conclusione che le lampade fluorescenti risultano essere le più convenienti in termini di costi, ma bisogna ricordare che esse presentano un notevole decadimento del flusso luminoso con il passare delle ore di funzionamento.

Va ricordato però che l'illuminazione LED è ancora agli inizi e presenta ancora un largo margine di sviluppo a differenza delle altre tecnologie che sono ormai arrivate "al capolinea", basti notare di come abbassando di qualche euro il costo d'acquisto della lampada a LED, questa diventi già più conveniente rispetto a qualsiasi altra tecnologia.

Allargando lo sguardo ad applicazioni luminose di entità più considerevole ci si ferma davanti all'opportunità di convertire tutto il sistema di illuminazione stradale alla nuova tecnologia LED tenendo ben presente i benefici e problemi che tale tecnologia presenta.

6.3 L'illuminazione stradale a LED

Fino a pochi anni fa, i LED venivano usati nell'impiego pubblico solo come sostitutivo alle lampade dei semafori, data la scarsa necessità di manutenzione e l'alta visibilità specialmente in giornate di sole.

Recentemente, grazie agli ultimi studi condotti in materia, si è arrivati alla possibilità di applicare tale tecnologia anche nell'utilizzo dell'illuminazione stradale.

Prima di analizzare le soluzioni LED per la pubblica illuminazione vengono analizzate le sorgenti di illuminazione stradale tutt'ora impiegate, quali: lampade a vapori di mercurio, lampade a vapori di alogenuri metallici e lampade a vapori di sodio ad alta e bassa pressione.

6.3.1 Proprietà delle comuni sorgenti di illuminazione stradale

La tecnologia delle lampade a scarica ad alta intensità è simile a quella fluorescente, differenziandosi comunque da queste per le dimensioni e i pesi molto contenuti.

In linea di principio sono costituite da tubo in vetro resistente alle alte temperature riempito di gas, nel quale viene generato tra due elettrodi un arco che stimola la produzione di energia radiante.

Esistono tre tipi principali di lampade a scarica ad alta intensità: a vapori di mercurio, ad alogenuri metallici e al sodio. I nomi si riferiscono appunto agli elementi metallici presenti nel gas in cui scocca l'arco: da essi dipendono le differenti caratteristiche cromatiche e l'efficienza della lampada. La più vecchia tecnologia di scarica ad alta intensità è quella delle lampade a vapori di mercurio, le quali producono energia sia visibile che ultravioletta e richiedono un bulbo esterno in grado di filtrare la radiazione UV (il bulbo esterno è riempito da un gas inerte, in grado di trattenere le radiazioni ultraviolette).

Una lampada a scarica a vapori di mercurio genera una luce ad elevata temperatura di colore con bassa resa cromatica; per abbassare la temperatura di colore e riportare entro limiti accettabili la resa cromatica, viene spesso utilizzato un rivestimento esterno di fosforo. Inoltre, le lampade a scarica ad alta intensità, richiedono un periodo di riscaldamento per produrre il flusso luminoso nominale: anche una momentanea perdita di potenza può rendere necessario il ravviamento del sistema e il riscaldamento, un processo che può richiedere anche alcuni minuti e quindi da evitarsi nel caso di illuminazione di strade ad alto fattore di pericolosità.

Si ha inoltre che tale sorgente emette luce a 360° e quindi di difficile distribuzione nella zona di interesse se non con delle apposite parabole, riducendo però il rendimento totale. Si ha quindi un grande inquinamento luminoso che attualmente si cerca di ridurre il più possibile.

In Figura 6.2 è illustrata una lampada a vapori di mercurio e le principali caratteristiche.

Efficienza luminosa: 30-60 lm/W
Temperatura di colore: 2900-4200 K
Durata di vita: 10000 h



Figura 6.2: Lampada a vapori di mercurio

Le lampade a vapori di alogenuri sono costruttivamente simili a quelle a vapori di mercurio e analogo è il principio di funzionamento: si differenziano per il tipo di elementi contenuti nel tubo di scarica e per la forma e la finitura dell'ampolla. Nel tubo di scarica delle lampade ad alogenuri, oltre al mercurio, vengono introdotti degli ioduri di sodio, di tallio e di indio, in modo da migliorare la resa dei colori e aumentare l'efficienza luminosa.

Oltre all'alimentatore, necessario per la stabilizzazione della scarica, queste lampade generalmente richiedono l'accenditore, che all'atto dell'accensione invia alla lampada impulsi di tensione dell'ordine da 4 a 5kV.

Avendo un flusso luminoso molto concentrato, queste lampade consentono di realizzare impianti di illuminazione con potenze installate più basse rispetto a quelle che comporterebbe l'adozione di altri tipi di lampade.

Il principale svantaggio è dato dalla lentezza in fase di accensione: impiegano infatti circa 7 minuti per arrivare a pieno regime e in caso di spegnimento e di riaccensione a caldo, i tempi aumentano ulteriormente, fino 10 minuti per recuperare interamente il flusso luminoso.

In Figura 6.3 è illustrata una lampada a vapori di alogenuri e le principali caratteristiche.

Efficienza luminosa: 40-100 lumen/watt

Vita media: 6.000-20.000 ore

Indice di resa cromatica: 65-90

Temperatura di colore: 4.000-6.000 K



Figura 6.3: Lampada a vapori di alogenuri

Le lampade ai vapori di sodio si distinguono in lampade ai vapori di sodio ad alta pressione e lampade ai vapori di sodio a bassa pressione.

La tecnologia ad alta pressione rappresenta ormai lo standard per l'illuminazione stradale mentre quella a bassa pressione viene utilizzata in tutti quei punti in cui il risparmio energetico rappresenta una priorità rispetto all'indice di resa cromatica.

Il principio di funzionamento di tali lampade è simile a quello delle lampade a vapori mercurio e si ha che l'innesco è facilitato da piccole quantità di neon e argon.

Nelle lampade a bassa pressione il valore ottimale della pressione del vapore di sodio è circa 0.4 Pa la quale viene ottenuta mantenendo la temperatura della parete del tubo di scarica intorno ai 260°C (in corrispondenza della quale l'efficienza della lampada è massima).

Per questo tipo di lampada non ha senso parlare di resa cromatica, in quanto la percezione dei colori è praticamente nulla; la qualità della luce prodotta è scarsa, di tipo monocromatica nel campo spettrale del giallo che rende la lampada poco adatta per l'illuminazione di interni (visto che non consente la distinzione dei colori). Sono invece utilizzate per impianti stradali, industriali e di sicurezza data l'elevata efficienza luminosa. Anche queste lampade necessitano di un sistema di accensione e mantenimento in funzione e l'emissione luminosa di regime si ottiene dopo circa 10 minuti dall'accensione. In Figura 6.4 è illustrata una lampada ai vapori di sodio a bassa pressione e le principali caratteristiche.

Efficienza luminosa: 125-200 lm/W

Indice di resa cromatica: 0

Vita media: 10.000-12.000 ore

Temperatura di colore: 1.800 K

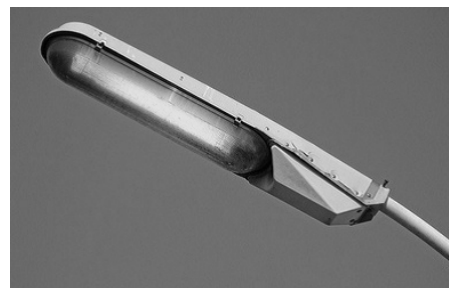


Figura 6.4: Lampada ai vapori di sodio a bassa pressione

Le lampade al sodio ad alta pressione (Figura 6.5) rappresentano oggi lo standard per l'illuminazione stradale ed industriale, grazie principalmente all'elevata efficienza luminosa; si possono dividere in due grandi categorie:

- Lampade al sodio di tipo *standard* (pressione del sodio di 10KPa) caratterizzate da:
 Efficienza luminosa: 65 - 125 lm/W (a seconda della potenza)
 Indice di resa cromatica: 20
 Vita media: 12.000-20.000 h
 Temperatura di colore: 2000K

- Lampade al sodio *a resa del colore migliorata* (pressione del vapore di sodio di 40KPa) caratterizzate da:
 Efficienza luminosa: 40 - 80 lm/W (a seconda della potenza)
 Indice di resa cromatica: 60
 Vita media: 12.000-20.000 h
 Temperatura di colore: 2150K



Figura 6.5: Lampada ai vapori di sodio ad alta pressione

Si può notare come l'aumento della pressione interna porta da un lato il miglioramento delle caratteristiche cromatiche, ma dall'altro una diminuzione dell'efficienza.

Le lampade a vapori di sodio ad alta pressione sono ritenute generalmente adatte solo per impieghi in cui è fondamentale avere un'elevata economicità di servizio a scapito della qualità della luce.

6.3.2 Proprietà delle sorgenti di illuminazione stradale a LED

Come già detto in precedenza la tecnologia ad oggi più utilizzata per l'illuminazione pubblica è quella ai vapori di sodio, ma la tecnologia a LED sta via via diventando una valida concorrente. Un apparecchio illuminante stradale a LED si compone di diverse parti (che generalmente non sono presenti nei corrispettivi apparecchi a lampade a scarica); la differenza fondamentale sta nell'organizzazione delle singole sorgenti luminose che, negli apparecchi tradizionali, è costituita dalla vera e propria lampadina, mentre in quelli a LED è costituita da una matrice fissa di LED.

In Figura 6.6 è illustrata la struttura di un apparecchio illuminante stradale a LED.

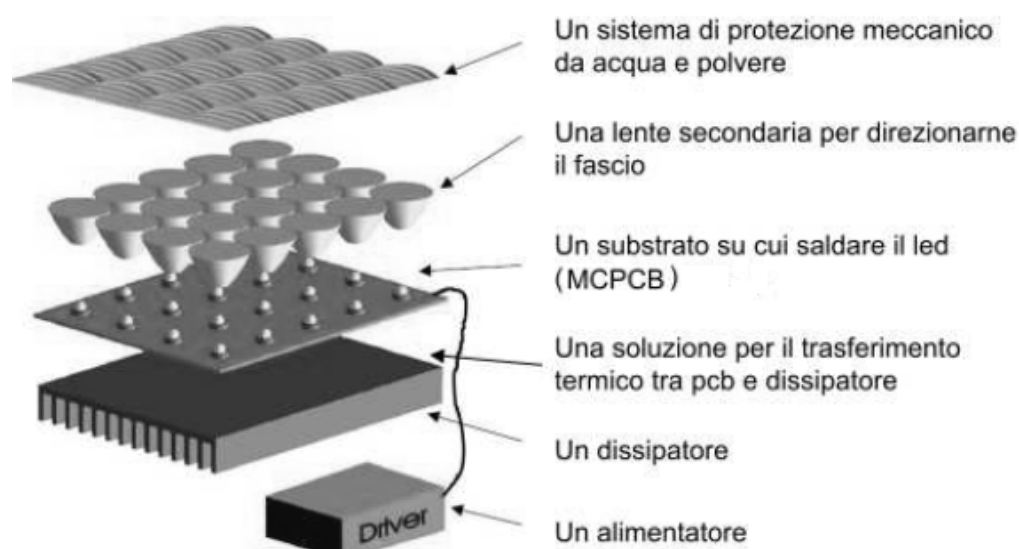


Figura 6.6: Struttura di un apparecchio illuminante stradale a LED

Si può quindi notare l'assenza di componenti dedicati alla diffusione del flusso luminoso integrati nella carena: il gruppo ottico di un apparecchio di illuminazione a LED è formato dai LED stessi, disposti in vario modo, e da delle lenti secondarie in grado di direzionare il fascio luminoso (la lente primaria fa parte del package del Power LED).

Un'altra differenza sta nella presenza di sistemi di dissipazione termica più o meno sofisticati, situati generalmente nella parte superiore della carena della lampada, indispensabili per ridurre le temperature di esercizio dei diodi; tali sistemi non sono necessari negli apparecchi con lampade a scarica, in quanto l'ambiente in cui viene alloggiata la lampada è sufficiente alla dissipazione del calore prodotto.

Ogni componente dell'apparecchio illuminante influisce in maniera sostanziale sul funzionamento, nonché sulle prestazioni e durata dell'intero sistema.

Come già discusso nei precedenti capitoli i LED sono componenti a bassissima tensione, che devono essere alimentati in corrente continua, livellata e stabilizzata attraverso un alimentatore elettronico appositamente costruito.

Per assicurare un lunga durata di vita dell'intero sistema è necessario che l'alimentatore sia caratterizzato da un fattore di mortalità molto bassa; ad oggi gli alimentatori elettronici hanno una mortalità media che va dall' 1% al 5% ogni 10000 ore di funzionamento.

Si può ben notare che nelle 50000 ore di funzionamento attese per le sorgenti LED ci sarà un tasso di mortalità degli alimentatori dal 5% al 25%, diminuendo così la durata di vita dell'apparecchio illuminante e quindi aumentando gli interventi di manutenzione.

Inoltre la durata di vita attesa per un alimentatore elettronico decresce in maniera esponenziale all'aumentare della temperatura di esercizio; poiché i LED come già discusso in precedenza generano molto calore, occorre che l'alimentatore sia adeguatamente distanziato e separato dalla zona in cui essi sono alloggiati per evitare malfunzionamenti.

Infine va notato che, nella maggioranza dei prodotti presenti sul mercato, l'efficienza degli alimentatori per LED, definita come rapporto fra potenza assorbita dalla lampada e potenza totale assorbita dal sistema, difficilmente è superiore a $\eta = 0.88$, valore indicato come standard per potenze nominali fino a 100W dal regolamento CE in materia di progettazione ecocompatibile. Questo causa un maggior consumo di potenza da parte dell'intero sistema a parità di flusso luminoso erogato.

Le sorgenti luminose a LED in realtà sono più "fredde" delle sorgenti a scarica tradizionali, le quali possono raggiungere valori ben al di sopra dei 2000°C durante il funzionamento. Come già descritto in precedenza, questo non esenta i LED da problemi di dissipazione termica.

Il gap fra temperatura di giunzione e temperatura ambiente si aggira attorno ai 50°C – 70°C e la potenza viene smaltita tramite appositi dissipatori alettati affiancati alla piastra in cui sono saldati i LED.

Questa disposizione genera due aree estremamente sensibili che vanno curate nell'assemblaggio dell'intero sistema. La prima riguarda la saldatura del diodo LED con la piastra sottostante; infatti una saldatura difettosa può pregiudicare il corretto trasferimento di calore e così ridurre la durata dell'intero apparecchio. La seconda riguarda il collegamento fra piastra e dispositivo di dissipazione; anche in questo caso le connessioni devono essere precise ed affidabili.

Già a questo punto si può capire come apparecchi di illuminazione a LED necessitano di componenti di alta qualità, nonché di un assemblaggio preciso ed accurato; proprietà che naturalmente influiscono sul costo del prodotto finale.

Gli apparecchi per l'illuminazione stradale inoltre devono soddisfare requisiti molto stringenti dal punto di vista fotometrico; il flusso luminoso infatti deve essere indirizzato con precisione nelle direzioni ottimali per la visibilità sulla strada e deve invece essere schermato nelle direzioni che possono procurare fastidio ai conducenti e in modo da ridurre l'inquinamento luminoso.

Spesso gli apparecchi tradizionali prevedono una certa possibilità di modificare le caratteristiche di emissione grazie a diverse posizioni di montaggio della lampada rispetto al riflettore; questa possibilità è preclusa agli apparecchi a LED, per i quali i produttori devono prevedere un modello diverso per ogni singola applicazione. Questo limite incide in maniera pesante sull'opportunità di prefabbricazione dei componenti e quindi sui costi; per ovviare a questo inconveniente e garantire al tempo stesso un'ottima resa i produttori di apparecchi a LED adottano prevalentemente tre strategie (Figura 6.7).

La prima soluzione (Figura 6.7a) consiste nel predisporre una piastra di LED in cui ognuno di questi abbia una diversa inclinazione che possa portare ad un "mosaico di punti luce" ottimale a terra; questa soluzione permette di sfruttare al massimo le potenzialità dei LED, senza ridurre l'intensità luminosa con gruppi ottici correttivi supplementari.

Tale tecnica però è molto dispendiosa in

quanto ogni piastra deve essere un pezzo unico appositamente sagomato con diverse inclinazioni all'interno; inoltre ogni diversa configurazione dell'ottica va pensata come un nuovo "articolo" da mettere in produzione con ricadute economiche notevoli, poiché è possibile serializzare solo un discreto numero di configurazioni.

La seconda soluzione (Figura 6.7b), più economica, consiste nel predisporre diverse file di LED su una piastra "standard" orizzontale e successivamente applicare a questi differenti lenti e microlenti, che hanno il compito di diffondere la luce in modo appropriato; il prezzo contenuto è dovuto alla grande flessibilità data dall'utilizzo di diverse lenti applicate su una piastra di base comune a tutti i modelli.

Lo svantaggio che si ha è la riduzione del flusso luminoso dovuta all'applicazione di lenti sopra ogni LED.

La terza soluzione (Figura 6.7c) consiste sempre nel predisporre diverse file di LED su una piastra "standard" orizzontale, ma anziché usare microlenti viene costruito attorno ad ogni LED un piccolo rifrattore in grado di definire una precisa curva fotometrica come per una lampada tradizionale.

Anche in questo caso il prezzo contenuto è dovuto alla grande flessibilità, ma il rendimento dell'ottica addizionale rimane di poco superiore a quello di un'ottica per apparecchi tradizionali. Queste soluzioni sono strettamente legate alle caratteristiche del diodo LED, che, a seconda del produttore, presenta dimensioni ed ottiche diverse; quindi una volta definita la forma della parte



Figura 6.7: Dall'alto (6.7a) soluzione a piastra di LED a diversa inclinazione; in mezzo (6.7b) soluzione a piastra standard e lenti ausiliarie; sotto (6.7c) soluzione a piastra standard e rifrattore a singolo LED

ottica, questa rimarrà ancorata ad un determinato tipo di LED che difficilmente sarà possibile sostituire, non solo con uno di marca diversa ma anche con le future evoluzioni dello stesso LED.

In particolare ogni apparecchio illuminante a LED è un prodotto unico, non replicabile e generalmente neppure aggiornabile, anche se di recente alcuni produttori hanno proposto sistemi con ottiche ed alimentatori intercambiabili.

Un altro fatto che merita una riflessione riguarda le dimensioni: generalmente si pensa ai LED come sorgenti di illuminazione di dimensione ridotta che possono trovare impiego in tutte quelle applicazioni in cui le altre sorgenti di illuminazione tradizionali risultano ingombranti. Questo discorso è vero finché si parla di applicazioni in cui sia richiesto un flusso luminoso ottenibile attraverso pochi LED; in applicazioni come l'illuminazione stradale sono richiesti alti valori di intensità luminosa ottenibili anche con centinaia di LED; una delle principali caratteristiche del LED, la compattezza, si perde così nell'assemblaggio di sistemi di illuminazione a LED grandi due volte o più un apparecchio illuminante tradizionale.

Infine va ricordato come l'ottica di un apparecchio di illuminazione a LED sia costituita da più diodi, ognuno dei quali contribuisce all'illuminamento di una certa parte della sede stradale; nel caso che anche un singolo LED si rompa oppure riduca in maniera sostanziale il proprio flusso luminoso, la lampada non si spegne e continua a funzionare e ad illuminare anche se con prestazioni minori; è anche vero che nel caso in cui sia richiesta un'illuminazione eccellente l'apparecchio non può più sopperire al compito richiesto in quanto generante una fotometria incompleta. Attualmente, vista l'impossibilità di una sostituzione immediata dei singoli LED, questo si traduce in una sostituzione completa dell'intero gruppo illuminante.

A proposito di proprietà fotometriche, dalle ultime scoperte scientifiche in campo percettivo (in particolar modo dall'affermarsi della teoria della visibilità con luce bianca, che si basa sul presupposto che a seconda della luminanza in cd/mq utilizziamo o non utilizziamo tutti gli apparati recettivi di cui il nostro occhio è dotato) è emerso che sono da privilegiare per l'illuminazione stradale le sorgenti luminose con emissione spettrale prevalente nella banda dei blu, senza ricorrere a livelli di luminanza elevati. Confrontando le emissioni delle principali sorgenti utilizzate nell'illuminazione stradale si ha che nelle lampade al sodio ad alta pressione buona parte dell'emissione luminosa cade nella zona del rosso, ben al di fuori del picco di sensibilità, così come per il sodio a bassa pressione. Anche se le sorgenti a ioduri metallici si avvicinano molto di più a tale valore, la migliore performance è quella del LED; un'illuminazione stradale con questo tipo di sorgente consente dunque di abbassare le luminanze e migliorare i tempi di reazione dell'occhio umano.

Come si può ben intuire questa tecnologia offre pregi e difetti che vanno valutati per ogni singola applicazione; inoltre, data la moltitudine di apparecchi illuminanti e sorgenti LED oggi presenti sul mercato, occorre definire un criterio di valutazione che possa accorpate gli elementi che concorrono ad una buona illuminazione, in quanto fattori come il rendimento e l'efficienza luminosa delle lampade danno informazioni parziali.

In particolare il rendimento dell'intera armatura stradale, calcolato come rapporto fra flusso luminoso emesso da quest'ultima e flusso originariamente emesso dalle lampade "nude", non tiene conto né dell'eventuale flusso luminoso disperso in altre direzioni (verso l'alto), e quindi non utilizzato per l'illuminazione della sede stradale, né della potenza assorbita dall'apparecchio.

D'altra parte l'efficienza luminosa delle lampade, calcolata come rapporto tra flusso luminoso emesso dalla lampada stessa e potenza elettrica dissipata, è da ritenersi un'efficienza nominale in quanto non tiene conto della reale potenza assorbita dalle altre componenti elettroniche presenti all'interno del sistema (alimentatori) e non fornisce indicazioni sul flusso luminoso disperso a causa di riflessioni interne e lenti.

Per questi motivi viene utilizzato un coefficiente globale che tiene conto del flusso luminoso

utile emesso e della reale potenza assorbita dall'intero sistema.

Generalmente per un apparecchio di illuminazione stradale è fondamentale che tutto il flusso sia rivolto verso la metà inferiore della sfera luminosa; per questo motivo viene definito un parametro detto *Dlor* che esprime il rendimento del flusso luminoso rivolto verso il basso.

In base a queste considerazioni, viene definito rendimento globale di un sistema di illuminazione stradale a LED η_a :

$$\eta_a = \frac{\Phi_{\text{sorgente}} \times Dlor}{W} = [\text{lm/W}]$$

dove Φ_{sorgente} è il flusso luminoso della sorgente, *Dlor* è il parametro discusso in precedenza e W_{reali} è il consumo dell'intero sistema di illuminazione.

A titolo d'esempio un apparecchio di illuminazione tradizionale con lampada SAP (vapori di Sodio ad Alta Pressione) di ultima generazione a 100W con flusso luminoso pari a 10700lm, alimentatore elettronico con rendimento di 0.93 e *Dlor* del 80 % ha un rendimento globale di:

$$\eta_a = \frac{10700 \times 80\%}{108} = 79 \text{ lm/W}$$

Considerando invece un apparecchio per illuminazione stradale costituito da 100 LED alimentati a 350 mA con un flusso luminoso totale di 10000 lm, un consumo di 127W e un *Dlor* pari a 85,7% (lampada con ottiche applicate) si ha un rendimento globale:

$$\eta_a = \frac{10000 \times 85.7\%}{127} = 67 \text{ lm/W}$$

Per un altro apparecchio illuminante a 84 LED alimentati a 350mA con flusso luminoso totale di 6417 lm, consumo di 110W e *Dlor* del 100% (lampada senza ottiche applicate) si ha:

$$\eta_a = \frac{6417 \times 100\%}{110} = 58 \text{ lm/W}$$

In base a queste considerazioni è possibile affermare che il rendimento di un apparecchio illuminante stradale a LED rimane leggermente al di sotto di un apparecchio tradizionale a scarica.

Il rendimento ovviamente non dà nessuna informazione su come si comporterà il sistema in una determinata installazione, tutto è legato alle caratteristiche distintive di ogni apparecchio di illuminazione e dalla particolare applicazione in cui verrà installato.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche più rilevanti di un prodotto per l'illuminazione stradale a LED:

CARECALED F1-220W

Tensione/Frequenza: 200 ~ 240V(AC) / 50 ~ 60Hz

Consumo: 220W \pm 10%

Flusso luminoso: > 17.500 lm

Temperatura colore: 3.500 - 5.100 K

Efficienza luminosa: > 80 lm/W

CRI: > 70

Durata > 50.000 h

Temperatura di esercizio: -30°C +50°C



6.4 Confronto energetico ed economico tra le lampade tradizionali e le lampade LED per l'illuminazione stradale

Per fare un quadro generale della situazione viene proposto un confronto in termini energetici ed economici tra le varie soluzioni per l'illuminazione stradale prendendo come valore comune un flusso luminoso emesso pari a circa 20000 lm (fonte ENEA).

In particolare vengono considerate lampade ai vapori di mercurio (VM), ai vapori di sodio ad alta (SAP) e bassa pressione (SBP), agli ioduri metallici (IM) ed infine LED.

Nella tabella seguente sono riportati i dati caratteristici per ogni tipo di sorgente luminosa considerata.

	VM	SAP	SBP	IM	LED
Potenza [W]	400	210	135	250	220
Flusso luminoso [lm]	22000	18000	22500	20000	>17500
Efficienza luminosa	55	86	167	82	80
Temperatura di colore [K]	4000	2000	2000	5200	5100
CRI	44	<25	0	90	>70
Durata di vita [h]	20000	14000	16000	12000	50000
Costo d'acquisto [€]	21.47	37.82	50.21	39.71	1500
Regolazione flusso luminoso	NO	NO	NO	PARZIALE	SI
Accensione [minuti]	5	5	10	7	0
Riaccensione [minuti]	10	10	15	12	0
Presenza Hg	SI	NO	NO	SI	NO

Dai valori riportati in tabella si può dedurre che la tecnologia che assorbe meno potenza ed emette un flusso luminoso maggiore, e quindi è caratterizzata da un'efficienza luminosa maggiore, risulta essere quella a vapori di sodio a bassa pressione.

Ricordando però che per la visione notturna sono da privilegiare emissioni luminose nella zona del bianco-blu si nota che le lampade agli ioduri metallici permettono una miglior visione in quanto la luce generata risulta essere più bianca rispetto alle altre tecnologie a confronto.

A proposito della qualità della luce emessa le tecnologie caratterizzate dai migliori indici di resa cromatica CRI sono le stesse lampade agli ioduri metallici e i LED di poco inferiori.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale si ha che sia i LED che le lampade ai vapori di sodio non presentano mercurio e quindi non sono pericolose né per l'ambiente né per l'uomo.

Infine si può notare come i LED siano caratterizzati da una durata di vita nettamente superiore a tutte le altre lampade, (circa 3 volte), inoltre il flusso luminoso può essere interamente regolato solo nelle lampade a LED, caratteristica che permette la gestione dell'impianto senza sprechi.

Accensione e riaccensione dopo lo spegnimento risultano istantanee solo nelle lampade a LED, altra caratteristica, specie la seconda, molto importante quando l'impianto risulta essere in funzione.

Da sottolineare il costo per l'acquisto dei vari apparecchi illuminanti. I più economici risultano essere quelli basati sui vapori di mercurio, con un costo pari a 21,47 € contro i "proibitivi" 1500 € di quelli con tecnologia a LED.

Di seguito viene proposto un confronto economico delle sorgenti di illuminazione precedentemente valutate in termini energetici.

Oltre al costo d'acquisto, infatti, vanno valutati altri parametri come il costo annuo ed il consumo annuo dell'apparecchio illuminante, i quali come si può ben capire dipendono fortemente, oltre che dalla durata di vita di quest'ultime, anche dal numero di ore al giorno di funzionamento.

Dato che le ore di funzionamento giornaliere di un impianto di illuminazione pubblica variano a seconda della stagione in cui ci si trova, facendo una media ponderata delle ore di funzionamento si ottiene un valore pari a 10 ore al giorno, il che comporta un funzionamento di 3650 ore annue.

Fissato tale valore si può calcolare, in base alla durata di vita, il numero di anni di funzionamento di ogni sorgente (in questa analisi generale si considera che il decadimento del flusso luminoso sia compreso nella soglia limite del 30% e che non ci siano guasti alle lampade). Per il calcolo del consumo annuo in termini di potenza viene fissato il prezzo del tutto indicativo di 0,20 €/kWh.

	VM	SAP	SBP	IM	LED
Potenza [W]	400	210	135	250	220
Flusso luminoso [lm]	22000	18000	22500	20000	>17500
Durata di vita [h]	20000	14000	16000	12000	50000
Costo acquisto [€]	21.47	37.82	50.21	39.71	1500
Anni di funzionamento (3650 h/anno)	5.48	3.84	4.38	3.29	13.70
Costo annuo [€/anno]	3.92	9.85	11.46	12.07	109.50
Consumo annuo [€/anno]	292	153.30	98.55	182.50	160.60
Costo totale annuo (Costo+Consumo annuo) [€/anno]	295.92	163.15	110.01	194.57	270.10

Da quanto riportato in tabella possiamo quindi concludere che l'utilizzo dei LED per l'illuminazione stradale risulta ancora alquanto sconsigliabile.

Essi risultano infatti più convenienti solo delle obsolete lampade ai vapori di mercurio, che ormai stanno via via scomparendo sia per via dell'impatto ambientale che per via dei costi di utilizzo.

Dai calcoli effettuati le lampade più convenienti risultano essere quelle ai vapori di sodio a bassa pressione, che però sono caratterizzate da un bassissimo CRI, che in certe situazioni potrebbe

compromettere la visione del guidatore, mettendone a rischio la sicurezza.

Le due tecnologie più convenienti risultano quindi essere le ormai note e consolidate lampade ai vapori di sodio ad alta pressione, che non presentano nemmeno rischi per l'ambiente, oppure le più recenti lampade a ioduri metallici, che hanno a favore il fatto di generare una luce bianca, migliorando quindi la visione notturna. Di contro però presentano una durata di vita ben inferiore rispetto alle altre.

Va detto però che il costo d'acquisto di 1500€ per la sorgente a LED riguarda l'intera armatura (lampada, ottiche, alimentatore) mentre i costi d'acquisto delle altre sorgenti riguardano la sola lampada. Ipotizzando un costo medio di 200€ per l'armatura, che risulta essere universale per tutte le sorgenti tradizionali, ed osservando che il guasto della sola lampada non pregiudica la sostituzione dell'intero sistema illuminante, a differenza degli apparecchi LED, si ha ancora che le lampade SAP sono ancora da preferirsi alla nuova "luce allo stato solido". Bisognerà attendere la completa entrata nel mercato della tecnologia LED affinché, con l'abbassarsi del costo d'acquisto, queste diventino a tutti gli effetti concorrenti alla tecnologia SAP in uso oggi.

7. Conclusioni in merito all'illuminazione a LED

Da quanto esposto precedentemente si può ben capire che l'illuminazione a LED sarà la soluzione del futuro, in grado di risolvere problemi in materia di inquinamento ambientale del nostro pianeta.

L'attenzione verso il rispetto dell'ambiente e la continua ricerca del risparmio energetico li rendono attualmente la miglior sorgente luminosa in questi campi. Inoltre, risultando ancora una tecnologia molto giovane rispetto alle altre, presentano enormi margini di crescita e di sviluppo. I LED infatti non contengono sostanze tossiche e nocive alla salute dell'uomo, degli animali e all'ambiente, a differenza di alcuni tipi di lampade tradizionali che contengono mercurio e altre sostanze pericolose.

Va ricordato inoltre che la Direttiva Europea 2002/95/CE RoHS vieta dal 1 luglio 2006 l'immissione sul mercato di apparecchiature elettriche ed elettroniche contenenti (esclusione fatta per limitate quantità) piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente ed altre sostanze.

In futuro non sono escluse direttive più stringenti e severe che porteranno alla scomparsa delle apparecchiature contenenti tali sostanze; a quel punto i LED diventeranno la sorgente luminosa d'eccellenza.

In materia di eco sostenibilità e sicurezza è da ricordare, vista la caratteristica alimentazione a bassissima tensione dei Power LED, che essi possono essere alimentati da batterie nei casi in cui sia assente la rete elettrica.

Basti pensare a tutti gli incroci e svincoli stradali in zone isolate che a causa della mancanza di una linea elettrica rimangono al buio o, nel migliore dei casi, dotati di una luce lampeggiante funzionante a batteria ricaricata durante il giorno da un impianto fotovoltaico.

Mediante l'uso dei LED è possibile sostituire la semplice luce lampeggiante con un vero e proprio impianto di illuminazione dell'intero incrocio o svincolo, aumentando notevolmente la sicurezza della circolazione stradale; infatti sono già presenti nel mercato apparecchi di illuminazione stradale a LED comprensivi di un proprio pannello fotovoltaico integrato, in modo da rendere l'intero sistema indipendente e senza bisogno di interlacciamenti.

Oltre alle comparazioni viste nei precedenti capitoli, l'innovativa tecnologia a LED di questi ultimi anni porta a innovazioni e soluzioni alternative che le lampade tradizionali non possono vantare, se non con compromessi, e su cui non può esserci competizione e paragone.

Infatti nessuna lampada tradizionale consente l'utilizzo dei colori nell'illuminazione, se non tramite l'utilizzo vetri colorati addizionali; nei LED invece il colore è una proprietà intrinseca ottenuta variando l'elemento drogante.

Dalle caratteristiche analizzate, come temperatura di colore, indice di resa cromatica, durata di vita e conseguenti costi di manutenzione, sicurezza, i LED risultano essere la migliore tecnologia ma, oltre alle valutazioni utili alla progettazione, bisogna valutare soprattutto i costi. Come dimostrato, specie se si tratta di illuminazione pubblica, i costi di acquisto delle lampade a LED risultano spropositati rispetto a quelli delle dirette concorrenti.

Diverso è il caso dell'illuminazione domestica di interni, in cui le lampade a LED risultano essere convenienti se paragonate alle ormai obsolete lampade ad incandescenza o alle lampade alogene. A fronte di un costo di investimento relativamente più elevato rispetto alle altre tecnologie, le lampade a LED presentano però una durata di vita ed un mantenimento del flusso luminoso migliori rispetto alle dirette avversarie, e ciò le rende una competitiva alternativa alle lampade fluorescenti, in impianti in cui il tempo di utilizzo risulti abbastanza elevato. Se inoltre si considera la possibilità di modificarne il colore e di direzionarne facilmente il flusso luminoso, tale tipologia di lampade risulta migliore in caso si voglia utilizzarle per un'illuminazione di arredamento e per la creazione di determinate atmosfere.

Concludendo si può dire che il LED è già un'ottima lampadina, ma perché diventi "LA lampadina" bisognerà lavorare essenzialmente in tre direzioni, che sono: la correzione della

temperatura di colore (per fare sì che la luce emessa sia simile a quella delle comuni lampade alle quali siamo abituati), l'aumento della resa luminosa (ciò riguarda le prospettive di utilizzo dei LED nei lampioni per l'illuminazione stradale) e la riduzione dei costi (una lampada a LED costa oggi, a parità di flusso luminoso emesso, circa 20 volte una lampadina a filamento). Quest'ultimo obiettivo sarà comunque centrato con l'incremento della produzione e delle vendite, in un orizzonte temporale di un paio d'anni.

Quanto al miglioramento dell'efficienza, Philips ha già raggiunto i 160 lm/W e non è escluso che nel giro di un paio d'anni si possano superare i 200 lm/W delle lampade attualmente più performanti (a vapori di sodio a bassa pressione). Allora nulla potrà più fermare l'avanzata dei LED.

Riferimenti

Bibliografia:

E. F. Schubert, Light Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006.

S. Nakamura and S. F. Chichibu, Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes, CRC PRESS, 2000

S.Winder, Power Supply for LED Drivers, Newnes, 2008

M.Karlen and James R.Benya, Lighting Design Basics, Wiley, 2004

Ecos Consulting, LED Lighting Technologies and Potential for Near-Term Applications, 2003

D.Scullino, Il LED e l'illuminazione, Sandit Libri, 2007

A.Zukauskas, Introduction to Solid State Lighting, Wiley, 2002

G.Forcolini, Illuminazione LED, Hoepli, 2008

Siti internet:

www.luxeon.com

www.lumileds.com

www.philips.com

www.osram.com

www.dialux.com

www.national.com/LED

www.enea.com

www.iesna.com

www.cree.com

www.sylvania.com

