



Agenzia Nazionale per le Nuove tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes)

F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA
Dipartimento di Fisica Tecnica



Report RdS/2010/238

TITOLO: STATO DELL'ARTE DEI LED (LIGHT EMITTING DIODES)

Autori: F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, (Dip. Fisica Tecnica, Università di Roma "Sapienza")

Giugno 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Tema: Simonetta Fumagalli, ENEA

CONTENUTI

Cap. I:

Evoluzione storica della tecnologia LED pag. 04

Cap. II:

Struttura e funzionamento dei LED pag. 08

Cap. III:

Tipologie di LED e loro caratteristiche pag. 19

Cap.IV:

Proprietà ottiche ed elettriche dei LED e metodi per misurarle pag. 30

Cap.V:

Punti di forza e di debolezza della tecnologia LED pag. 47

Cap. VI:

LED e ricerca pag. 57

Cap. VII:

LED e normativa pag. 65

Cap. VIII:

Campi di applicazione della tecnologia LED pag. 74

Cap. IX:

Considerazioni finali pag. 81

Bibliografia pag. 84

Capitolo I

Evoluzione storica della tecnologia LED

Dopo circa un secolo di rapido sviluppo, i LED (Light Emitting Diodes, “Diodi che emettono luce”) iniziano ad essere considerati pronti dalla comunità scientifica per sostituire le lampade a incandescenza e fluorescenti. La definizione dei fattori rilevanti che influiscono sulla qualità di queste nuove sorgenti rappresenta un aspetto chiave per la progettazione e la produzione di tali dispositivi elettronici. Le prospettive sono di grande interesse, soprattutto se si considera che il primo LED ad emissione luminosa fu introdotto solo nel 1962, ed era caratterizzato da un’emissione luminosa molto debole. Da quel momento, la costante implementazione della tecnologia LED ha prodotto miglioramenti incredibili in termini di efficienza luminosa, spettro di emissione, intensità, durata di vita, costo, affidabilità e potenzialità applicative (Fig. I.1a,b).

Lo sviluppo dei LED (Fig. I.2) è cominciato con dispositivi all’infrarosso e rossi realizzati con Arseniuro di Gallio (GaAs). I progressi nella scienza dei materiali hanno reso possibile col passare degli anni la produzione di apparecchi con lunghezze d’onda sempre più corte, e di conseguenza con colori diversi. Il primo diodo allo stato solido che emetteva luce [1] fu realizzato nel 1907 da H. J. Round, ma non si fece uso pratico di questa scoperta per diverse decadi, fino all’invenzione del primo LED vero e proprio da parte di Nick Holonyak Jr nel 1962, commercializzato alla fine degli anni Sessanta. I primi LED a GaAsP (Fosforo Arseniuro di Gallio) combinano tre elementi primari (Gallio, Arsenico e Fosforo) per produrre luce rossa a 655nm. Poiché l’intensità luminosa che si otteneva era limitata, essi furono utilizzati solo in poche applicazioni, essenzialmente come indicatori. Negli anni seguenti furono sviluppati solamente LED a GaAsP e GaP (Fosforo di Gallio) a luce rossa. Man mano che la tecnologia LED progrediva, negli anni Settanta, divennero disponibili colori e lunghezze d’onda aggiuntivi: i materiali più comuni erano il verde e il rosso da GaP, l’arancione da GaAsP, il rosso ed il giallo GaAsP. Con l’evoluzione tecnologica dei materiali per i LED, aumentò il flusso luminoso e i LED divennero sufficientemente luminosi da essere utilizzati dapprima all’interno di applicazioni non più elettroniche, ma proprie della vita quotidiana (computer e orologi digitali) e infine per l’illuminazione, ambito ancora oggi oggetto di studio e ricerca. Negli anni Ottanta fu sviluppato un nuovo materiale, il GaAlAs (Arseniuro di Alluminio di Gallio). Questo sviluppo fu seguito da una rapida crescita dell’impiego dei LED: la tecnologia GaAlAs fornisce infatti prestazioni superiori rispetto ai LED precedentemente disponibili. Il voltaggio richiesto è più basso, e questo si traduce in un sostanziale risparmio energetico. Sempre in questo periodo, i LED furono inoltre inseriti all’interno degli scanner di codici a barre, dei sistemi di trasmissione dati a fibre ottiche, e nelle attrezzature mediche. I miglioramenti nella crescita dei cristalli e la progettazione delle ottiche permisero lo sviluppo di LED gialli, verdi e arancio, ma si ottenne solo un minimo miglioramento per luminosità ed efficienza, perché la struttura di base del materiale era rimasta sostanzialmente invariata. Non appena i diodi laser con emissione nello spettro visibile cominciarono ad essere commercializzati, alla fine degli anni Ottanta, i progettisti di LED sperimentarono tecniche simili per produrre LED ad alta luminosità ed affidabilità. Ciò ha

portato allo sviluppo di LED a InGaAlP (Indio Gallio Alluminio Fosforo), con emissione di luce visibile: attraverso l'ottimizzazione del salto energetico nel materiale InGaAlP si possono avere diversi colori della luce emessa per cui potevano essere prodotti LED di colore verde, giallo, arancione e rosso a partire dalla stessa tecnologia, contando inoltre sul fatto che la degradazione del nuovo materiale è significativamente minore.

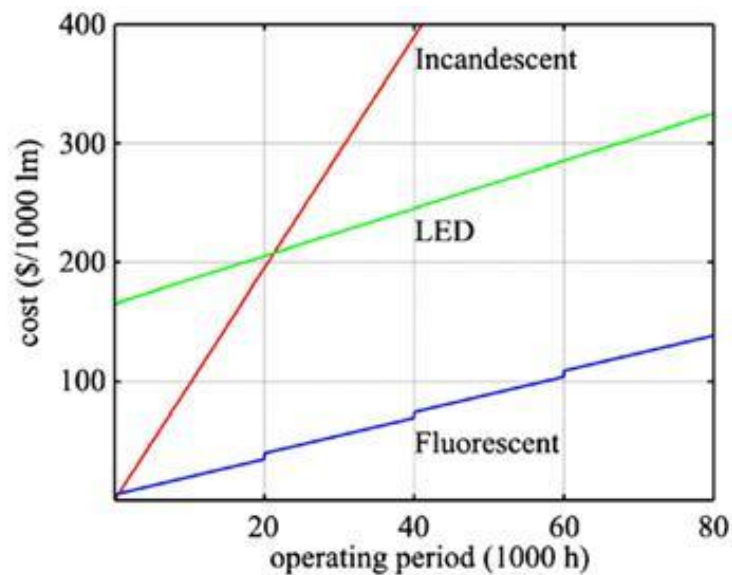
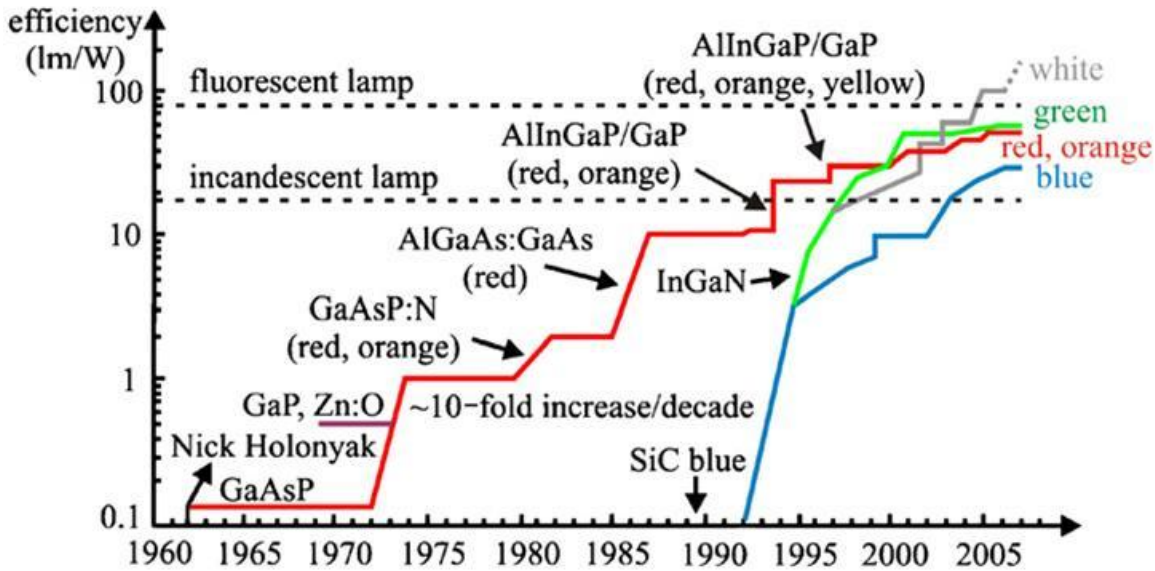


Figura I.1a,b. Sviluppo dei LED in termini di efficienza luminosa negli ultimi 40 anni (in alto, Fig. 1a), e confronto tra i costi di funzionamento di sorgenti LED, ad incandescenza e fluorescenti (in basso, Fig. 1b)

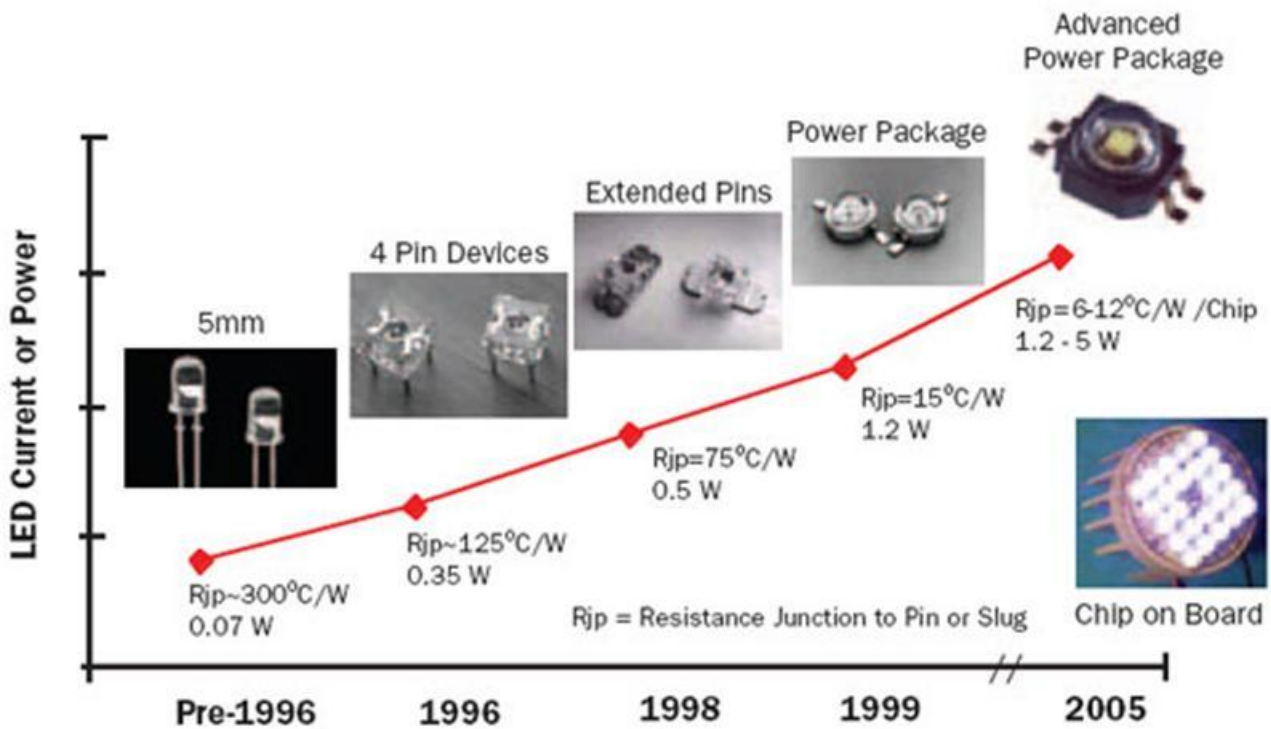


Figura I.2. Evoluzione dei diversi tipi di LED.

Nel 1993, presso la Nichia Chemical Industries in Giappone, Shuji Nakamura ha introdotto il LED blu [2], il più difficile da produrre a causa della sua elevata energia fotonica e della scarsa sensibilità dell'occhio umano alle basse lunghezze d'onda. La tecnologia utilizzata per produrre questi LED è molto diversa e meno avanzata di quella dei materiali per i LED comuni, ma l'importanza dell'invenzione è stata notevole: il blu è colore primario, e combinando attraverso software appositi le tre luci monocromatiche fondamentali (rosso e verde) è possibile ottenere luce bianca. Nascono così i primi LED multi chip (con cioè tre chip dei tre colori fondamentali) a luce bianca, il cui problema fondamentale, la differente velocità di degradazione per i singoli diodi, per cui dopo un certo numero di ore di funzionamento si verifica una variazione del colore percepito della luce, è ad oggi ancora in fase di risoluzione.

I LED blu disponibili oggi sono di GaN (Nitrito di Gallio) e SiC (Carburo di Silicio), e la loro disponibilità in quantità industriali sul mercato ha avuto per risultato un'intera generazione di nuove applicazioni che includono prodotti per le telecomunicazioni, applicazioni ai mezzi di trasporto sistemi per il controllo del traffico, e schermi per comunicazioni e TV.

Attualmente si realizzano e si sviluppano nuovi diodi luminosi realizzati con una tecnologia che prevede un substrato catodico preparato con un materiale diverso dal semiconduttore in cui è realizzata la giunzione vera e propria; la particolare struttura che ne deriva è mirata ad ottenere emissioni su particolari lunghezze d'onda o entro un determinato spettro non ottenibile dai comuni LED, il tutto a costi contenuti. Le tecniche a substrato diverso dalla giunzione vengono attualmente utilizzate per ottenere LED che emettono luce blu, ma anche bianca o UV. In Tab. I.1 sono riportati i materiali oggi normalmente impiegati per la produzione di sistemi LED.

Tabella I.1. Materiali attualmente impiegati nella produzione di sistemi LED.

Materiali semiconduttori	Colore dell'emissione del LED
AlGaAs	Rosso e IR
AlGaP	Verde
AlGaInP	Arancione-rosso brillante, arancione, giallo
AlGaN	UV vicino e lontano
AlN	UV vicino e lontano
C (diamante)	UV
GaAsP	Rosso, rosso-arancio, arancio, giallo
GaP	Rosso, giallo, verde
GaN	Verde, verde smeraldo, blu
GaN con barriera AlGaN	Blu, bianco
InGaN	Blu-verde, blu
Al ₂ O ₃ (zaffiro) come substrato	Blu
Si (silicone) come substrato	Blu (in fase di sviluppo)
SiC	Blu
ZnSe	Blu

Capitolo II

Struttura e funzionamento dei LED

Un LED è per definizione un diodo che emette luce [3,4]. Un diodo è un dispositivo elettronico a due terminali che consente il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione, con l'entità della corrente che dipende dalla differenza di potenziale ai capi del dispositivo.

Dal punto di vista fisico, un LED è un chip di materiale semiconduttore impregnato o drogato con impurità per formare una giunzione positivo-negativo (P-N): il polo positivo di tale giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo. La caratteristica principale di questi dispositivi è quella di lasciarsi attraversare dalla corrente in un solo verso, come un normale diodo, al quale si aggiunge la capacità di emettere luce. In Fig. II.1 è rappresentato il simbolo circuitale del diodo, che ne esprime la funzione: il triangolo indica la direzione che permette il flusso di corrente elettrica, mentre la sbarra ne indica il blocco; le frecce indicano che il diodo emette luce. Avendo un terminale positivo ed uno negativo, il LED può essere inserito nel circuito elettrico in un solo senso.

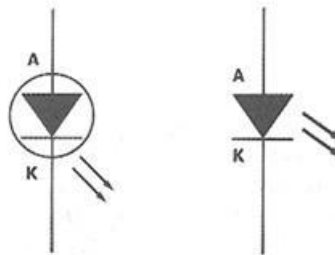


Figura II.1. Due rappresentazioni grafiche del LED: il simbolo è quello del generico diodo, al quale sono state aggiunte le frecce per indicare che il componente emette luce.

Per comprendere il funzionamento del LED, è necessario analizzare al livello microscopico la struttura dei materiali e in particolare chiarire alcuni concetti legati alla capacità di condurre elettricità da parte degli stessi.

Materiali semiconduttori e teoria delle bande

Le proprietà elettriche di un materiale dipendono dalla sua struttura atomica. Gli elettroni orbitano attorno al nucleo in livelli di energia o bande: essi riempiono le bande, che sono in ordine energetico crescente man mano che ci si allontana dal nucleo, in un ordine predefinito. Ogni banda contiene un numero predefinito di elettroni: la prima ne può contenere massimo due, la

seconda massimo otto; l'ultima banda che contiene elettroni in un atomo è chiamata banda di valenza, mentre il primo livello vuoto al di sopra della banda di valenza è chiamato banda di conduzione. Ad una scala superiore, è possibile affermare che la banda di valenza è l'insieme di elettroni che non hanno un livello energetico sufficientemente elevato da lasciare l'atomo di appartenenza, per cui rimangono ad orbitare stabilmente attorno ad esso, mentre la banda di conduzione è l'insieme di elettroni che hanno un livello energetico sufficientemente elevato da lasciare l'atomo di appartenenza dando luogo ad una conduzione di tipo elettrico. Tra queste due bande può trovarsi la "banda proibita", insieme dei livelli energetici che gli elettroni del materiale non possono avere perché non corrispondono a nessuna delle due bande precedenti.

Negli isolanti, la banda proibita è molto grande, e sono quindi pochi gli elettroni che raggiungono un'energia sufficiente per passare nella banda di conduzione, per cui la corrente non si trasmette attraverso di essi. Viceversa, nei materiali conduttori, le due bande (di valenza e di conduzione) si sovrappongono, per cui non vi è banda proibita e un notevole numero di elettroni possiede in questo energia sufficiente per muoversi e quindi condurre la corrente elettrica.

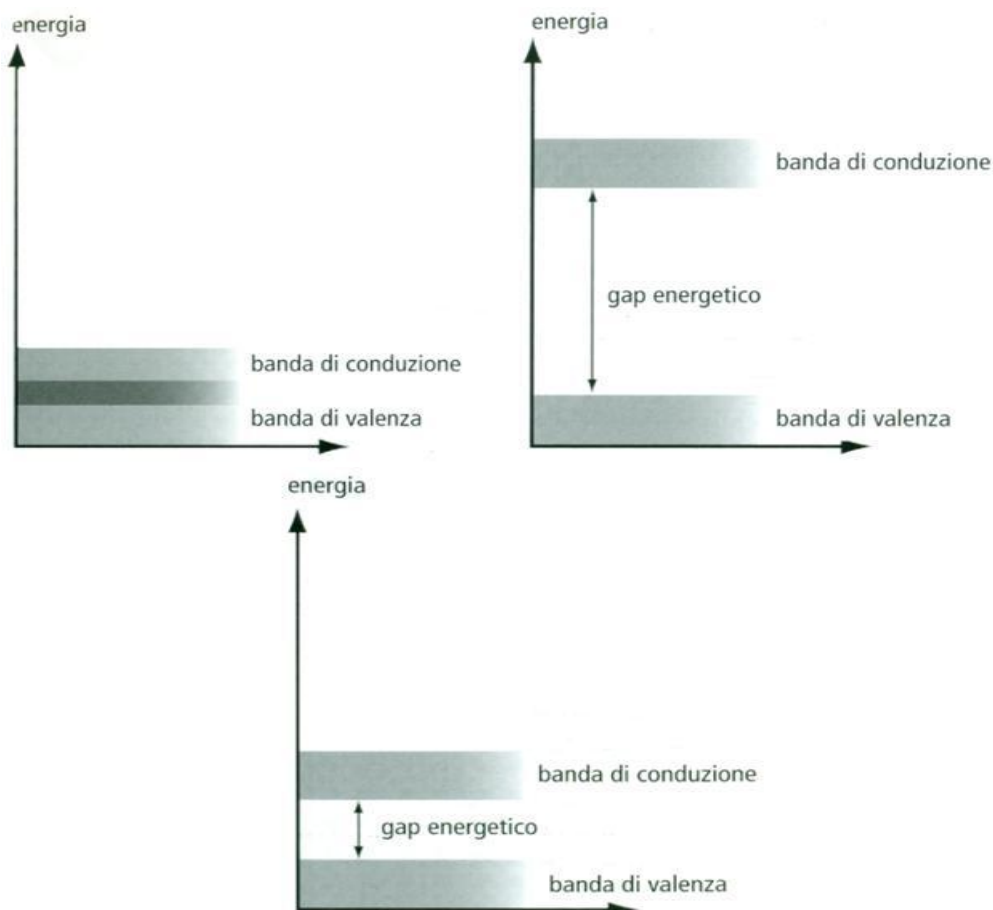


Figura II.2. Banda di valenza e di conduzione per un materiale conduttore (in alto a sinistra), un materiale isolante (in alto a destra) e un materiale semiconduttore(in basso)

Nei materiali semiconduttori la banda proibita è piccola, quindi è sufficiente un innalzamento della temperatura per portare un certo numero di elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Sono materiali semiconduttori il Germanio, il Silicio, il Carbonio e l'Arseniuro di Gallio. Ogni atomo di tali materiali mette in comune quattro elettroni che, essendo attratti dagli atomi vicini i nuclei dei vari atomi, si tengono legati tra loro da un tipo di legame detto covalente.

Materiali semiconduttori e drogaggio

Normalmente tutti gli elettroni dei semiconduttori si trovano nella banda di valenza: restano, cioè, legati all'atomo di appartenenza e si comportano da isolanti. Per far condurre i materiali semiconduttori è necessaria un'operazione, detta drogaggio (Fig. II.3a,b,c). Il drogaggio di un semiconduttore avviene inserendo al suo interno atomi aventi valenza cinque (pentavalenti) oppure atomi aventi valenza tre (trivalenti). Tra le sostanze pentavalenti figurano il Fosforo (P), l'Antimonio (Sb) e l'Arsenico (As), tra quelle trivalenti il Bario (Ba), l'Alluminio (Al), il Gallio (Ga) e l'Indio (In).

Inserendo una sostanza pentavalente all'interno di un semiconduttore quattro dei suoi cinque elettroni vengono utilizzati per il legame covalente, mentre il quinto resta libero: questo tipo di drogaggio si dice di tipo N, perché il materiale acquisisce carica negativa e gli elettroni in più sono liberi di muoversi, per cui tale materiale diventa conduttore. Se invece vengono inserite nel semiconduttore sostanze trivalenti i tre elettroni dell'atomo trivalente vengono utilizzati per il legame covalente, mentre manca un elettrone nella banda di valenza: tale vuoto prende il nome di lacuna e può essere occupato da un altro elettrone, che a sua volta crea una lacuna nel posto che ha lasciato. Di conseguenza la lacuna può essere considerata una carica positiva mobile, che dà luogo ad una corrente elettrica. Questo secondo tipo di drogaggio viene detto di tipo P perché il materiale semiconduttore viene ad avere lacune libere e si trasforma in un conduttore [5,6].

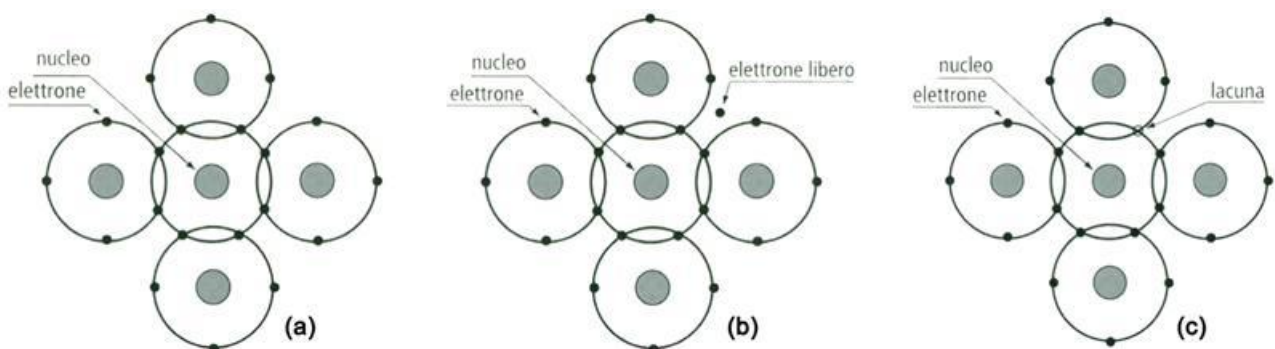


Figura II.3a,b,c. Legami covalenti in cinque atomi di Silicio con elettroni in comune (a), l'atomo di Antimonio, che costituisce l'impurità al centro tra quattro atomi di Silicio, pone un elettrone eccedente nella banda di conduzione (b), l'atomo di Boro, che costituisce l'impurità al centro tra quattro atomi di Silicio, pone una lacuna nella banda di covalenza (c).

A causa dell'aumento di temperatura, inoltre, un certo numero di elettroni può acquistare energia sufficiente a passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione: si dicono cariche minoritarie le coppie elettrone-lacuna che si creano in seguito all'aumento di temperatura; al contrario si dicono cariche maggioritarie gli elettroni nel semiconduttore drogato di tipo N e le lacune nel semiconduttore drogato di tipo P.

Giunzione P-N

All'atto della formazione della giunzione di una barretta di semiconduttore di tipo P con una di un semiconduttore di tipo N si verifica uno spostamento di cariche: gli elettroni e le lacune situati nella parte centrale della giunzione si neutralizzano, essendo cariche di segno opposto. Tale zona priva di cariche è detta zona di deplezione o di svuotamento (Fig. II.4).

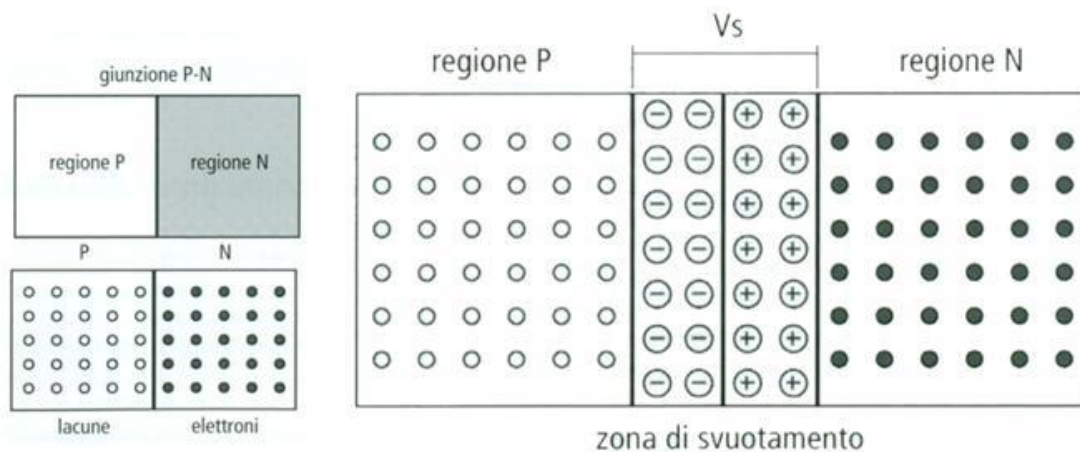


Figura II.4. Materiale semiconduttore con regioni P ed N e zona di svuotamento.

Non appena un certo numero di elettroni e di lacune si sono neutralizzate, le cariche fisse determinano una differenza di potenziale che respinge le altre cariche facendole restare nella zona di appartenenza: tale tensione è detta barriera di potenziale e si indica con V_s (Fig. II.5).

Anche se il diodo LED è inserito all'interno del circuito nel giusto verso, vi è conduzione di corrente solo quando la tensione agli estremi supera una tensione di soglia, che coincide con la barriera di potenziale V_s . Nel caso in cui per errore esso venga inserito con le polarità invertite non vi è conduzione di corrente, salvo quella delle cariche minoritarie, che è una corrente molto piccola; per voltaggi relativamente bassi si verifica rottura istantanea.

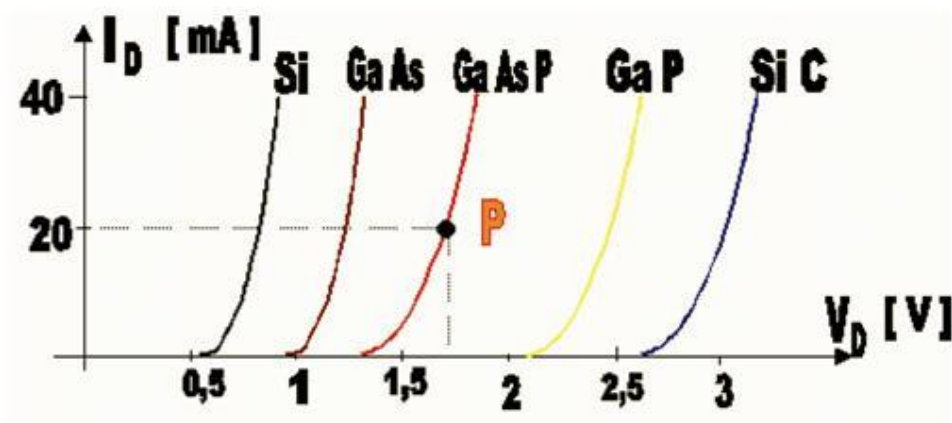


Figura II.5. Barriera di potenziale V_s per alcuni semiconduttori drogati.

Polarizzazione della giunzione P-N

Polarizzare una giunzione P-N vuol dire applicare una certa tensione ai suoi estremi: si parla di polarizzazione diretta quando una carica positiva applicata al semiconduttore di tipo P respinge le lacune dal semiconduttore di tipo N, mentre si parla di polarizzazione inversa quando una carica negativa applicata al semiconduttore di tipo N respinge gli elettroni dal semiconduttore di tipo P. L'effetto delle connessioni ai terminali positivo e negativo è quindi di spingere gli elettroni e le lacune verso la giunzione P-N, abbassando la barriera di potenziale richiesta per ridurre la zona di deplezione di modo che diventi così sottile che le cariche negative possano attraversarla aumentando il voltaggio. Gli elettroni iniziano perciò a entrare nel semiconduttore di tipo P e si muovono di lacuna in lacuna attraverso il cristallo, rendendo possibile lo scorrimento della corrente elettrica dal polo negativo a quello positivo della batteria. Quando un elettrone attraversa la barriera e incontra una lacuna, decade ad un livello di energia minore, rilasciando la differenza di energia sotto forma di fotoni (Fig. II.6). La lunghezza d'onda della luce emessa, e quindi il suo colore, corrisponde appunto al divario tra i livelli energetici dei materiali utilizzati per formare la giunzione P-N.

In Fig. II.7 è rappresentata la curva di polarizzazione completa di un diodo a giunzione.

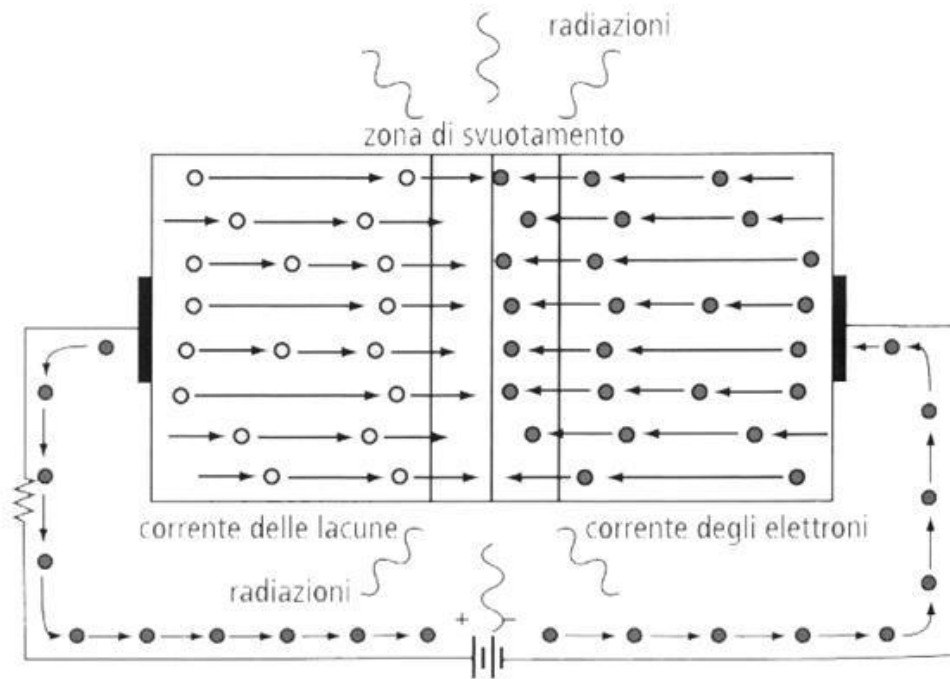


Figura II.6. Transito di elettroni (neri) e di lacune (bianche) con emissione di radiazioni.

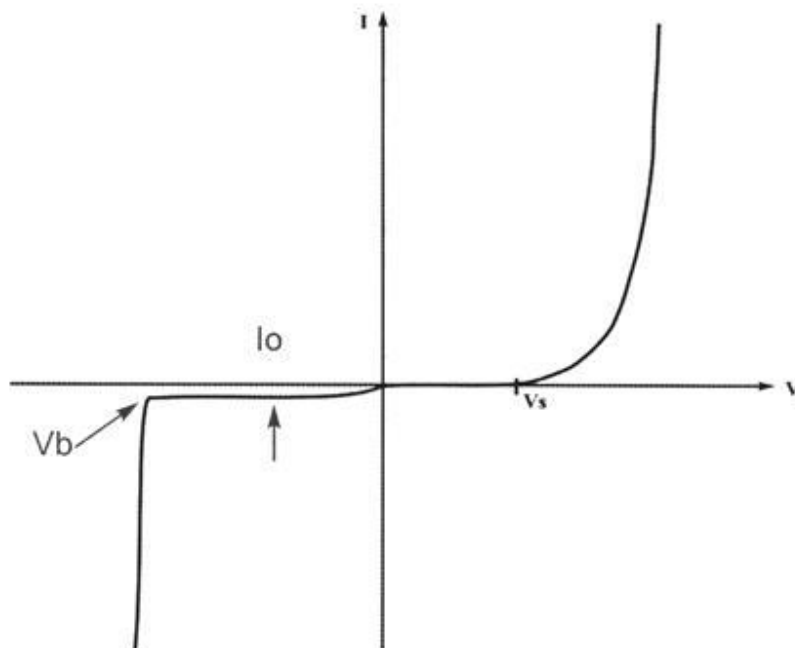


Figura II.7. Curva caratteristica completa del diodo a giunzione in polarizzazione diretta (I quadrante) e inversa (III quadrante): la debole corrente che scorre in polarizzazione inversa è la I_0 evidenziata dalle frecce ed è di pochi nA. Il punto V_b corrisponde alla tensione inversa che provoca la rottura della giunzione.

Alimentazione del LED

Da quanto appena descritto, risulta chiaro che l'alimentazione del singolo LED è in corrente continua (CC), la quale è caratterizzata da un flusso di elettroni di intensità e direzione costante nel tempo e può essere prodotta a partire da una corrente alternata (CA) con un processo di raddrizzamento effettuato con diodi o ponti raddrizzatori. Questi dispositivi eliminano la componente negativa della CA, creando una corrente non continua, ma unidirezionale pulsante, ovvero composta idealmente da una corrente alternata sovrapposta ad una continua. Un condensatore provvede poi a livellare il segnale, fornendo una corrente quanto più possibile vicina ad un valore continuo. Poiché i LED hanno un voltaggio bassissimo, è quasi sempre necessario calcolare una resistenza da prevedere all'interno del circuito. Per calcolarla, dalla nota legge di Ohm:

$$I = \frac{V_0 - V_d}{R_0}$$

dove (Fig. II.8) I è la corrente (uguale o inferiore a quella della curva caratteristica), V_0 è il voltaggio alla sorgente, V_d è la caduta di tensione al diodo, R_0 è la resistenza del circuito.

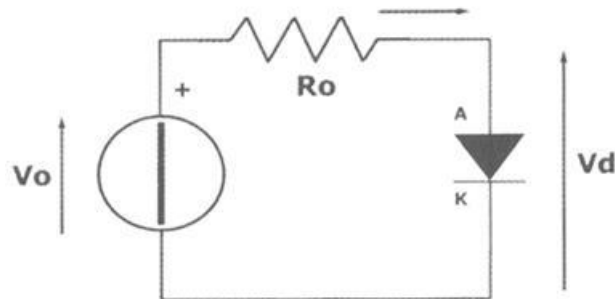


Figura II.8. Diodo in polarizzazione diretta inserito in un circuito con resistenza R_0 .

Oltre al metodo d'alimentazione con l'uso di resistenze, economico, ma poco raffinato, esiste la possibilità di utilizzare un driver a controllo dinamico, che permette di variare la corrente, di far pulsare il LED, e di compensare gli effetti di variazione dell'intensità causati dalla temperatura.

Emissione luminosa

L'emissione di luce nei LED è dovuta al fenomeno dell'elettroluminescenza, in cui i fotoni sono prodotti nella giunzione P-N dalla ricombinazione degli elettroni e delle lacune: la luce di queste

sorgenti è detta anche Solid State Lighting (SSL), illuminazione allo stato solido, proprio perché è un corpo solido che emette luce.

Come accennato precedentemente, gli elettroni nei diversi orbitali possiedono differenti quantità di energia, con l'energia generalmente proporzionale alla distanza dell'orbita dal nucleo dell'atomo. Quando un elettrone salta da un livello energetico inferiore ad uno superiore assume quindi un livello di energia superiore. Questa energia assorbita dalla corrente elettrica viene poi riemessa sotto forma di fotoni nel momento in cui l'elettrone ridiscende a un livello energetico inferiore. Poiché i fotoni sono emessi a frequenze specifiche, un dislivello energetico alto produrrà un fotone ad alta frequenza e quindi con lunghezza d'onda corta. Anche se il rilascio di quanti di energia si verifica in tutti i diodi, essi sono visibili, cioè sono fotoni, solo quando il diodo consiste di materiali che rilasciano fotoni a lunghezze d'onda visibili.

La giunzione P-N della maggior parte dei LED è realizzata con Arseniuro di Gallio con Fosforo di Gallio, entrambi materiali in grado di emettere radiazioni luminose quando vengono attraversati da corrente elettrica: il valore di tale corrente è generalmente compreso tra 10 e 30mA.

Colore della luce emessa

A differenza delle lampade a incandescenza e fluorescenti, i LED emettono luce quasi monocromatica, cioè ad una specifica lunghezza d'onda. A determinare la lunghezza d'onda della luce emessa concorrono il materiale utilizzato per la creazione della giunzione P-N e il livello di drogaggio di tale materiale. In Fig. II.9 viene riportata la distribuzione di potenza spettrale relativa per vari LED, mentre la Tab. II.1 riporta la color chart dei LED, che indica lunghezza d'onda, colore, voltaggio e materiale dopante per una serie di LED.

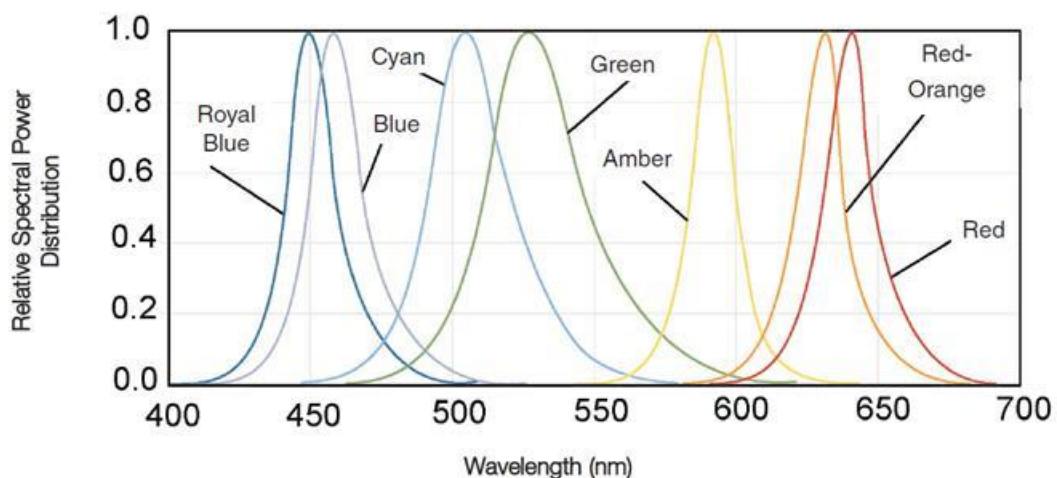


Figura II.9. Intensità relativa e lunghezza d'onda per una temperatura di giunzione di 25°C.

Tabella II.1. Color chart dei LED e proprietà di base dei dispositivi.

Lunghezza d'onda		Voltaggio di andata		Angolo di vista	Materiale del chip
<i>nm</i>	<i>Nome del colore</i>	<i>20mA</i>	<i>Intensità per LED da 5mm</i>	<i>(gradi)</i>	
940	IR	1.7	16mW@50mA	15	GaAlAs/GaAs
880	IR	1.7	18mW@50mA	15	GaAlAs/GaAs
850	IR	1.8	26mW@50mA	15	GaAlAs/GaAs
660	Ultra rosso	2.2	2000mcd@50mA	15	GaAlAs/GaAs
635	Rosso ad alta efficienza	2.2	200mcd@20mA	15	GaAsP/GaP
633	Superrosso	2.2	3500mcd@20mA	15	InGaAlP
623	Rosso arancio	2.1	4500mcd@20mA	15	InGaAlP
620	Sopra arancio	2.2	4500mcd@20mA	15	InGaAlP
612	Arancio	2.1	160mcd@20mA	15	GaAsP/GaP
595	Sopragiallo	2.1	5500mcd@20mA	15	InGaAlP
592	Giallo ambra	3.6	7000mcd@20mA	15	InGaAlP
585	Giallo	3.6	100mcd@20mA	15	GaAsP/GaP
3500K	Bianco "incandescente"	2.2	200mcd@20mA	20	SiC/GaN
4500K	Bianco "incandescente"1.5	2.2	2000mcd@20mA	20	SiC/GaN
5000K	Bianco pallido	3.6	4000mcd@20mA	20	SiC/GaN
6500K	Bianco pallido	3.6	4000mcd@20mA	20	SiC/GaN
8000K	Bianco freddo	3.6	6000mcd@20mA	20	SiC/GaN
574	Giallo limone super	2.4	1000mcd@20mA	15	InGaAlP
570	Verde limone super	2.0	1000mcd@20mA	15	InGaAlP
565	Verde ad alta efficienza	2.1	200mcd@20mA	15	GaP
560	Verde super puro	2.1	350mcd@20mA	15	InGaAlP
555	Verde puro	2.1	80mcd@20mA	15	GaP
525	Verde acqua	3.5	10000mcd@20mA	15	SiC/GaN
505	Verde blu	3.5	2000mcd@20mA	15	SiC/GaN
470	Super blu	3.6	3000mcd@20mA	15	SiC/GaN
430	Ultra blu	3.8	100mcd@20mA	15	SiC/GaN

Generazione della luce bianca

Esistono diversi modi in cui i LED vengono utilizzati per produrre luce bianca, ma le tecnologie impiegate sono fondamentalmente due, come mostrato in Fig. II.10: si possono mescolare LED monocromatici oppure utilizzare dei fosfori che convertano lunghezze d'onda più corte (UV o blu) in blu, verde, giallo o rosso.

Esempi di spettri di LED a luce bianca sono presentati in Fig. II.11.

I LED multichip sono LED che contengono 2, 3 o 4 LED monocromatici e possono produrre luce di colore variabile tramite software oppure luce bianca (Fig. II.12). Solitamente i LED bicromatici sono costituiti da un LED rosso e da uno blu; quelli tricromatici da LED rosso, verde e blu (RGB) oppure ambra, bianco e blu (AWB); quelli quadricromatici da rosso, verde, blu e ambra (RGBA).

I LED con fosfori, invece, contengono una colla che viene colata sul chip UV o a luce blu e che contiene cristalli, in grado di convertire tutte le parti dell'emissione dello spettro in luce visibile: questo sistema fa diminuire l'efficienza luminosa, perché parte dell'energia elettrica assorbita è dissipata durante la conversione. Nel caso di LED UV, sul chip vengono colati fosfori RGB, mentre

nel caso di LED blu vengono utilizzati solo fosfori gialli, oppure vengono utilizzati più fosfori, allo scopo fornire uno spettro di emissione globale più ampio e con maggiore qualità cromatiche.

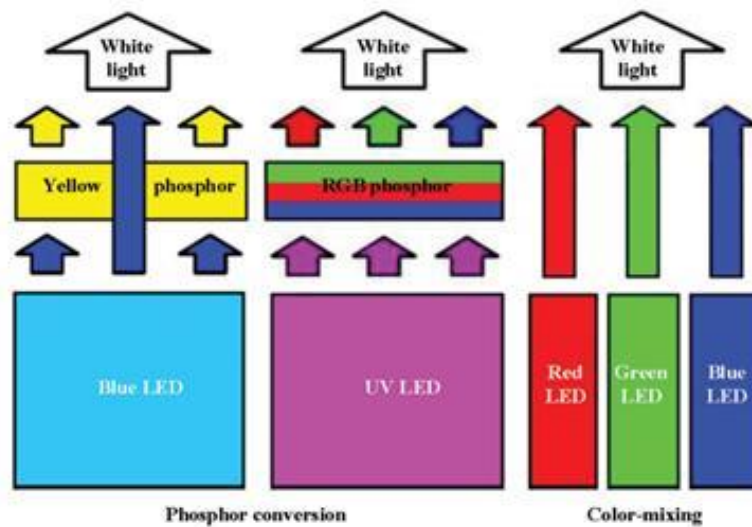


Figura II.10. Modalità di generazione di luce bianca con i LED.

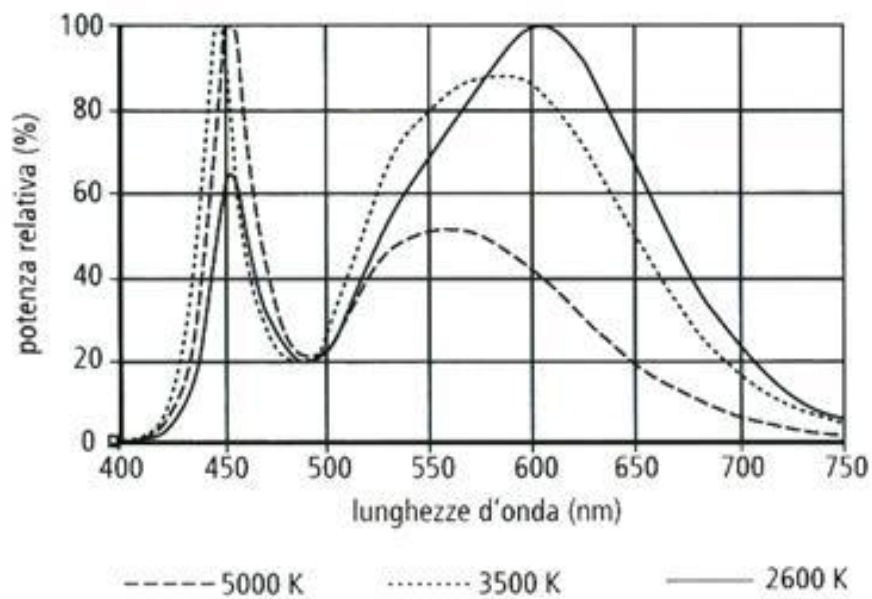


Figura II.11. Spettro di LED bianco a varie temperature correlate di colore (CCT).

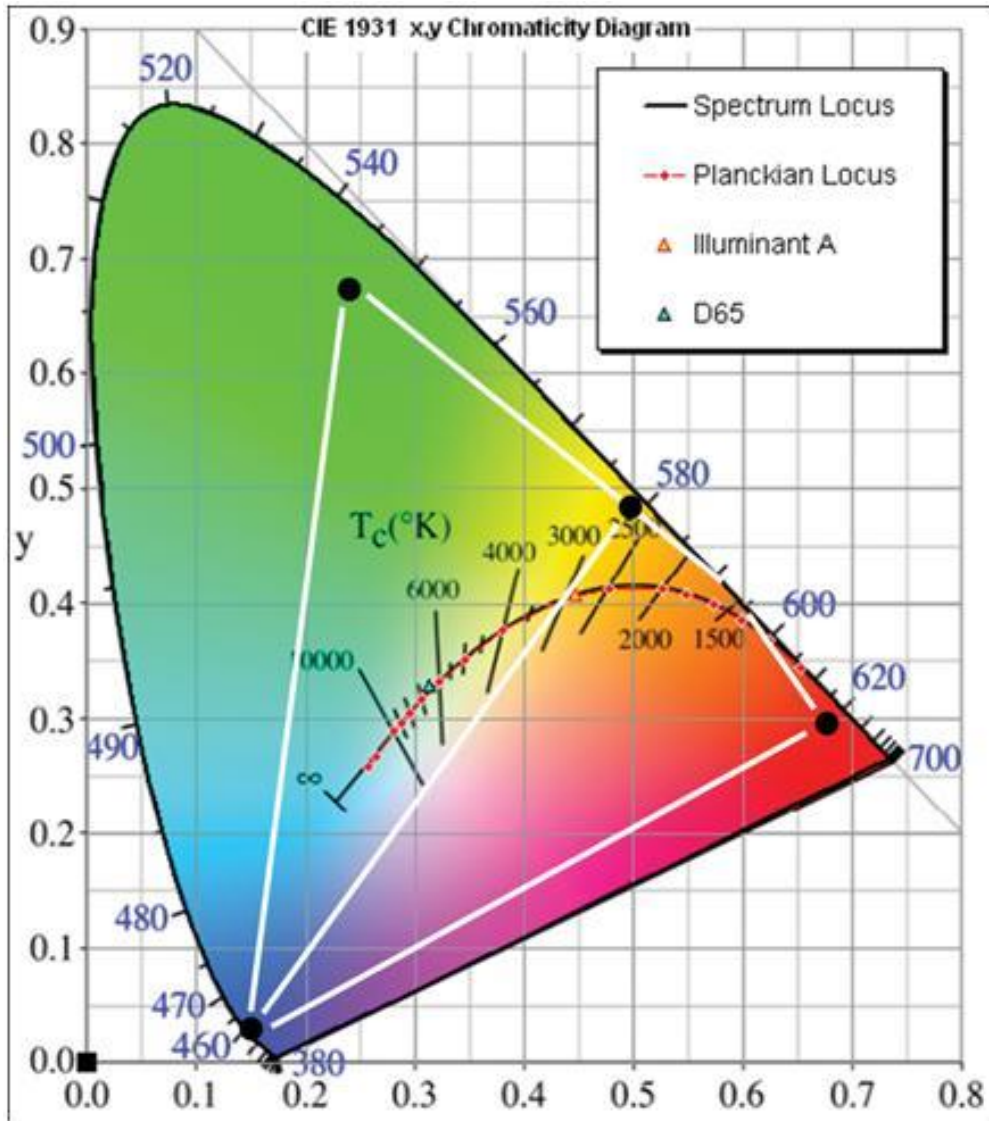


Figura II.12. Colori ottenibili con LED multichip: attraverso opportuna miscelazione delle luci è possibile riprodurre tutti i colori all'interno del poligono avente per vertici le coordinate di ogni LED..

Capitolo III

Tipologie di LED e loro caratteristiche

Tipologie di LED

Sono molti i LED attualmente disponibili sul mercato, ma si possono facilmente classificare in tre categorie: THT, SMD e Power LED.

LED THT (Through Hole Technology)

Questo tipo di LED (Fig. III.1), protetti da capsule tonde di materiale plastico di diametro 3 o 5 millimetri, sono i più piccoli esistenti, ed il loro uso principale è quello di spie luminose nei più svariati dispositivi elettronici. La sigla THT significa “tecnologia da foro”, proprio per indicare che si posizionano all’interno di buchi per svolgere la loro funzione di segnalazione. Un’altra applicazione molto diffusa è quella con diodo che emette nell’infrarosso (IR), utilizzato come telecomando a distanza, dalle comuni tv fino ad arrivare a sistemi molto più complessi di trasmissione dati.

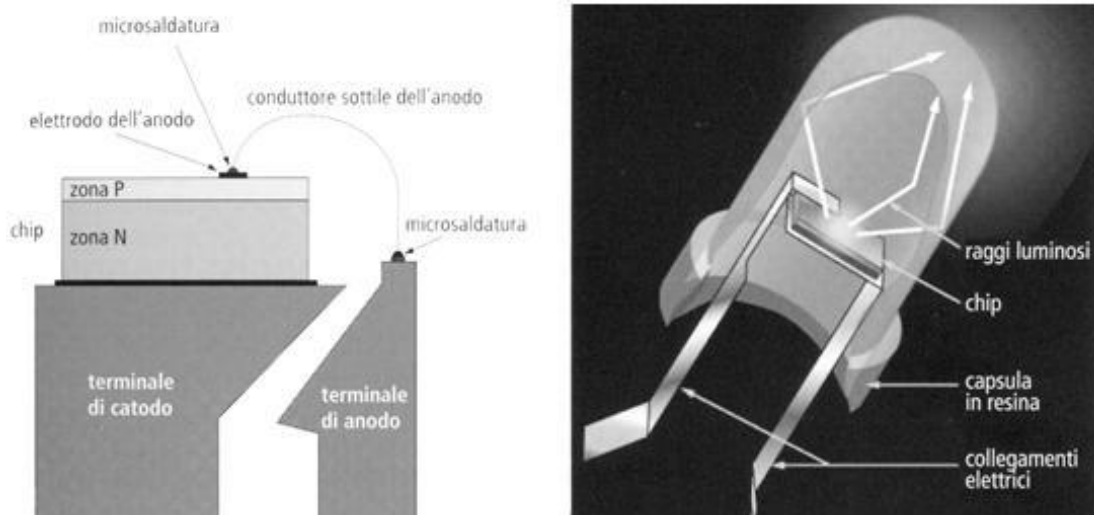


Figura III.1. Struttura del LED THT.

LED SMD (Surface Mounted Device) o SMT (Surface Mounted Technology)

I LED di questo tipo si installano in circuiti montati su una base isolante. Questi circuiti sono forati per consentire il passaggio degli elettrodi, le cui saldature sono effettuate sulla faccia inferiore della base. Si tratta di componenti in cui gli elettrodi non sporgono verso il basso, ma escono dai

lati del chip. Si contraddistinguono per la forma piatta: la parte inferiore può essere appoggiata su una base, mentre i collegamenti elettrici sono laterali. In questo modo è possibile utilizzare circuiti stampati su base isolante di ridotto spessore ed effettuare le microsaldature con macchinari automatizzati. Questo tipo di LED si presenta come un minuscolo box con una faccia da cui viene emessa la luce, la faccia opposta o laterale che funge da base d'appoggio, mentre le rimanenti facce laterali sono munite di anodo e catodo. Prevalentemente utilizzati in circuiti in miniatura, come ad esempio quelli dei cellulari, sono una categoria importante perché hanno un'efficienza luminosa molto elevata (1-6lm/W), ragion per cui si cominciano ad impiegare anche nella realizzazione di apparecchi LED per l'illuminazione generale.

LED HB (High Brightness) o Power LED o High Power LED

Nati 9 anni fa, sono sicuramente la tipologia di illuminazione allo stato solido che ha tutte le caratteristiche per l'applicazione nell'illuminazione generale di interni ed esterni. La tecnologia su cui si basano si è evoluta in maniera rapidissima ed ha portato alla possibilità di inserire bulbi contenenti LED direttamente in circuiti a corrente alternata, invece di utilizzare il converter per passare alla corrente continua, che causa perdite di efficienza. I LED HB (Fig. III.2) sono stati inventati nel 2001, anno in cui ci furono grandi progressi nelle tecniche di crescita dei cristalli di semiconduttore, processo che da sempre è la fase più delicata nella realizzazione dei diodi luminosi: minime imperfezioni dei cristalli possono infatti portare a grandi differenze all'interno di una partita di LED alterandone le caratteristiche ottiche ed elettriche.

Le caratteristiche principali di questa categoria di LED sono quelle di avere una gamma di potenze di funzionamento nettamente superiore alle precedenti categorie e di essere, come dice il nome stesso, particolarmente brillanti.

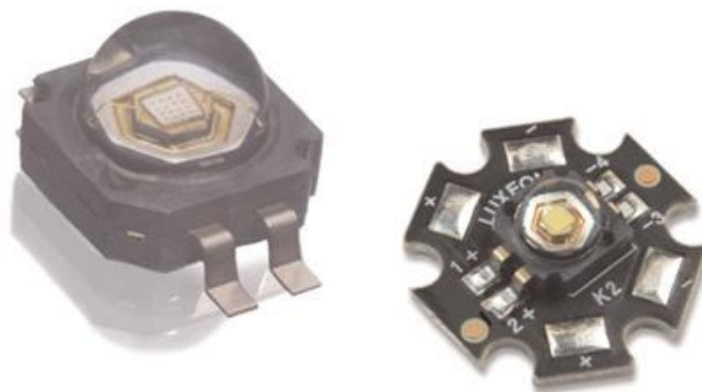


Figura III.2. LED High Power. A sinistra: LED HP a bassa tensione (230V); a destra, lo stesso chip montato su piastra di collegamento elettrico e con funzione di dissipatore termico.

LED di questo tipo si installano in circuiti montati su una base isolante. Questi circuiti sono forati per consentire il passaggio degli elettrodi, le cui saldature sono effettuate sulla faccia inferiore della

base. Si contraddistinguono per la loro forma piatta: la parte inferiore può essere appoggiata su una base, mentre i collegamenti elettrici sono laterali. In questo modo è possibile utilizzare circuiti stampati su base isolante di ridotto spessore ed effettuare le microsaldature con macchinari automatizzati.

Complessivamente, si presentano come un minuscolo box con una faccia da cui viene emessa la luce, mentre la faccia opposta o laterale funge da base d'appoggio; le facce laterali sono munite di anodo e catodo (Fig. III.3).

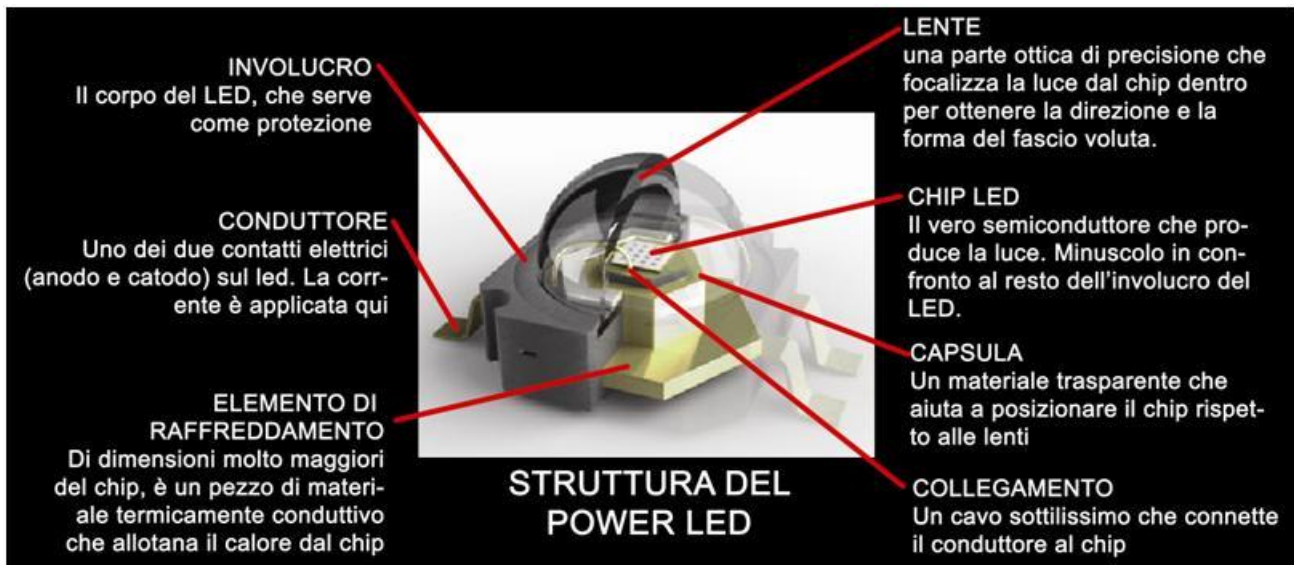


Figura III.3. Struttura del Power LED.

Il semiconduttore utilizzato è sempre quello sintetico tipico della colorazione da realizzare: per ottenere forti correnti si gioca sul drogaggio, ossia sulla densità di atomi droganti introdotti nel reticolo cristallino, oltre che sulla dimensione della giunzione (il chip di un LED high-power è più grande di quello di uno tradizionale destinato a funzionare da spia luminosa).

Esistono due tipi di Power LED: il primo è basato sull'uso di AlInGaP, cioè Alluminio Indio Gallio Fosforo, che produce luce arancio-rosso, arancio, giallo e verde; il secondo è basato sull'uso di InGaN (Nitrato di Indio e Gallio), utilizzato per produrre luce blu, blu-verde, verde e, in combinazione con fosfori, bianca.

I LED sono normalmente considerati dispositivi a corrente continua che operano a partire da una sorgente a corrente continua a basso voltaggio (Fig. III.4). Per le applicazioni che richiedono poca corrente e un numero limitato di LED, come i cellulari, questa viene fornita da una batteria. Per altre applicazioni, invece, come ad esempio i sistemi di illuminazione lineare esterni degli edifici, non è possibile utilizzare la corrente continua, in quanto in corrente continua le perdite aumentano all'aumentare delle distanze. Per compensare tali perdite, è necessario l'uso di voltaggi più elevati e di regolatori, che causano però un grande spreco energetico (il solo l'utilizzo di un convertitore da corrente alternata a corrente continua causa una perdita di circa il 15%).

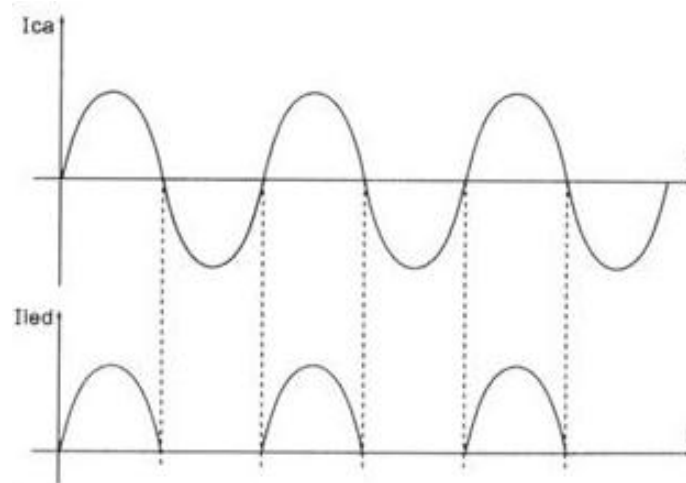


Figura III.4. Andamento della corrente alternata (in alto) e andamento della corrente effettivamente utilizzata dai LED (in basso).

Dal punto di vista dei progressi nell'alimentazione delle sorgenti LED, nel 2008 sono stati commercializzati bulbi LED con convertitore miniaturizzato integrato, mentre nel 2007 in Corea sono state introdotte le prime sorgenti LED che utilizzano direttamente corrente alternata, senza conversione: questi LED, chiamati Acriche [7], mostrati in Fig. III.5, inizialmente erano di 10 tipi diversi con potenza di 2W, ognuno dei quali può essere considerato come una stringa di LED HB messi in serie; le stringhe sono fabbricate in modo da avere le giunzioni P-N in serie, per cui il voltaggio richiesto è relativamente alto, simile al voltaggio di rete.

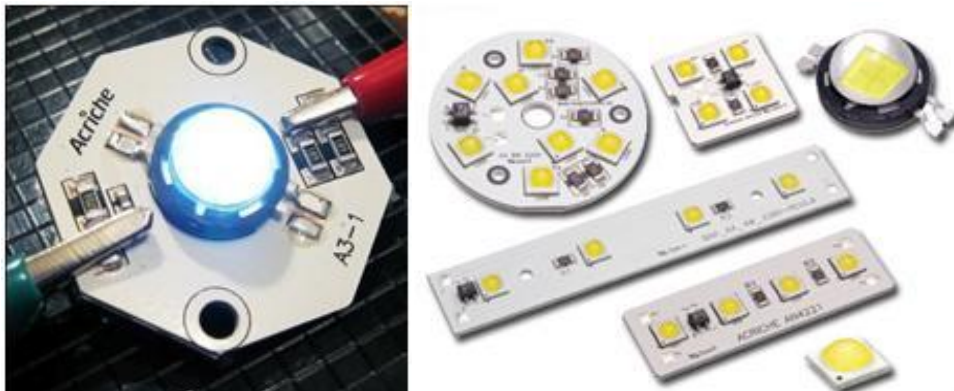


Figura III.5. LED Seoul Acriche (sinistra), e vari dispositivi con LED Acriche (destra).

A questi, sono seguiti i LED di tipo Xylite™ [8], Fig. III. 6, che possono essere alimentati sia in corrente continua che alternata. La loro caratteristica principale è quella di essere assemblati in numero pari all'interno di un circuito parallelo in configurazioni opposte: in questo modo, vengono utilizzati entrambi gli emicicli della corrente alternata, in una fase viene alimentato un circuito, nella fase opposta l'altro circuito.



Figura III.6. XYLite LED.

L'efficienza luminosa dipende dal tipo di alimentazione e dalla temperatura di colore: in linea generale si può dire che i LED a corrente continua sono più efficienti di quelli a corrente alternata o Acriche, e che quelli a temperature di colore più basse sono meno efficienti di quelli a temperature di colore superiori. L'efficienza luminosa media oscilla tra 80 e 100 lumen/W per i LED a corrente continua, mentre è circa di 40-60lm/W per LED alimentati a corrente alternata. I dati relativi al 2007 pubblicati dall'US Energy Department dichiaravano un'efficienza di 47-64 lm/W per LED con una temperatura di colore a 5000K forniti già di driver e di 25-44 lm/W per LED con una temperatura di colore di 3300K, sempre provvisti di driver. Sono attualmente allo studio LED high-power con un'efficienza di 130-150lm/W, ma non sono stati ancora commercializzati.

Dal punto di vista della dissipazione del calore, la Osram Opto Semiconductor ha introdotto un LED, chiamato Golden Dragon, che include un dissipatore di calore integrato per ottimizzare le prestazioni termiche e di conseguenza energetiche, che può funzionare a livelli di corrente anche di centinaia di mA. La dissipazione del calore è argomento di fondamentale interesse per LED ad alta potenza e si ritiene pertanto opportuno un approfondimento.

Power LED e cooler

La tecnologia costruttiva dei Power LED è mirata a realizzare giunzioni in grado di farsi attraversare da forti correnti, e substrati di appoggio capaci di smaltire rapidamente ed efficacemente il calore inevitabilmente prodotto (Fig. III.7). I modelli più potenti, che hanno bisogno di dissipare molto calore, hanno installata posteriormente una placca di alluminio liscia e ben levigata, pensata per essere essa stessa elemento di dispersione termica, o per essere appoggiata ad un dissipatore di calore: tale elemento viene chiamato cooler, ed è solitamente costituito da una serie di alette metalliche di raffreddamento, che servono per moltiplicare la superficie e quindi le capacità di scambio termico con l'ambiente (Fig. III.8).

La luce allo stato solido è indotta da due meccanismi fisici, l'effetto energetico e l'effetto fotoelettrico: entrambi sono collegati alla temperatura di giunzione, per cui comprendere la dinamica del comportamento termico della giunzione è importante per il design del controllo dell'illuminazione (Fig. III.9).

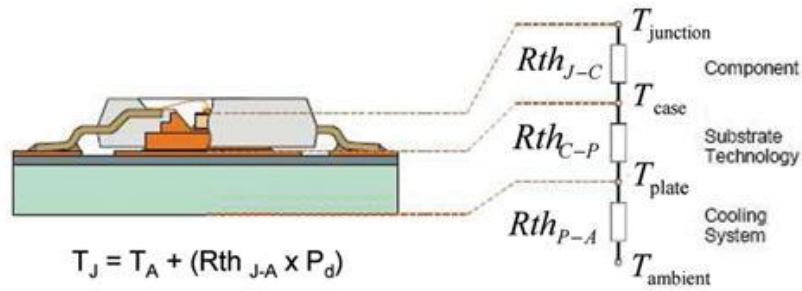


Figura III.7. Il problema della dissipazione termica attraverso l'involucro del LED.

Le varie parti della capsula si possono considerare resistenze termiche: il calore alla giunzione si diffonde nella capsula, poi nella piastra di supporto, e infine in ambiente.



Figura III.8. Esempi di cooler integrati nell'apparecchio del LED.

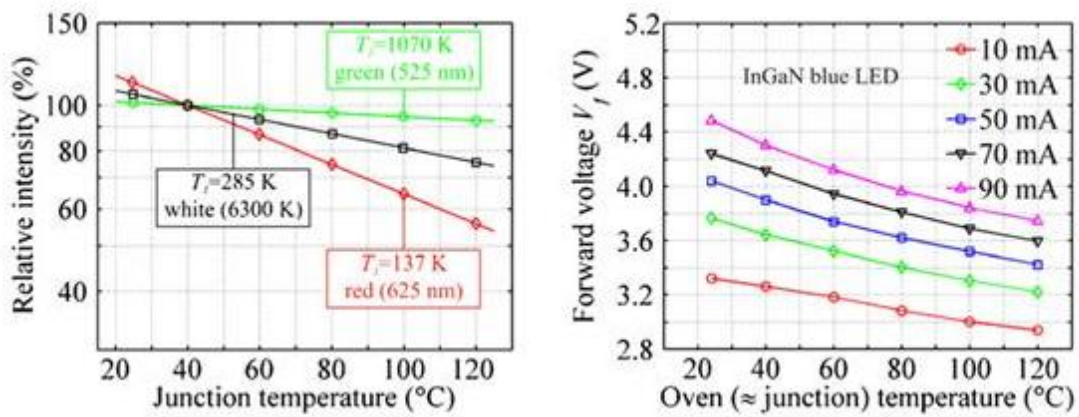


Figura III.9. Esempio della dipendenza della temperatura di giunzione dall'intensità del LED (a sinistra) e dal voltaggio (a destra).

Un Power LED bianco è costituito da tre elementi: chip, elemento di raffreddamento e capsula con colla ai fosfori. Secondo il funzionamento termico, l'apparecchio a LED può essere diviso in 4 parti principali (Fig. III.10):

1. la giunzione, che include tutta la struttura del chip;
2. la capsula, che include le lenti ottiche, la colla al silicone e i fosfori;
3. la piastra di raffreddamento (*head slug*), che include il blocco che conduce il calore e il riflettore ottico incassato al di sotto della giunzione;
4. il dissipatore vero e proprio (*head sink*), che è attaccato alla piastra di raffreddamento ed è costituito dal *cooler*.

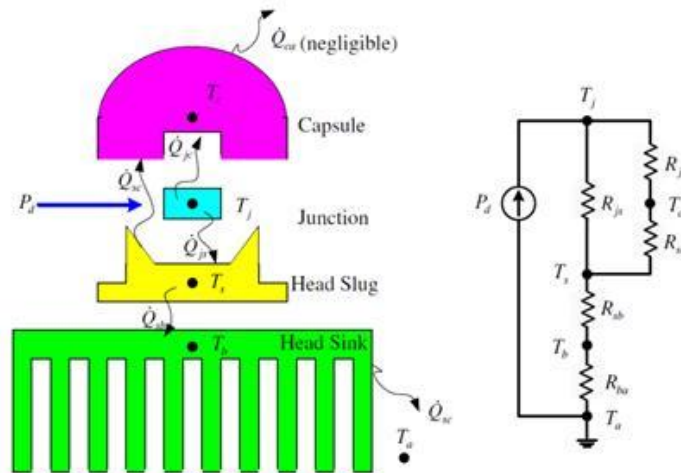


Figura III.10. Schematizzazione termica del Power LED: in azzurro la giunzione, in viola la capsula, in giallo la piastra di raffreddamento e il riflettore, in verde il cooler. Le varie parti possono essere schematizzate come resistenze termiche al passaggio di calore dalla giunzione (T_j) all'ambiente (T_a).

Quando la corrente elettrica viene applicata al chip, nella giunzione si verificano i due processi di la ricombinazione radiativa e ricombinazione non radiativa. Durante la prima, i fotoni sono emessi sotto forma di luce, mentre durante la seconda, l'energia elettrica è convertita in energia vibrazionale: in questo secondo caso l'energia degli elettroni è convertita in calore e da qui si estende alle strutture adiacenti. Per quanto riguarda il comportamento termico dei singoli componenti, si può osservare che:

- la *capsula* è in contatto con la giunzione, ma il trasferimento di calore all'ambiente tramite essa è trascurabile a causa della piccola superficie di scambio convettivo;
- la *piastra di raffreddamento*, al contrario, ha un'elevata conducibilità termica associata ad una massa relativamente piccola e provoca la maggior parte del trasferimento di calore dalla giunzione;
- il *cooler* è costituito di materiale molto conduttivo la cui ampia superficie è destinata a dissipare il calore in ambiente.

Collegamenti tra Power LED

I diodi High-Power possono essere puri e semplici diodi luminosi, composti da una giunzione opportunamente dimensionata, ovvero insiemi di LED collegati in serie o in serie-parallelo (Fig. III.11).

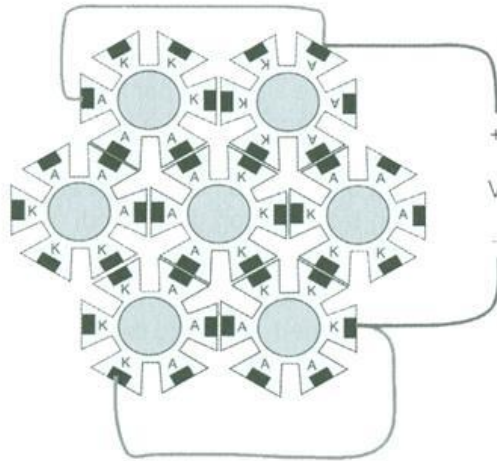


Figura III.11. Esempio di matrice di LED high-power collegati tra loro in parallelo.
La lettera A indica l'anodo (+), la K il catodo (-).

I LED a singola giunzione, più semplici, sono realizzati saldando il chip di semiconduttore su una piastrina di bachelite al di sopra della quale sono state precedentemente deposte le piazzole dei contatti e il chip stesso. Successivamente, si collega con un filo sottile l'anodo alla piazzola corrispondente (il catodo viene collegato dalla saldatura). In ultimo, si applica al chip, sulla parte superiore (zona a drogaggio P) la lente in resina che corregge l'indice di rifrazione e protegge il semiconduttore dagli agenti atmosferici e meccanici.

I componenti di maggior potenza sono sempre realizzati invece saldando il chip su un substrato di alluminio per permettere di smaltire il calore in maniera più efficace sia da solo che tramite l'ausilio del cooler. Dopo la saldatura del LED, sulla placca di alluminio viene applicato un anello di materiale isolante (bachelite) sul quale sono stati realizzati i contatti per catodo (preso dal supporto metallico inferiore) e anodo (collegato con un filo d'alluminio alla parte superiore del chip). Il montaggio viene completato con l'applicazione della cupola in resina.

Per collegamenti multipli la tecnica costruttiva è la stessa: il componente viene costruito disponendo tanti LED (ciascuno già provvisto della cupolina in resina trasparente) quanti ne servono sul substrato metallico, quindi si sovrappone un anello di isolante che fa da bordo e realizza i contatti. Le connessioni elettriche vengono poi realizzate usando le piazzole dell'anello isolante, che è in realtà una specie di piccolo circuito stampato di bachelite o vetroresina; i singoli

LED possono venire collegati in serie o in parallelo, oppure in serie-parallelo, a seconda della tensione di lavoro desiderata.

Spesso LED di elevata potenza, anche se composti da una singola giunzione, hanno più contatti di anodo e catodo disposti sul bordo del supporto isolante, il quale è sagomato in maniera da realizzare strutture multiple senza dover tirare fili di collegamento. La forma più utilizzata è ad esagono o ad ottagono, cosicché diviene semplice costruire apparecchi illuminanti di grande potenza come lampioni e fari semplicemente accostando i LED uno all'altro su ogni lato e saldandoli, ottenendo strutture "a nido d'ape". I contatti sono sempre la metà dei lati per l'anodo e altrettanti per il catodo, e la loro disposizione non è sempre uguale: si possono trovare componenti con anodi e catodi alternati tra loro, oppure con tutti gli anodi da una parte e i catodi dall'altra. L'assemblaggio si realizza accostando per ciascun LED i lati con gli elettrodi di uguale polarità (quando si intende realizzare una connessione in parallelo) o di polarità opposta (quando si intende realizzare un collegamento in serie o serie-parallelo).

Ottiche

Normalmente i LED vengono prodotti già muniti di una capsula di protezione, che funge anche da lente: esistono diversi tipi di ottiche, a seconda dell'applicazione. E' poi possibile che si abbia la necessità di modificare la forma del solido fotometrico uscente dal diodo, applicando ulteriori ottiche all'apparecchio che contiene i LED. Le ottiche montate direttamente sul diodo vengono chiamate ottiche primarie, mentre le ottiche che vengono montate al di sopra di quelle primarie prendono il nome di ottiche secondarie.

Ottiche primarie

Le ottiche primarie sono essenzialmente di tre tipi (Fig. III.12):

- *lambertiana*, in cui il fascio di emissione è distribuito secondo un angolo ampio;
- *laterale*, in cui il fascio è concentrato ai lati;
- *batwing*, in cui l'emissione è concentrata ad un angolo intermedio.

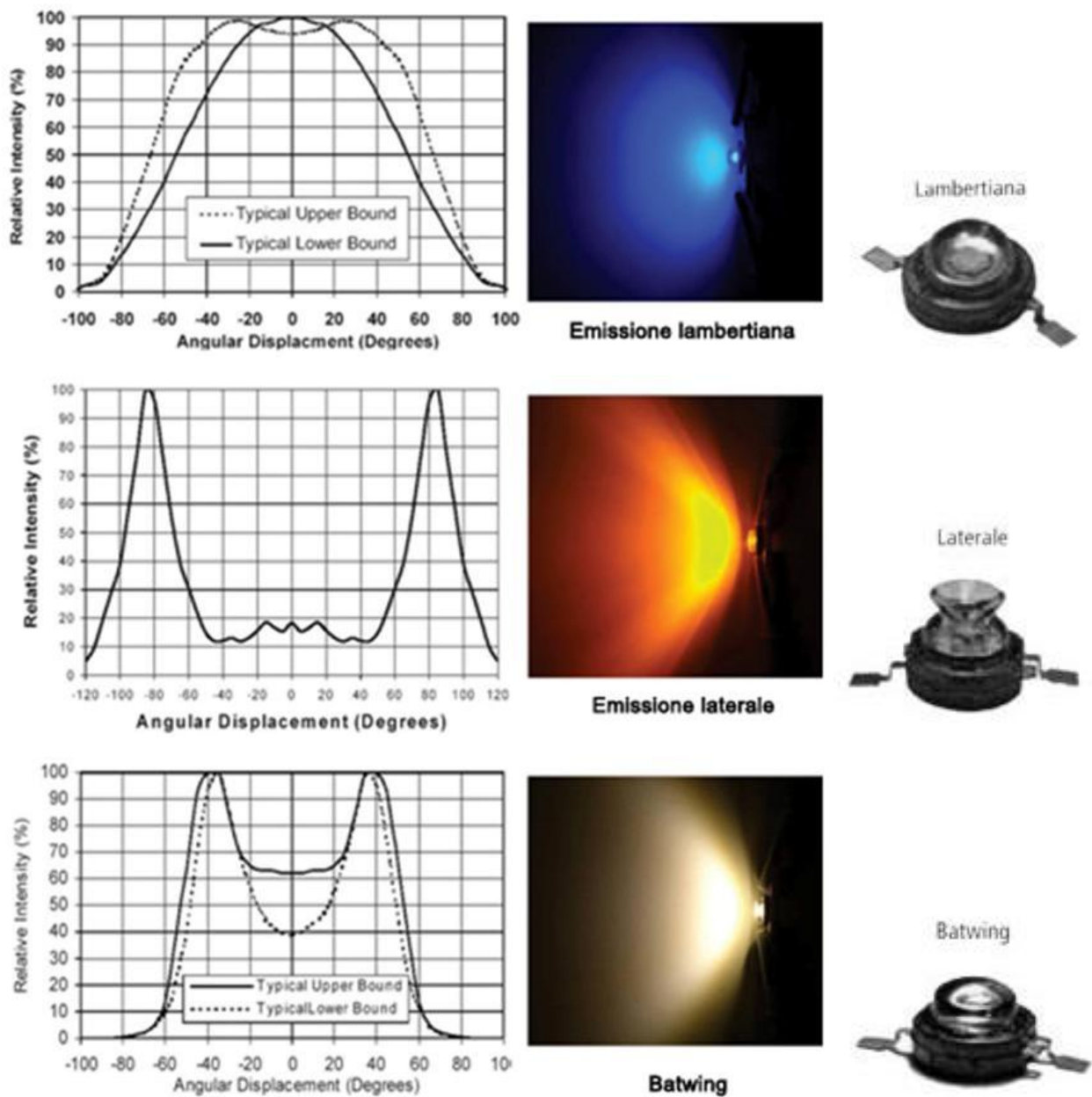


Figura III.12. Principali conformazioni del fascio luminoso in seguito all'applicazione delle ottiche primarie dei power LED.

Ottiche secondarie

Le ottiche secondarie sono tutte quelle componenti aggiuntive che sono aggregate al LED e che integrano il funzionamento delle ottiche primarie (Fig. III.13). L'ottica secondaria deve essere progettata tenendo conto delle caratteristiche emissive dell'ottica primaria, in particolare si considera l'estensione apparente, cioè l'estensione effettivamente "vista" del chip o del multi chip. Essa può essere diversa da quella reale, a causa dell'ingrandimento dovuto alla lente di ricopertura: più è piccolo il chip apparente e migliore è il rendimento dell'ottica secondaria, inteso

come rapporto tra il flusso luminoso erogato dal LED completo di ottica secondaria e il flusso erogato dal chip con ottica primaria. E' preferibile utilizzare LED privi di lente quando si prevede l'abbinamento con un'ottica secondaria: in assenza di quest'ultima conviene sfruttare al massimo il flusso del chip con i modelli forniti di lenti.

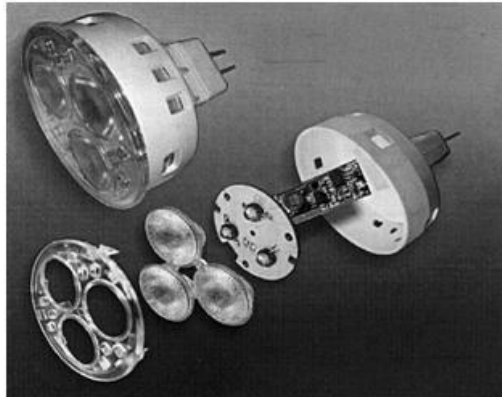


Figura III.13. Ottiche secondarie a riflettore di piccolo formato adatte per Power LED su circuito stampato fornito di ottica primaria.

Esistono tre tipi di ottiche secondarie (Fig. III.14):

- ottiche piene, in materiale plastico, funzionanti principalmente in riflessione totale interna (da cui l'acronimo TIR – *Total Internal Reflection*);
- ottiche vuote, in materiale plastico funzionanti in riflessione speculare (ottiche Reflector) al pari di piccoli riflettori;
- ottiche ibride, costituite da un riflettore cavo e da un elemento trasparente integrato con funzione di lente.

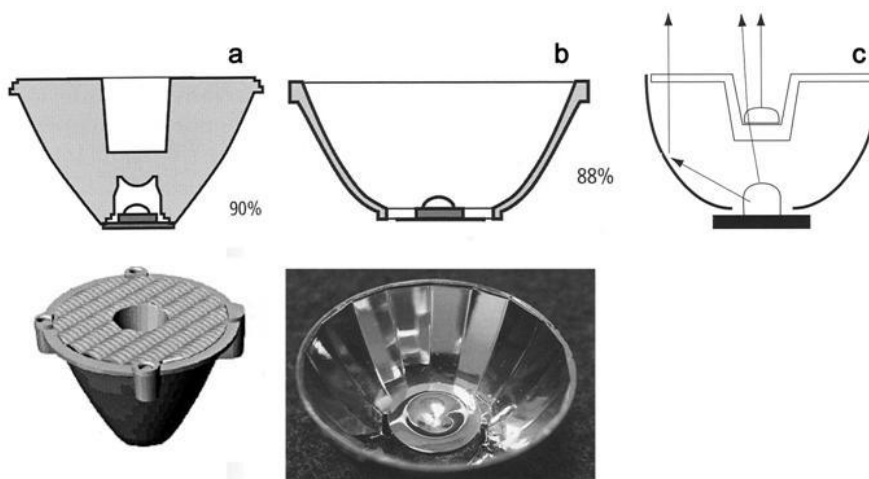


Figura III.14. Ottiche secondarie. (a) piene o TIR, (b) vuote, (c) ibride.

Capitolo IV

Proprietà ottiche dei LED e metodi per misurarle

I LED, intesi come sorgenti per l'illuminazione di ambienti interni ed esterni, sono definiti e classificati in base alle caratteristiche fotometriche, ottiche, elettriche [9] ed energetiche:

- flusso luminoso (lm);
- intensità luminosa (lm/sr o cd);
- distribuzione dell'intensità luminosa;
- colore della luce emessa,
- efficienza luminosa;
- indice di resa cromatica;
- dipendenza dalla temperatura e la resistenza termica;
- tensione di alimentazione;
- caduta di potenziale agli estremi del diodo o del sistema;
- corrente di alimentazione.

Flusso luminoso

Il flusso luminoso (lumen) è la potenza emessa dalla sorgente, e viene generalmente definito come il prodotto tra la potenza emessa dalla sorgente luminosa e il coefficiente di visibilità (Fig. IV.1) per ciascuna lunghezza d'onda di emissione.

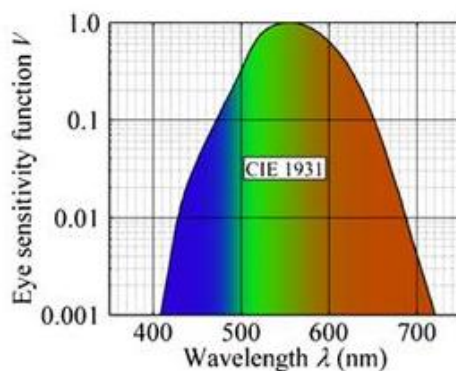


Figura IV.1. La funzione di sensibilità fotopica definita dalla CIE nel 1931.

Intensità luminosa

I LED sono comunemente caratterizzati dall'intensità luminosa, che generalmente varia con l'angolo di vista, e dipende dalle dimensioni dello strumento di misura e dalla sua distanza dalla sorgente, per cui risulta necessario stabilire una direzione e una distanza per misurare l'intensità. Il TC 2-46 della CIE [10] suggerisce tre assi di riferimento per le misurazioni (Fig. IV.2):

- l'asse ottico, asse in direzione del centroide del tracciato della radiazione ottica;
- l'asse del picco di intensità;
- l'asse meccanico, asse in direzione dell'asse di simmetria del corpo emettente.

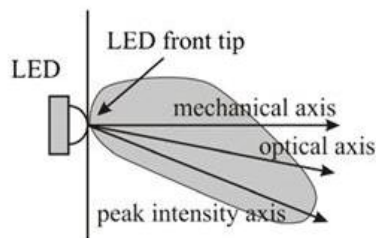


Figura IV.2. I tre assi dei LED definiti dalla CIE.

Ognuno di questi tre assi può essere utilizzato come asse di riferimento per la misura dell'intensità, ma l'asse ottico e l'asse del picco di intensità possono essere determinati solo dopo aver misurato l'andamento della radiazione ottica. Il TC 2-45 della CIE raccomanda due configurazioni per le misure di intensità, la condizione A (100mm di distanza dal sensore, angolo solido di 0,001sr) e la condizione B (316mm di distanza dal sensore, angolo solido di 0,01sr), prescrivendo come riferimento l'asse meccanico e come estensione del sensore 100mm² (Fig. IV.3). Poiché l'intensità delle sorgenti LED dipende dalla configurazione della misura, le misurazioni in condizioni CIE A e B forniscono la cosiddetta "Intensità LED media".

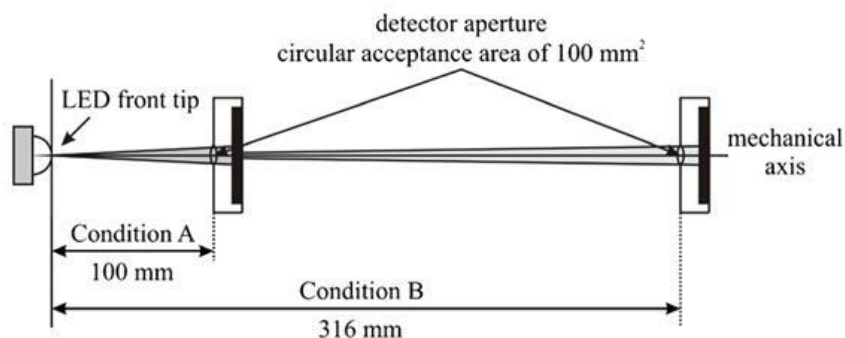


Figura IV.3. Condizioni di misura (A e B) dell'intensità luminosa definite dalla CIE.

Distribuzione dell'intensità luminosa

La distribuzione dell'intensità luminosa (Fig. IV.4) e il colore dell'emissione sono particolarmente critici per le applicazioni dove è necessario un controllo preciso o una caratterizzazione dell'emissione della sorgente. Le tipiche specifiche dei LED includono informazioni sull'intensità in funzione di uno degli assi di riferimento sopracitati e dell'angolo $\theta_{1/2}$, definito come l'angolo per cui il valore del profilo di intensità polare è metà del valore nella direzione dell'asse di riferimento (tipicamente varia da 9 a 120°). Le specifiche fornite si applicano al campo lontano dei LED, dove la distribuzione di intensità normalizzata non cambia con la distanza dalla sorgente.

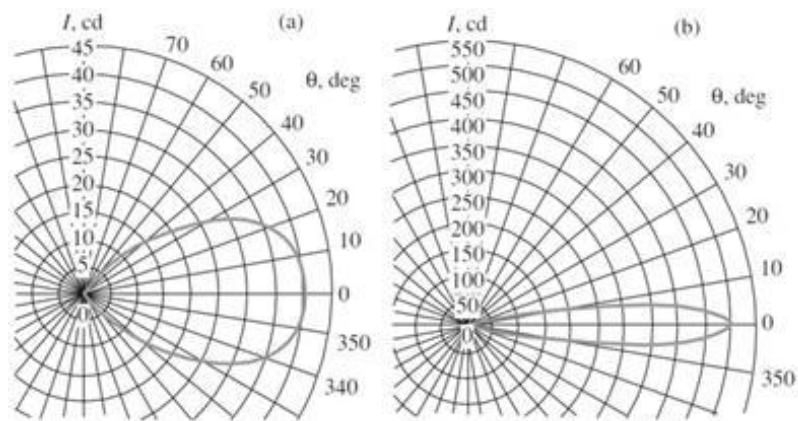


Figura IV.4. Esempi di curve fotometriche di LED.

Colore

Il colore dei LED è comunemente definito dalle due coordinate cromatiche (x,y) derivate dalle coordinate (X,Y,Z) dello spazio colore CIE. Il colore dei LED bianchi è inoltre spesso specificato sotto forma di temperatura correlata di colore (CCT), che è definita come la temperatura del corpo nero che emette luce dello stesso colore percepito. Più spesso, però, il colore dei LED è specificato attraverso la lunghezza d'onda di picco e la larghezza dello spettro (tutta la larghezza o metà della larghezza massima).

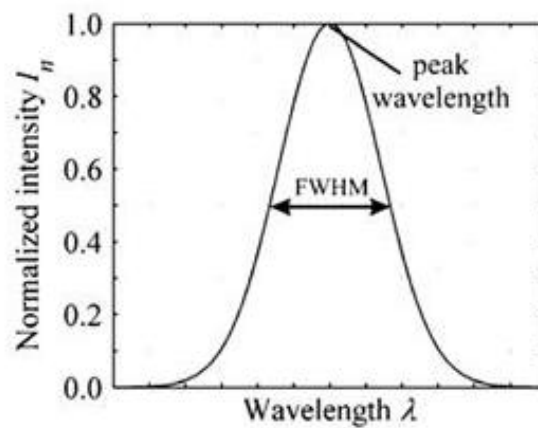
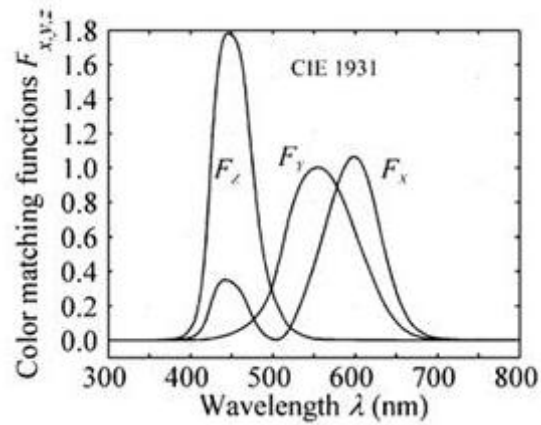
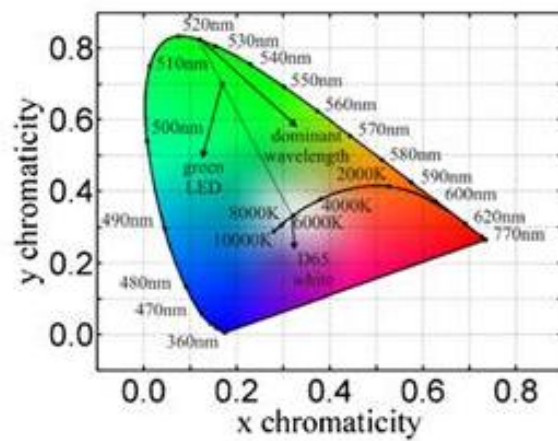


Figura IV.5. Diagramma di cromaticità CIE xy, in alto, funzioni XYZ definite dalla CIE nel 1931, a centro pagina, approssimazione dello spettro del colore dei LED attraverso una funzione esponenziale, in basso.

Efficienza luminosa

L'efficienza luminosa di una sorgente LED è il rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza assorbita: essa è considerevolmente diversa dall'efficienza luminosa di un apparecchio LED, perché questo può essere costituito da una o più sorgenti luminose, drive elettronici e altri componenti per la protezione e la distribuzione della luce, i quali fanno calare l'efficienza globale.

Indice di resa cromatica (CRI)

L'indice di resa cromatica CRI è un altro parametro importante per la performance di una sorgente luminosa e valuta la capacità della sorgente di rendere i veri colori di un oggetto. E' noto che c'è un rapporto di esclusione reciproca tra un buon indice di resa cromatica e una buona efficienza luminosa. Secondo quanto proposto dal CIE TC 1-62, l'Indice di Resa Cromatica non è applicabile per prevedere la resa cromatica di un set di sorgenti luminose tra cui i LED [11], e per questo ha raccomandato lo sviluppo di un nuovo indice, attualmente in fase di studio e ricerca.

Resistenza termica dell'involucro e temperatura di giunzione

La resistenza termica dell'involucro influisce significativamente sulla temperatura di giunzione di un LED: essa è la somma della resistenza dell'involucro interno (dalla giunzione alla capsula) e di quella esterna (dalla capsula verso l'ambiente). Mentre la resistenza termica interna è determinata dalle caratteristiche di progetto dell'involucro e dai materiali, la resistenza esterna può essere ulteriormente ridotta attraverso l'uso di un dissipatore di calore, con temperatura minore di quella di giunzione.

Fattori che influenzano la qualità dei LED

Tre fattori principali influenzano la qualità dei LED:

- l'iniziale variabilità delle caratteristiche ottiche ed elettriche;
- la dipendenza di tali caratteristiche dalla temperatura e dalla corrente elettrica;
- la degradazione spettrale.

Iniziale variabilità delle proprietà ottiche ed elettriche

Le proprietà ottiche ed elettriche iniziali di una partita di LED, come la corrente in ingresso, l'intensità, il colore e il profilo della luce emessa, variano a causa delle imperfezioni nei materiali e delle variazioni nel processo di produzione (Fig. IV.6). In generale, la variabilità della distribuzione dell'intensità luminosa e del colore dell'emissione dipende dalle tolleranze nel posizionamento del chip e nella conformazione dell'involucro: tali variazioni possono essere fondamentali quando si producono sorgenti omogenee in colore e intensità. Le variazioni di intensità sono veloci durante la fase iniziale e poi si stabilizzano all'interno di un tracciato di degradazione più regolare [12]. Poiché è impossibile alterare a posteriori (cioè dopo la produzione) le caratteristiche dei LED, essi sono suddivisi dai produttori secondo il loro voltaggio in ingresso, intensità e colore.

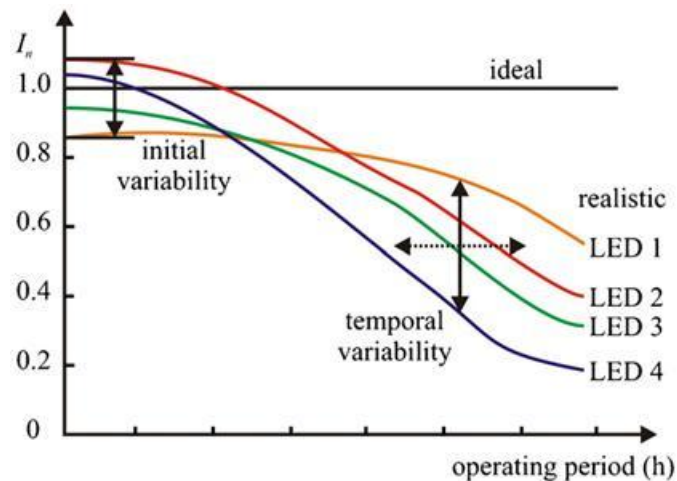


Figura IV.6. Variabilità di intensità iniziale, degradazione nel tempo dell'intensità, variabilità temporale del processo di degradazione di quattro ipotetici LED della stessa partita.

La variazione dei parametri all'interno della medesima classe può essere relativamente ampia:

- l'intensità luminosa può variare fino al 30%;
- il voltaggio in ingresso può variare tipicamente di 0,2V;
- le coordinate cromatiche (x,y) sono solitamente definite da una regione approssimativamente quadrangolare di dimensione variabile da 0,005 a 0,03 unità, e variano anche al di fuori di questa regione. Tali regioni prendono il nome di binnings.

Le proprietà elettriche e meccaniche dei LED e la loro modalità di degradazione sono influenzati da una gran quantità di fattori, tra cui: il materiale del chip, la resistenza termica dell'involucro, la stabilità meccanica, il design del prodotto, il carico di corrente e fattori ambientali (temperatura ambientale, umidità, scariche elettrostatiche). Mentre brevi periodi di funzionamento dei LED

all'interno di quelle specificate dal produttore causano solo cambiamenti reversibili delle proprietà ottiche ed elettriche, il funzionamento per lunghi periodi di tempo causa una degradazione stabile del semiconduttore e /o dell'involucro.

Dipendenza dell'intensità dalla temperatura e dalla corrente

La temperatura di giunzione T_j può influire in maniera significativa su molti dei parametri di un diodo, come il voltaggio di mandata, la lunghezza d'onda di picco (e quindi il colore), la larghezza della banda di emissione e la dinamica del processo di degradazione. La dipendenza dell'intensità dalla temperatura è una caratteristica importante per un LED: conoscerla può essere molto utile sia per pianificare test accelerati di durata di vita, sviluppando modelli di previsione basati sui risultati ottenuti, sia per progettare le proprietà termiche del prodotto. Esistono diverse tecniche disponibili per misurare la temperatura di giunzione, ma la più pratica ed utilizzata è basata sulla misurazione del voltaggio in ingresso: il procedimento consiste nell'inserire i diodi all'interno di un forno a temperatura controllata dove la temperatura di giunzione, che si può approssimare con la temperatura del forno, viene fatta variare gradualmente (da 20 a 120°C) mentre si misura il voltaggio in ingresso. I dati così ottenuti sono poi utilizzati per stimare la temperatura in condizioni reali: l'accuratezza del metodo è stimata essere attorno a 2°C di errore.

Degradazione spettrale

La degradazione spettrale, cioè la degradazione della brillantezza e del colore, è uno dei temi più studiati, ed è legata a molteplici cause. Dal punto di vista fisico, l'aumento di centri di ricombinazione non radiativa nella regione attiva, dovuto a sua volta all'aumento della temperatura di giunzione associata ad un'alta corrente di iniezione, causa la degradazione dell'intensità. Un secondo processo a cui è legata la degradazione è la diminuzione dell'efficienza dei fosfori, principalmente utilizzati nei LED bianchi, sempre in seguito all'eccessiva temperatura nella giunzione [13]. Un terzo motivo è la degradazione degli incapsulanti epossidici, che non devono superare la temperatura operativa massima di circa 120°C. Le classiche capsule da 5mm, che sono state utilizzate per decenni, hanno una resistenza termica di circa 250K/W e si riscaldano rapidamente se il LED viene alimentato con corrente elevata, mentre gli involucri più recenti utilizzano un collegamento metallico che lega direttamente il chip al dissipatore di calore attraversando l'involucro, facendo diminuire la resistenza termica fino a 5K/W.

Valutazione della qualità e linee guida

Per valutare la qualità di una partita di LED si verificano le loro caratteristiche principali nel minor tempo possibile, di modo che le informazioni ottenute possano essere poi utilizzate in maniera

efficiente per la progettazione, la produzione ed il mantenimento di vari prodotti. Diversi autori si sono occupati della variabilità iniziale delle proprietà ottiche ed elettriche ed hanno proposto diverse soluzioni. Anche la dipendenza dalla temperatura dell'intensità e delle coordinate cromatiche della luce è stata analizzata in molti articoli: in particolare la prima è il fattore più interessante e quindi il più studiato, e i metodi proposti per la sua previsione sono solitamente basati su un invecchiamento precoce ottenuto con un'alta corrente. Problema meno approfondito invece è quello della degradazione del colore, a cui solitamente ci si riferisce solo in modo qualitativo, e la variabilità della degradazione.

In Fig. IV.7-10 sono evidenziati alcuni dei fattori che influenzano negativamente la qualità di una partita di LED.

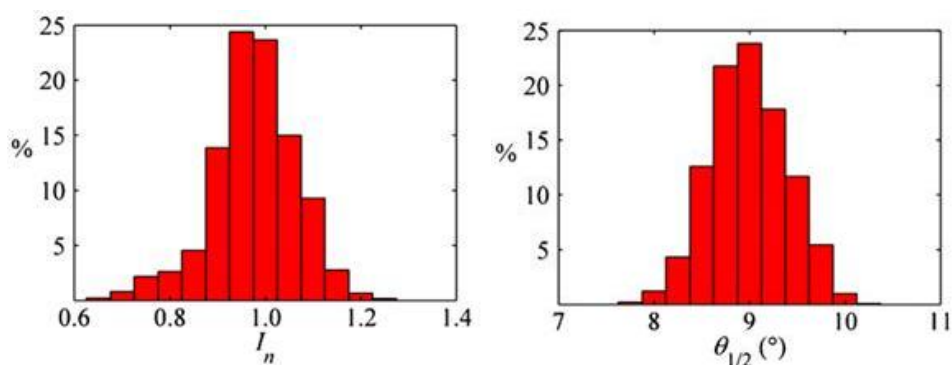


Figura IV.7. Distribuzione iniziale delle intensità in una partita di LED (a sinistra) e distribuzione iniziale dell'angolo di vista in una partita di LED (a destra).

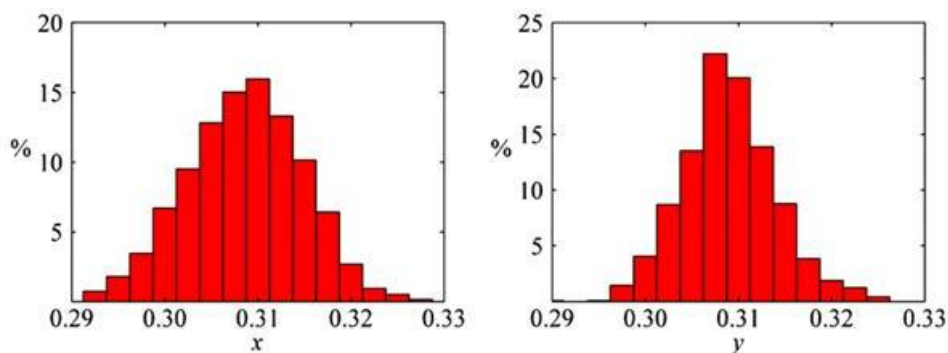


Figura IV.8. Distribuzione iniziale del colore (x,y) in una partita di LED.

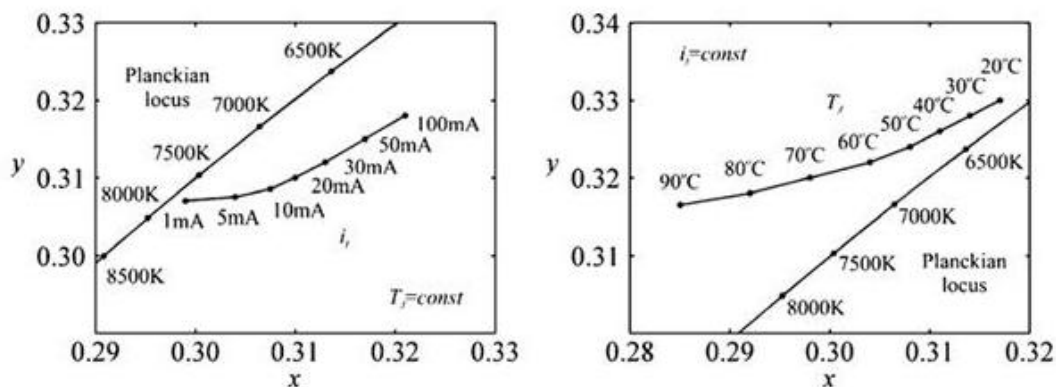


Figura IV.9. Dipendenza elettrica del colore di un LED bianco (a sinistra), dipendenza dalla temperatura del colore di un LED bianco (a destra).

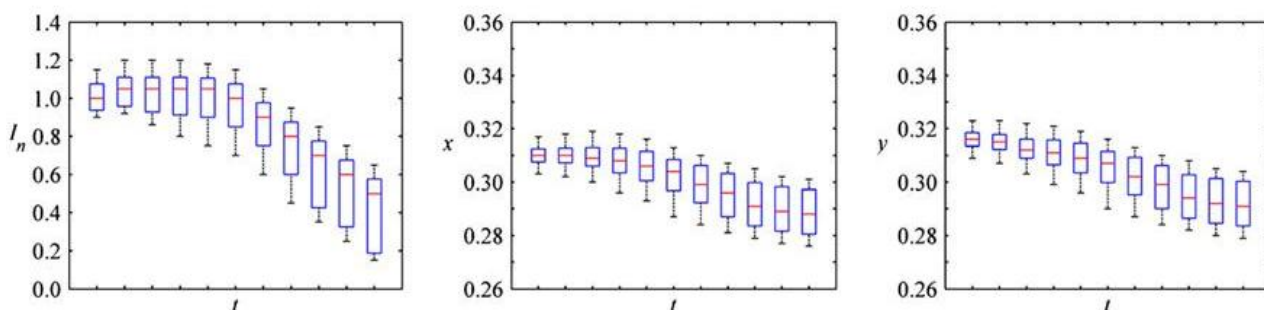


Figura IV.10. Degradazione di intensità e colore con corrispondente variabilità in una partita di LED.

Variabilità iniziale delle proprietà ottiche ed elettriche

I produttori di LED solitamente dividono i chip a seconda del voltaggio in ingresso, dell'intensità luminosa e del colore della luce emessa. Il consumatore di solito può scegliere tra tre e cinque classi per ognuno di questi tre parametri: la tipica variazione dei parametri all'interno di uno specifico gruppo è in genere relativamente alta, per cui l'intensità può variare fino al 30%, il voltaggio fino a 0,2V e le coordinate cromatiche (x,y) sono solitamente specificate da una regione quadrangolare di dimensione da 0.005 a 0,03 unità. Ci sono anche diversi sistemi disponibili sul mercato e basati su uno spettrometro per misurare le proprietà ottiche dei LED, ma sono relativamente costosi e possono velocemente diventare scomodi per analizzare grandi quantità di sorgenti. I goniometri, comunemente utilizzati per caratterizzare l'emissione dei LED, sono ad oggi lo strumento più attendibile.

Dipendenza elettrica e dalla temperatura

Esistono diversi studi sulla dipendenza dell'intensità del LED dalla temperatura di giunzione. In generale, a temperatura di giunzione costante, l'intensità risulta funzione approssimabile come

lineare rispetto al carico di corrente, e diminuisce esponenzialmente in funzione della temperatura di giunzione, a corrente costante. La variazione dell'intensità da picco a picco di LED rossi al variare della temperatura da -20 a 80°C può superare il 90%.

Una soluzione iniziale al problema della temperatura di giunzione è stata quella di implementare la superficie del LED con un filtro ottico dielettrico multistrato: la compensazione della temperatura ottenuta ha portato ad una variazione massima del 10% nel range di temperatura detto. Questo approccio ha diversi inconvenienti, tra cui la complessità di progettazione del filtro multistrato e una significativa riduzione dell'efficienza del LED. Un'altra soluzione è nata dall'osservazione che le curve isointensità del diodo nel piano corrente-voltaggio sono quasi rette al variare della temperatura: sulla base di questa proprietà, è stato derivato un valore di voltaggio di polarizzazione e resistenza per un circuito semplice e le misure hanno mostrato che la variazione di intensità scende al 6% sempre nello stesso range di temperatura. Il punto debole di questo sistema è che anche l'efficienza del LED diminuisce a causa delle perdite di calore nelle resistenze in serie.

Anche la dipendenza del colore della luce emessa dalla temperatura e dalla corrente è stato studiato da diversi autori. Ricerche recenti hanno concentrato l'attenzione sulla costruzione di sorgenti LED a luce bianca con o senza fosfori con sorgenti di-tri-quadricromatiche, perché l'effetto di un surriscaldamento della giunzione o di un aumento della corrente degradano in fretta il LED virando la luce bianca verso zone più saturate. Il picco di lunghezza d'onda, l'ampiezza spettrale e l'intensità luminosa dipendono fortemente dalla temperatura di giunzione: per una variazione della temperatura da 20 a 80°C, le coordinate cromatiche possono cambiare fino a 0,03unità, che per una temperatura di colore di 6500K è più del doppio della regione quadrangolare più o meno sovrapponibile ad una ellisse di MacAdam [14], correntemente utilizzata come cambiamento massimo tollerabile dall'industria dell'illuminazione. Inoltre, le coordinate cromatiche dei LED da 5mm possono cambiare fino a 0,02 unità per una corrente che va da 1 a 30mA, anche se la temperatura di giunzione rimane costante. Un alto indice di resa cromatica (più di 80) può essere mantenuto aggiustando l'intensità dei singoli LED a seconda della temperatura di giunzione (ambientale), richiedendo dispositivi elettronici che integrino la compensazione di temperatura. Da quanto detto emerge la necessità di stabilizzare intensità e colore dei LED se si opera con temperature molto variabili.

Degradazione

Questa sezione è dedicata ai metodi per stabilire il livello di degradazione spettrale (intensità e colore), la degradazione delle caratteristiche elettriche e la corrispondente variabilità della degradazione. Tutto quanto qui trattato è in fase di ricerca sperimentale, per cui verranno riportati solo risultati parziali ancora oggetto di conferma e verifica da parte di Istituzioni ed Organizzazioni tra cui diversi Comitati Tecnici della CIE.

Degradazione dell'intensità

Yanagisawa [15] ha studiato la degradazione accelerata di LED blu a GaN sotto stress da elevata corrente ed ha ottenuto un'equazione di stima della durata di vita come funzione della corrente I . Il metodo proposto è basato sull'approssimazione della degradazione dell'intensità in funzione del tempo t e della corrente I attraverso un modello a tre variabili (α, β, A) da cui si può derivare il tempo di mantenimento del 50% del flusso, cioè il tempo che il LED impiega per dimezzare la sua intensità iniziale I_0 .

$$1 - \frac{I}{I_0} = \alpha \ln \frac{t}{t_0}$$

La regione di intensità normalizzata per cui è proposta l'approssimazione della degradazione dell'intensità risulta valida in funzione del carico di corrente. Questo metodo è stato testato su un tipo di LED a luce bianca basato su GaN e alimentato da tre correnti (40, 60, 80mA) per 2000 ore. Il tempo misurato per il mantenimento del 50% del flusso al di sopra della corrente nominale ha mostrato di essere in accordo con le durate di vita stimate.

Chuang et al [16] ha proposto un modello teorico cinetico per la degradazione dei LED con materiali semiconduttori del II e IV gruppo: tale modello porta a soluzioni analitiche e curve di degradazione che sono inizialmente esponenziali e seguono una dipendenza inversamente proporzionale al tempo nel comportamento asintotico. Il tempo di dimezzamento del flusso calcolato prende in considerazione sia il carico di corrente che la temperatura di giunzione. Per verificare questo metodo sono stati utilizzati due gruppi di led blu: in un gruppo sono state utilizzate nove correnti diverse (da 10 a 70mA), nell'altro cinque temperature diverse (da 20 a 80°C), ed in entrambi i casi è stato verificato che il modello presenta un errore minore del 20%.

Narendran et al [17] hanno proposto un metodo sperimentale di degradazione tramite corrente per stimare la vita dei LED. Il metodo è basato sul ricalcare le curve normalizzate di degradazione con un modello esponenziale

$$I_n = e^{-\alpha_i t}$$

Le costanti di decadimento α_i , ottenute per diversi carichi di corrente al di sopra di quella nominale, sono poi approssimate dal modello esponenziale:

$$\alpha_i = e^{ki}$$

che definisce la costante di decadimento α_i (curva di degradazione) per ogni corrente di funzionamento. Il modello proposto è stato verificato su LED bianchi InGaN fatti funzionare a 6 diverse correnti (50, 70, 90, 110mA). Le costanti di decadimento trovate sperimentalmente per 4 di queste correnti sono poi state utilizzate per determinare i parametri del modello e prevedere la durata di vita di due partite di LED alimentati a tensioni inferiori (20 e 30mA). Il metodo ha presentato una buona approssimazione (30% di errore). La stessa metodologia è poi stata impiegata dagli stessi autori per calcolare la degradazione dei LED in funzione della temperatura di giunzione [18]. Le curve di intensità normalizzata sono state approssimate da un modello esponenziale secondo la precedente equazione. Le costanti di decadimento ottenute corrispondono a temperature di giunzione da 69 a 115°C e sono state approssimate nel modello esponenziale:

$$\alpha_{T_j} = e^{kT_j}$$

Le costanti di decadimento previste e misurate sono simili (errore del 15%). Purtroppo, tutte le costanti di decadimento misurate sono state utilizzate per determinare il modello predittivo, quindi non si hanno dati sulla predizione dell'errore.

Degradazione del colore

Diversi studi hanno trattato il problema della degradazione del colore dei LED nel corso del periodo di funzionamento, sotto diversi carichi di corrente, cercando di descrivere qualitativamente il processo [19,20]. In generale, comunque, poche ricerche sono state dedicate allo sviluppo di modelli per la stima accelerata della degradazione del colore in funzione dei parametri che la influenzano.

Un metodo sperimentale di previsione accelerata relativamente semplice basato sulla corrente è stato proposto da Burmen et al [21]. Il metodo è basato sull'assunzione che il colore (x, y) come funzione della degradazione di intensità è indipendente dal carico di corrente i fino alla costante di deviazione. Le costanti di deviazione, $C_x(i, i_m)$ e $C_y(i, i_m)$ per le coordinate di colore x e y rispettivamente, possono essere ottenute per ogni carico di corrente i sottraendo le corrispondenti coordinate cromatiche iniziali (x,y) ad una data corrente di riferimento i_m :

$$C_{\{x,y\}}(i, i_m) = \{x, y\}(t = 0, i) - \{x, y\}(t = 0, i_m)$$

Le coordinate di colore previste (x,y) per una data degradazione dell'intensità d e per ogni corrente sono ottenute dalla:

$$\{x, y\} = (T_d(i), i) = \{x, y\}(T_d(i_m), i_m) + C_{\{x,y\}}(i, i_m)$$

dove $T_d(i)$ è la durata di vita prevista al carico di corrente i e $T_d(i_m)$ è la durata di vita misurata alla corrente i_m in riferimento al colore. L'errore medio di previsione riportato è di circa 0,002 unità cromatiche.

7.8.3.3 Degradazione elettrica

La degradazione delle caratteristiche elettriche è probabilmente quella che influisce meno sulla performance del LED. Molti autori hanno riportato un aumento della resistenza in serie nella regione dei voltaggi elevati e un aumento della corrente nella regione a bassa tensione. La maggior parte dei lavori finora presentati discute sulle cause dei cambiamenti nelle caratteristiche elettriche di diversi tipi di LED sottoposti a diverse correnti, anche se questi cambiamenti sono relativamente piccoli nelle regioni di correnti-voltaggio normali di funzionamento e quindi raramente di interesse.

7.8.3.4 Variabilità della degradazione

In bibliografia è presente un solo studio [21] sulla variabilità del processo di degradazione, e solamente in relazione a intensità e colore. La previsione della variabilità della degradazione $V(i,T)$ definita dalla differenza tra le intensità massime e minime (colore) divisa per l'intensità media (colore) in un set di LED:

$$V(i, T) = \frac{\max(I(i, t)) - \min(I(i, t))}{\text{median}(I(i, t))}$$

è basata sull'assunzione che la variabilità sia una funzione della degradazione dell'intensità d e sia indipendente dal carico di corrente i:

$$V_{\{x,y,l\}}(T_d(i)) = V_{\{x,y,l\}}(T_d(i_m))$$

Il metodo proposto è stato testato su otto partite di LED da 5mm di 6 differenti produttori e i risultati ottenuti hanno mostrato una buona sovrapposizione tra la variabilità misurata e quella calcolata.

Modelli per l'analisi dello stress di funzionamento

Diverse Organizzazioni forniscono modelli prestabiliti per l'analisi parziale dello stress. Lo standard originale, valido a livello mondiale per l'analisi dell'affidabilità elettronica, è l'US Military Handbook 217F [22], che include anche una specifica speciale MIL-S-19500 utilizzata per i dispositivi ortoelettronici. Esistono poi molti altri standard simili, come il Chinese Military Standard GJB/z 299B, il HRD5 sviluppato dalla British Telecommunications, lo standard di affidabilità CNET

93, sviluppato da France Telecom, che forniscono modelli e istruzioni per calcoli dell'affidabilità a vari livelli, come sistemi e sottosistemi componenti.

Considerazioni ed approfondimenti sulla qualità dei LED

Capire e valutare i fattori che influenzano la qualità dei LED, come la variabilità iniziale, la dipendenza dalla temperatura e dalla corrente, e la degradazione delle proprietà ottiche ed elettriche, è essenziale per la progettazione, la produzione e la manutenzione di prodotti LED di alta qualità (Tab. IV.1).

Tabella IV.i. Proprietà ottiche ed elettriche dei LED e fattori che ne influenzano la qualità.

I tre segni (+ = sì; ? = non noto; - = no) indicano se il fattore che influenza la qualità è potenzialmente problematico per i prodotti LED (p), se è stato studiato (s), se è solitamente specificato dai produttori (g).

Proprietà dei LED	Variabilità iniziale			Dipendenza						Degradazione temporale		
				dalla Temperatura			elettrica					
	p	s	g	p	s	g	p	s	g	p	s	g
Intensità	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Colore	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-
Colore e distribuzione dell'intensità luminosa dell'emissione	+	+	-	?	-	-	-	-	-	?	-	-
Resistenza termica	+	-	-	-	-	-	-	-	-	?	-	-
Voltaggio di mandata	+	+	+	+	+	+				+	+	-

I produttori stanno dividendo i LED a seconda dell'intensità iniziale, del colore e del voltaggio, ma la variazione di queste proprietà dopo la classificazione è ancora relativamente elevata per le richieste dell'illuminazione. Al di là di questo, è ormai accettato che i LED siano sottoposti a rapidi cambiamenti di intensità durante il primo periodo di funzionamento e poi si stabilizzano su un tracciato di degradazione più sistematico. I sistemi di visione proposti [23] possono essere soluzioni economiche a questi problemi ed è possibile dividere i LED per intensità, colore e diverse altre proprietà ottiche. Per applicazioni che richiedono un controllo o una caratterizzazione precisi della sorgente, la distribuzione del colore e dell'intensità luminosa dell'emissione potrebbero essere stabiliti velocemente con il metodo della *imaging sphere* [24] (Fig. IV.11).

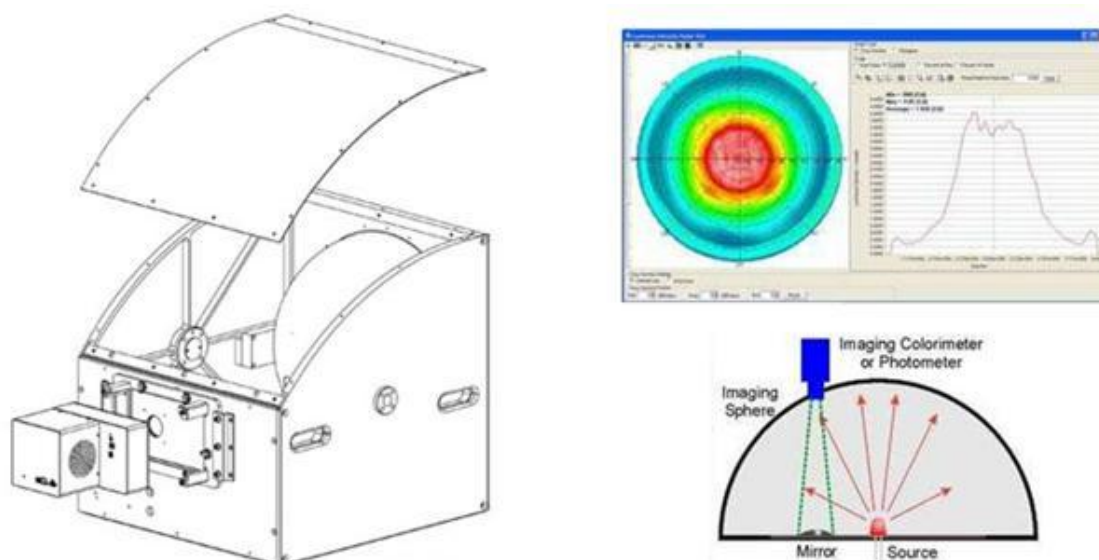


Figura IV.11. *Imaging sphere*: assonometria dello strumento, schermata di output e schema di funzionamento.

La dipendenza dell'intensità e del colore dalla temperatura di giunzione dei LED è particolarmente problematica per i prodotti che funzionano in ambienti esterni non controllati, in cui le variazioni di temperatura possono superare facilmente i 50°C. Alte temperature dell'ambiente comportano una diminuzione sensibile di intensità e durata di vita dei LED e possono richiedere l'uso di sistemi di raffreddamento attivo in combinazione con nuovi metodi progettati per diminuire il coefficiente di temperatura dell'intensità. Ancora più problematica è la stabilizzazione dei LED di-tri-quadricromatici: mantenere stabile il colore richiede l'aggiustamento dell'intensità dei singoli LED secondo la temperatura di giunzione, che si può raggiungere impiegando drive elettronici a risparmio energetico con sistema integrato di compensazione della temperatura.

I metodi teorici e sperimentali per la previsione della degradazione dell'intensità sono basati su quattro metodologie di previsione, che prendono in considerazione la corrente e/o la temperatura di giunzione: lo scopo è quello di ottenere nel minor tempo possibile previsioni affidabili della durata di vita dei LED in condizioni normali di funzionamento. Un metodo [25] puramente teorico deriva la forma della funzione di degradazione dell'intensità come funzione dell'efficienza quantica iniziale, del carico di corrente e della temperatura di giunzione di un LED. Diversi altri metodi [26-29] assumono una certa conformazione della funzione di degradazione descritta a partire da uno o due parametri, che sono prima inseriti all'interno dei tracciati di degradazione misurati a diversi carichi di corrente o temperature di giunzione. I valori dei parametri calcolati sono poi utilizzati per prevedere i parametri del tracciato di degradazione a corrente arbitraria o a temperatura di giunzione arbitraria attraverso un modello esponenziale o di potenza. In contrasto, un modello empirico recentemente proposto e basato su 4 parametri per la degradazione dell'intensità [30] incorpora sia la corrente che il tempo, senza considerare l'effetto della temperatura di giunzione. Cionondimeno, il modello si basa sui risultati di uno degli esperimenti condotti in maniera più estesa sulla degradazione di intensità dei LED. Le due metodologie descritte portano a risultati di previsione della durata di vita relativamente buoni. Ad ogni modo, sono altamente specifici e richiedono la misura iniziale dell'efficienza quantica di tutti i LED utilizzati nell'esperimento o la

conoscenza dell'andamento del tracciato di degradazione che varia in modo significativo a seconda del tipo di LED.

Un approccio statistico più generale alla durata di vita [31] è basato sulla stima del tasso di rottura dei LED a differenti carichi di corrente e poi la derivazione del tempo medio di rottura attraverso un modello di potenza. Anche se questo metodo non prende in considerazione la temperatura di giunzione, potrebbe essere facilmente modificato in questo senso. Ad oggi, comunque, non sono stati calcolati gli errori di previsione. L'ultimo metodo [32] non fa ipotesi sulla forma del tracciato di degradazione: la durata di vita di un LED attraversato da corrente arbitraria è previsto a partire dalla durata di vita a correnti nominali superiori utilizzando un modello di previsione esponenziale. L'errore di previsione riportato sulla durata di vita è il più piccolo tra tutti i metodi discussi. Anche se questo metodo è molto pratico, ha una limitazione fondamentale, che si applica a tutti i metodi di previsione della durata di vita dei LED, ed è quello di non prendere in considerazione la temperatura di giunzione. Questo si attribuisce al fatto che la temperatura di giunzione dipende dal LED specifico e dall'ambiente circostante e quindi le durate di vita sono valide solo se i LED operano a una temperatura simile a quella utilizzata per fare le previsioni.

La degradazione del colore nei LED è aspetto molto utile per progettare e mantenere vari tipi di prodotti, che richiedono un certo livello di stabilità del colore, ma che non hanno sistemi di aggiustamento dinamico. Purtroppo, la maggior parte delle ricerche in questo ambito è stata indirizzata solo all'identificazione delle cause della degradazione a differenti carichi di corrente e a fornire una descrizione qualitativa del processo. L'unico metodo proposto per la previsione della degradazione del colore [32] ha fornito previsioni relativamente buone con errori ben al di sotto della regione quadrangolare di dimensioni approssimativamente uguali a quella dell'ellisse in sette passi di MacAdam comunemente utilizzata come cambiamento tollerabile massimo del colore dall'industria dell'illuminazione [33]. Poiché il metodo è stato testato solo per i LED da 5mm a GaN, non è chiaro se la medesima metodologia si possa applicare ad altri tipi di LED. Le previsioni sono basate sul carico di corrente e non prendono in considerazione la temperatura di giunzione, quindi soffrono della stessa limitazione appena discussa.

La degradazione delle caratteristiche elettriche è probabilmente la meno problematica. Un aumento di 0,1V nel voltaggio di mandata non ha praticamente impatto sulla performance del prodotto, perché solitamente i LED sono governati dalla corrente e non dal voltaggio. La degradazione può essere più problematica per le misure della temperatura di giunzione, comunemente impiegate durante i test di vita accelerata, che è basata sulla dipendenza dalla temperatura del voltaggio di andata a corrente costante. Un cambiamento nelle caratteristiche elettriche diminuirà l'accuratezza delle misure e può richiedere una ricalibrazione frequente.

Altro aspetto importante è la variazione della degradazione spettrale, cioè la variabilità all'interno della medesima partita dell'intensità e del processo di degradazione colorimetrica, attribuibile a numerosi fattori associati con le variazioni nel processo produttivo e con il design del prodotto LED. Uno di questi fattori è la variabilità della resistenza termica della capsula, che provoca nei diversi LED diverse temperature di giunzione anche se sono attraversati dalla stessa corrente, e quindi hanno differenti dinamiche di degradazione. Un altro fattore è il design del prodotto LED: un gradiente di temperatura nel circuito causa nei LED diverse temperature di giunzione e quindi

diverse velocità di degradazione. Finora, è stato proposto solo un metodo [34] per stabilire tali variazioni di degradazione all'interno di una partita di LED, anche se il tema potrebbe essere di grande interesse per i produttori di display a LED a colori, di unità di illuminazione per sistemi di visione meccanizzata, sistemi colorimetrici e altri prodotti LED con necessità di elevata stabilità spettrale.

In contrasto con i metodi precedentemente discussi, i modelli di analisi dello stress incorporano tutti i fattori che influenzano negativamente la qualità, eccetto la degradazione del colore e la variabilità di degradazione. La stima della velocità di rottura, come suggerito dall'US Military Handbook 217F, è basata sul fattore di qualità del LED, sul fattore ambientale, e sulla temperatura di giunzione. I valori dei parametri relativi al dispositivo specifico (tipo di dispositivo, degradazione dell'intensità) forniti nell'Handbook sono gli stessi per tutti i tipi di LED e quindi i risultati ottenuti impiegando questi modelli possono fornire solo delle approssimazioni. Ad ogni modo, i metodi discussi possono essere impiegati per ottenere un set di valori per uno specifico tipo di LED, rendendo molto più accurate le approssimazioni sulla durata di vita.

Le linee guida proposte [35] per determinare la vita utile dei componenti LED e dei sistemi per l'illuminazione generale rappresenta un enorme passo avanti verso la standardizzazione, anche se forniscono solo istruzioni di massima su come estrapolare (es. decadimento esponenziale) la vita utile a partire dalle misure effettuate, e non forniscono istruzioni per verificarla. Altra questione aperta è quella della durata del periodo di invecchiamento iniziale e di misurazione: anche se è stato detto che per ottenere previsioni ragionevoli della vita utile il tempo iniziale di invecchiamento e di misura potrebbe diventare lungo quanto il tempo che i produttori impiegano per migliorare la performance dei LED, il termine "ragionevole" non è ad oggi definito. Una ipotesi potrebbe essere quella di far uso di una definizione statistica per il periodo di misura richiesto, in altre parole il periodo delle misurazioni dovrebbe essere sufficientemente lungo da ottenere una minima significatività statistica della vita utile estrapolata. Altro aspetto importante, non discusso nelle linee guida, è relativo alla sostituzione di una sorgente LED, che potrebbe rimanere in funzionamento anche dopo che l'intensità luminosa è scesa ben al di sotto dei valori richiesti per un'illuminazione adeguata: questo è un problema importante nelle scuole e negli uffici, dove le sorgenti sono solitamente rimpiazzate solo dopo una rottura. Una soluzione semplice potrebbe essere un interruttore integrato che disattivi la sorgente dopo la durata di vita stimata. Un documento che specifica le procedure per determinare il deprezzamento del flusso e quindi la vita utile del prodotto (LM-80) è stato preparato dalla IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) [36].

Mentre i LED entrano lentamente nel mercato dell'illuminazione generale, nuovi standard vengono elaborati per definire e caratterizzare le performance dell'illuminazione allo stato solido (SSL solid state lighting). Lo standard recentemente pubblicato dall'ANSI sulle specifiche del colore per sorgenti LED [37] è basato su una regione quadrangolare di dimensione approssimativamente uguale all'ellisse in sette passi di MAcAdam, anche se col tempo si potrebbe ridurre ad un'ellisse in quattro passi, comunemente utilizzata per le sorgenti fluorescenti [38]. È inoltre in fase di sviluppo un nuovo standard per sostituire la definizione corrente di CRI, parametro considerato non sufficiente per definire le qualità di resa del colore delle sorgenti LED. Alcune proposte

suggeriscono che sia il numero che i colori di riferimento e la loro saturazione dovrebbero essere aumentati insieme con la modifica al metodo di calcolo del CRI. Un documento che specifica le procedure per il flusso luminoso totale, la corrente elettrica, l'efficienza luminosa e la cromaticità dei LED è stato preparato dalla IESNA (LM-79).

Le caratteristiche uniche dei LED li rendono adatti sia per l'illuminazione generale che per applicazioni speciali. Il costo della sorgente per lumen di luce emessa deve ancora diminuire prima che i LED possano penetrare in modo consistente all'interno del mercato dell'illuminazione generale. In un prossimo futuro, i LED probabilmente diventeranno la principale sorgente luminosa, utilizzata praticamente in tutte le applicazioni di illuminazione, e questo richiederà metodi più affidabili, che considereranno il maggior numero possibile di parametri, in particolare il carico di corrente e la temperatura di giunzione, e dovranno essere in grado di identificare diverse modalità di degradazione, per definirne la qualità. Quest'ultimo punto è importante perché livelli di stress elevati a cui i LED sono sottoposti durante i test potrebbero essere legati a modalità di degradazione che non si verificano in condizioni normali di funzionamento. Inoltre, le informazioni sulla degradazione come funzione della temperatura di giunzione e della resistenza termica dell'involucro possono essere di grande aiuto nella progettazione delle qualità termiche dei LED. Altro tema importante è la validazione di tali metodi: poiché la vita tipica di un LED attuale spesso supera le 100000 ore, la validazione in condizioni di esercizio normali si preannuncia di difficile realizzazione.

I dispositivi che utilizzano gli involucri di ultima generazione, con resistenze termiche minori di 5K/W, hanno minori temperature di giunzione e quindi durate di vita maggiori, e maggiore stabilità nell'emissione spettrale. La dipendenza dell'intensità e del colore dalla temperatura di giunzione è aspetto critico se è necessario mantenere intensità e colori stabili. Mentre le specifiche fornite dai produttori di LED sono solitamente sufficienti per le applicazioni di illuminazione generale, per applicazioni che richiedono una caratterizzazione dettagliata della sorgente o ulteriori misure di controllo può essere necessario fare più misure ed ottenere maggiori informazioni. Un problema molto importante rimane la definizione dell'indice di resa cromatica, che non è un buon metodo per quantificare la resa del colore delle sorgenti LED: un nuovo standard è allo studio. Esistono anche diversi standard e proposte per caratterizzare le sorgenti LED per l'illuminazione generale dal punto di vista del colore iniziale, della stabilità del colore e della durata di vita; cionondimeno potrebbero essere necessarie ulteriori e più specifiche definizioni. Nel prossimo futuro, i LED probabilmente diverranno le sorgenti più efficienti e più utilizzate nell'illuminazione: capire e stabilire i fattori che influenzano la loro qualità è quindi un tema sempre più importante sia per assicurare la qualità dei prodotti LED, sia per gli ulteriori sviluppi di queste sorgenti.

Capitolo V

Punti di forza e di debolezza della tecnologia a LED

La ricerca sui LED è in forte sviluppo, in quanto queste sorgenti presentano molti vantaggi rispetto alle tradizionali sorgenti per illuminazione. Esse presumibilmente saranno le sorgenti luminose del futuro, nonostante abbiano dei limiti, attualmente ancora oggetto di ricerca, che ne impediscono al momento l'impiego su larga scala.

I punti di forza dei LED possono essere così sintetizzati:

- *risparmio energetico*: a parità di potenza assorbita, il LED produce un flusso luminoso di circa cinque volte superiore a quello delle lampade ad incandescenza e alogene.
- *scarso calore sviluppato*: l'efficienza elevata è legata al fatto che solo una piccola parte dell'energia assorbita è dissipata sotto forma di calore, a differenza delle lampade a incandescenza e delle fluorescenti; i Power LED hanno tuttavia bisogno di un cooler perché l'aumento della temperatura degrada le caratteristiche ottiche ed elettriche del sistema.
- *bassa potenza richiesta*: al contrario delle lampade tradizionali, i LED hanno bisogno di correnti talmente ridotte che è possibile tranquillamente autoalimentarli con energie rinnovabili (luce del sole o del vento). Questo concetto è già applicato alla segnaletica e ai lampioni per illuminazione urbana, perché molto conveniente dal punto di vista dei costi di gestione.
- *funzionamento in sicurezza*: rispetto alle lampade normali, che lavorano a tensione di rete, i comuni LED sono più sicuri, perché alimentati a bassa o a bassissima tensione. Questo discorso non è valido per i più recenti tipi di Power LED, che sono alimentati con la stessa tensione.
- *lunghissima durata di vita*: con le loro 50000 ore di vita per blu e bianco e 10000 ore per i monocromatici, i LED superano abbondantemente le 750 ore delle lampade a incandescenza e le 7500-10000 ore delle lampade fluorescenti, per cui risultano particolarmente adatti all'utilizzo in situazioni in cui è oneroso, difficoltoso o pericoloso sostituire la sorgente luminosa.
- *risparmio sui costi di manutenzione*: avendo elevata durata di vita, la manutenzione risulta diluita nel tempo.
- *resistenza agli urti e alle sollecitazioni*: i diodi sono meccanicamente robusti e anche se cadono a terra non si danneggiano, neppure a caldo, al contrario delle lampade ad incandescenza che, se urtate quando sono ancora calde, si fulminano con facilità; si prestano quindi anche ad applicazioni illuminotecniche in condizioni estreme, come nelle pavimentazioni e nelle piscine.

- *dimensioni e peso ridotti*: permettono di progettare apparecchi compatti e di ridotta profondità, e rappresentano quindi un'ottima soluzione per dispositivi portatili, come cellulari e torce: basti pensare che una lampada a LED completa di circuito di controllo, a parità di potenza, è poco più pesante di una lampadina a filamento.
- *insensibilità ad umidità e vibrazioni*: i diodi sono sensibili all'umidità e alla polvere, ma la capsula di rivestimento li protegge, rendendo possibile l'utilizzo anche in condizioni avverse.
- *accensione a freddo*: al contrario delle lampade fluorescenti, i LED hanno tempo di accensione pari a zero fino a temperature di -40°C, per cui il flusso emesso è immediatamente pari al flusso di regime.
- *emissione spettrale molto ristretta e colori saturi*: l'emissione spettrale monocromatica propria dei diodi consente l'eliminazione dei filtri colorati che solitamente si applicano alle altre lampade per produrre luce colorata, e che ne riducono l'efficienza. Inoltre, la miscelazione di più LED monocromatici consente una progettazione accuratissima dello spettro di emissione globale, adattandolo alle diverse esigenze specifiche, come ad esempio la coltivazione indoor.
- *flessibilità di applicazione*: i LED sono molto più piccoli delle lampade tradizionali e per questo consentono disposizioni spaziali finora impensabili, come ad esempio l'integrazione all'interno di elementi architettonici (pavimenti, pareti, soffitti, scaffalature, superfici vetrate) grazie ad incassi poco profondi. Grazie alle loro caratteristiche spettrali, invece, permettono la creazione di scenari luminosi globali, consentendo al lighting design di andare oltre il semplice posizionamento di una serie di vistosi apparecchi.
- *assenza di componente ultravioletta*: l'assenza totale di emissione UV fa sì che i LED non alterino i colori e non attirino insetti, per cui risultano la sorgente luminosa ideale per illuminare tutti quegli oggetti soggetti a degradazione, come opere d'arte e alimenti.

LED e sostenibilità ambientale

Un discorso a parte va fatto per il rapporto tra i LED e l'ambiente. Come già accennato uno dei motivi principali del forte sviluppo di questa tecnologia è che queste sorgenti consentono forti risparmi energetici e quindi una minore produzione di anidride carbonica, in accordo con il Protocollo di Kyoto. Un secondo motivo, importante anche dal punto di vista ambientale, è che essendo caratterizzate da consumi ridotti, queste sorgenti possono essere autoalimentate attraverso l'uso di energie rinnovabili (micro fotovoltaico e microeolico).

Un terzo aspetto, fondamentale ma spesso ignorato, e che fa di queste sorgenti le più adatte dal punto di vista della salvaguardia del pianeta, è che diversamente dalle tradizionali lampade a scarica, se disperse in ambiente provocano un danno minimo perché non contengono né i fosfori

contenuti nei tubi fluorescenti, né gas pericolosi come i vapori di mercurio, elemento altamente tossico e in grado di provocare gravi forme di inquinamento del suolo e delle acque.

I minimi ingombri e i pesi di modesta entità, congiuntamente alla semplicità della struttura del prodotto, sono caratteristiche che tendono a ridurre l'impatto che l'oggetto lampada esercita sull'ambiente, sia costruito che naturale.

Se si considera che nelle lampade tradizionali sono sempre presenti metalli e leghe metalliche leggere finemente lavorati (filamenti in tungsteno, cavi, micro-saldature, placche, spine, lamierini), vetro in vari tipi e versioni (vetro sodico-calcico, al borosilicato, di silice), materiali isolanti (ceramiche, polimeri), elastomeri e collanti, si capisce come, in fase di smaltimento, i vari componenti debbano essere recuperati con una serie di onerose operazioni di selezione e separazione. Nel caso dei LED tutte le operazioni si semplificano: i materiali impiegati per il chip sono semiconduttori drogati, per gli elettrodi e il dissipatore termico materiali metallici per l'incapsulamento del chip il silicone i materiali plastici, per le ottiche secondarie i polimeri. Permane una certa complessità, ma il lavoro di disaggregazione è indubbiamente agevolato dalla semplicità dei collegamenti e dalle minime dimensioni.

Punti di debolezza della tecnologia LED

I punti di debolezza dei LED possono essere così sintetizzati:

- *prezzo elevato*: a parità di flusso luminoso, il costo dei LED è molto elevato rispetto a quello delle sorgenti tradizionali a incandescenza e a scarica; i nuovi tipi di diodi commercializzati, inoltre, caratterizzati da flussi luminosi sempre crescenti, hanno prezzi che crescono in maniera non proporzionale perché aumentano molto i costi della tecnologia impiegata.
- *incompatibilità con l'alimentazione di rete*: la maggior parte dei LED funziona in corrente continua e a tensione minore rispetto all'alimentazione di rete, a corrente alternata; questa differenza comporta la necessità di trasformatori e/o resistenze, che fanno diminuire l'efficienza complessiva del sistema.
- *flusso luminoso limitato*: nei modelli più economici solo 20lm a paragone con una lampada ad incandescenza da 60W che emette un flusso luminoso di circa 550lm.
- *disomogeneità alla nascita nelle caratteristiche ottico-elettriche*: una medesima partita di LED presenta diodi con differenti intensità e colore della luce emessa (fino al 30% di variabilità), ragion per cui si rende necessaria una classificazione post-produzione, attraverso il binning.
- *generazione di calore nella giunzione P-N*: il riscaldamento della giunzione influisce sulle caratteristiche ottiche (flusso e colore) della luce emessa, per cui è necessario l'impiego di un COOLER per trasmettere il calore fuori dal diodo, evitandone oltretutto la morte prematura;

- *bassa resa cromatica*: i LED sono in grado di riprodurre i colori sovrasaturandoli: all'apparenza la resa cromatica è buona, ma con gli attuali metodi di valutazione essa viene fortemente penalizzata.
- *emissione in un angolo ristretto*: dipende dalle ottiche primarie e secondarie: sono allo studio ottiche in grado di uniformare il fascio (allargarlo) per applicazioni come retroilluminazione di tv e monitor.
- *spegnimento graduale*: a differenza della lampade tradizionali, il LED diminuisce il suo flusso a poco a poco, per cui tende a non essere sostituito anche quando l'intensità luminosa diventa molto bassa. Questo problema può essere risolto inserendo uno switch temporizzato, che spenga definitivamente il LED alla fine di un numero di ore di funzionamento prefissato.

Incompatibilità con l'alimentazione di rete

La mancanza di output a basso voltaggio e in corrente continua (120-240V AC) è un grosso problema per la diffusione dei LED, per questa ragione sono in fase di sviluppo dispositivi per consentire l'adeguamento dei diodi alla tensione di rete. Le soluzioni attualmente impiegate sono sostanzialmente di due tipi: l'impiego di LED ad alto voltaggio e l'uso di collegamenti in serie di molti LED a basso voltaggio.

Generazione di calore nella giunzione P-N

Il calore che si genera nella giunzione P-N deve essere portato all'esterno per evitare il deterioramento precoce delle caratteristiche ottico-elettriche del diodo. A causa delle caratteristiche delle capsule e dei supporti, però, spesso la temperatura di funzionamento sale molto oltre i 25°C, standard a cui sono forniti i dati della maggior parte dei produttori.

Disomogeneità alla nascita nelle caratteristiche ottico-elettriche

Nella produzione dei prodotti con semiconduttori si riscontra una variabilità della performance attorno ai valori medi forniti dalle schede tecniche dei prodotti: alcune aziende, come la Philips Lumileds, indicizzavano i componenti LED per flusso, colore e voltaggio, ma questa pratica è stata sospesa perché le classificazioni variavano da produttore a produttore, e non risultavano pertanto molto utili per i consumatori; ad oggi, si è in attesa di normative specifiche per la classificazione dei diodi.

I Power LED bianchi erano (alcuni tipi lo sono ancora) etichettati utilizzando un codice alfanumerico di 3 o 4 elementi (CAT code) che forniva i valori di bin (binning significa

classificazione, bin classe) per emettitori raggruppati in un'unica bobina: si garantisce quindi che tutti gli emettitori di quella bobina avessero la medesima classificazione. Ad esempio, alcuni tipi di LED LUXEON della Philips (quelli a luce non bianca) erano caratterizzati da un codice a tre cifre:

ABC con A = flusso (G, H, ecc); B = colore (1, 2, ecc); C = tensione di mandata (E, F, ecc)

Altri tipi (quelli a luce bianca) erano invece caratterizzati da un codice a 4 cifre:

ABCD con A = flusso (G, H, J, ecc); B e C = colore (V0, X0, ecc); C = tensione di mandata (E, F, ecc)

Le classi di flusso variano a seconda del tipo di LED e forniscono l'intervallo minimo-massimo (es. G = 155-200lm) all'interno del quale ricade quello del diodo. La classificazione relativa al colore della luce emessa varia anch'essa in base al tipo di LED: il carattere singolo indica il colore della luce in maniera approssimativa (es. W = bianco, C = ciano, G = verde...): va detto che per i LED colorati non ci sono classi di binning che suddividano ulteriormente il colore, per cui è molto probabile che all'interno della medesima bobina i diodi abbiano colori sensibilmente diversi. Il codice di due cifre invece è applicato solo ai LED a luce bianca ed è legato alle coordinate cromatiche CIE del colore della luce emessa (es. V0: 5300K con $0,329 < x < 0,344$; $0,331 < y < 0,344$). In questo secondo caso, come si nota dall'intervallo portato ad esempio, la tolleranza è di $\pm 0,005$ sulle coordinate x e y.

La prima lettera della sigla indica la classe di temperatura di colore correlata (es. per V: $5650K < TC < 5000K$), mentre la seconda lettera indica la distanza dal luogo plankiano (curva di emissione del corpo nero): O indica che la classe si trova a cavallo di tale curva, N ed M che si trova superiormente, P e Q inferiormente (Fig. V.1).

Per quanto riguarda infine la tensione di mandata, il carattere del bin indica una classe di voltaggio (minimo e massimo): es. per la lettera E il voltaggio $2,31V < V_f < 2,55V$.

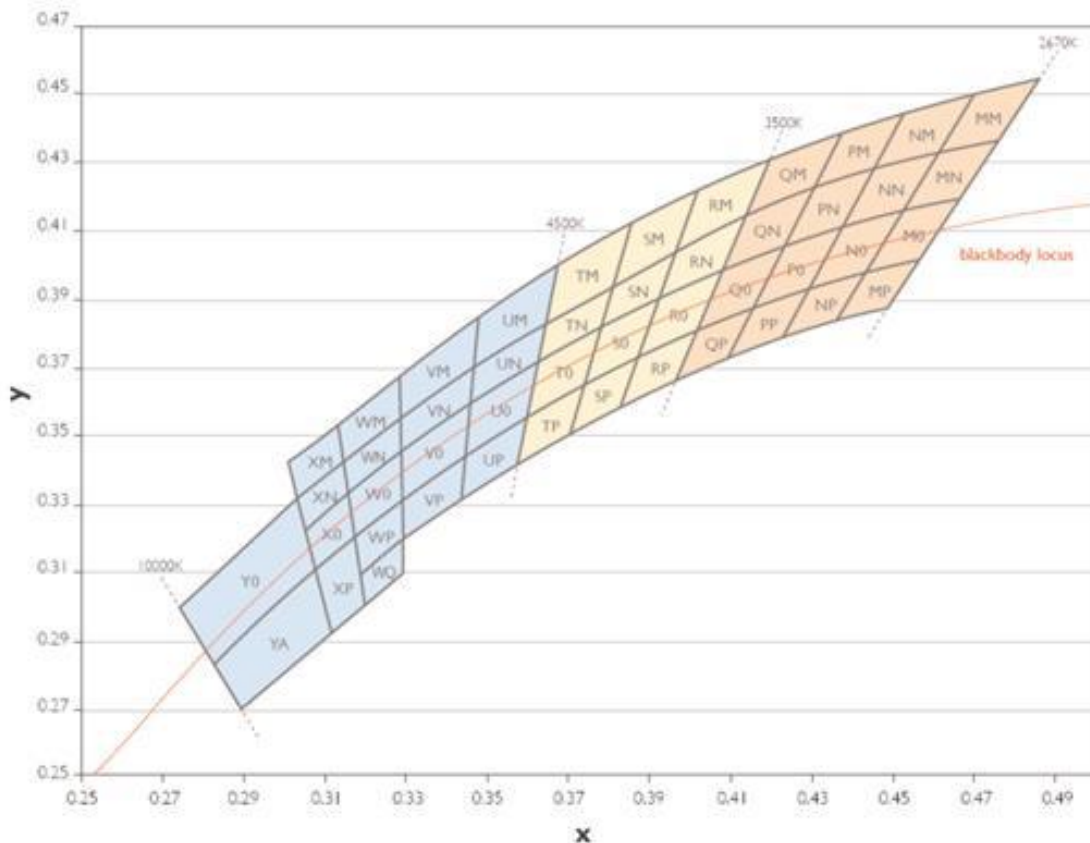


Figura V.1.-Binning Philips per LED a luce bianca. In azzurro, classificazione dei LED a luce fredda (4500-10000K), in giallo, LED a luce neutra (3500-4500K), in arancione, LED a luce calda (2670-3500K), in rosso, il luogo plankiano.

Bassa resa cromatica

Una delle caratteristiche più importanti delle sorgenti per l'illuminazione generale è la resa del colore, proprietà legata alla composizione spettrale della luce che quantifica la capacità della sorgente di rendere i colori per come sono in realtà. Per i LED è stato verificato sperimentalmente che c'è una scarsa relazione tra la resa effettiva percepita dei colori e i risultati del calcolo matematico per la valutazione di tale parametro. Il problema è che l'efficienza luminosa e la resa cromatica sono in un rapporto di mutua esclusione e si tende sempre a massimizzare la prima rispetto alla seconda.

I parametri tradizionali per la valutazione della resa cromatica sono l'Indice di Resa Cromatica o CRI (*Colour Rendering Index*) e l' R_a : il primo valuta la resa di 14 campioni di colore definiti da CIE 13.3 [41], il secondo valuta solo i primi 8 di questi campioni, trascurando i colori saturi.

CRI (Colour Rendering Index)

Il CRI è al momento l'unico metodo universalmente riconosciuto per la valutazione della resa cromatica. La procedura per il calcolo consiste nel calcolare prima le differenze di colore ΔE_i dei quattordici campioni di colore Munsell quando illuminati da un illuminante di riferimento e quando illuminati dalla lampada che si vuole testare.

E' stato studiato un programma [42] in grado di simulare la resa cromatica delle sorgenti LED a 3 e a 4 chip, con mescolamento del colore automatico, per fornire le esatte coordinate cromatiche per una data temperatura correlata di colore. Il livello di accuratezza della simulazione spettrale è elevato ed il programma fornisce anche i colori reali dei 14 campioni sotto l'illuminante di riferimento e sotto la sorgente da testare (Fig. V.2), fornendo così un'impressione visiva della resa.

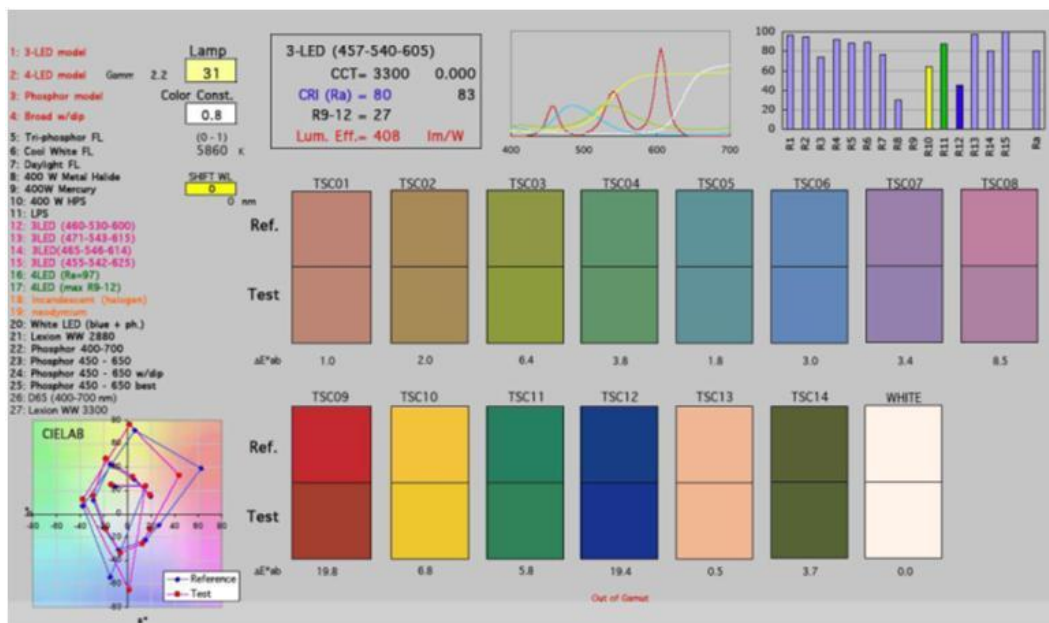
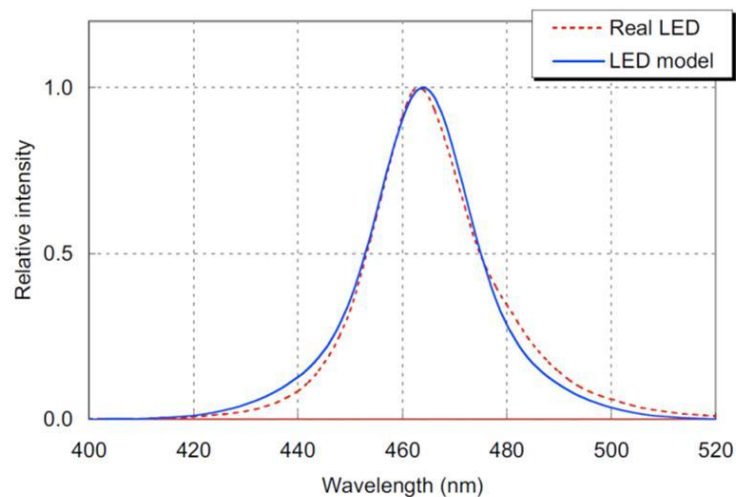


Figura V.2. A sinistra: modello di distribuzione spettrale di un LED blu a 464nm e distribuzione reale.
A destra: *screenshot* del programma.

Applicando l'analisi fornita da questo modello alle varie sorgenti (Tab. V.2), il campione R₉ (rosso) risulta particolarmente importante per il contrasto rosso-verde, fondamentale nella resa del colore [43]. Accanto al parametro R₉, risulta utile considerare il parametro R₍₉₋₁₂₎, media degli indici di resa cromatica da R₉ a R₁₂ dei quattro colori saturi (rosso, giallo, verde e blu).

Δ_{uv} è una grandezza introdotta dal modello ed è la distanza (+ sta per "superiormente", - sta per "inferiormente") del punto di cromaticità dal luogo plankiano: è importante che questa distanza sia molto piccola perché la luce alterata (verdastra o rosata) non è accettabile per l'illuminazione generale: per le lampade fluorescenti, ad esempio, questa distanza è mantenuta al di sotto di 0,005.

Tabella V.2. Comparazione realizzata dal programma tra diverse lampade:
in grassetto, i due LED (tricromatico e quadricromatico) ottimizzati per la resa cromatica e l'efficienza luminosa.

Tipo di sorgente	CCT (K)	Δ_{uv}	R _a	R ₉	R ₍₉₋₁₂₎
Lampada fluorescente a luce fredda	4290	0,001	63	-89	13
Lampada fluorescente daylighting	6480	0,005	77	-39	13
Lampada fluorescente trifosforo	3380	0,001	82	17	47
Lampada a ioduri metallici	4280	0,007	64	-120	19
Lampada ai vapori di mercurio ad alta pressione	3750	0,000	43	-101	-29
Lampada ai vapori di sodio ad alta pressione	2070	0,001	20	-214	-43
Modello di LED a 3 chip (457/540/605)	3300	0,000	80	-90	27
Modello di LED a 3 chip (474/545/616)	3300	0,000	80	89	88
Modello di LED a 3 chip (464/546/614)	4000	0,000	89	65	64
Modello di LED a 4 chip (461/527/586/637)	3300	0,000	97	96	87
Modello di LED a 4 chip (447/512/573/627)	3300	0,000	91	99	99
Modello con fosfori bianco caldo (400-700)	3013	0,000	99	97	99
Modello con fosfori bianco caldo (450-650)	3007	0,011	86	26	67
PHOS-2 con picco stretto a 560nm	3000	0,000	81	47	61
PHOS-2 con picco largo nel verde	3000	0,000	88	46	75
LED con fosfori (fosfori YAG)	6810	0,004	81	24	61
LED con fosfori (bianco caldo)	2880	0,008	92	72	80
Lampada incandescente con vetro al neodimio	2757	-0,005	77	15	60
Illuminante A (solo tra 400 e 700nm)	2856	0,000	99	98	100
D65 (solo tra 400 e 700nm)	6500	0,003	100	98	100

Preferenze degli utenti relativamente al colore della luce

Diversi studi hanno dimostrato che le persone preferiscono percepire colori saturi (rosso, verde, giallo, blu) e che la chiarezza della percezione è legata ad essi [44-47] (Fig. V.3). Tra le varie sorgenti, il punto di cromaticità varia spostandosi in ogni direzione, ma nel calcolo del CRI non si tiene conto della variazione della saturazione: il valore dell'indice di resa cromatica, quindi, è legato alla fedeltà nella riproduzione del colore, più che alla sensazione della sua resa. Da questo particolare punto di vista, i LED a 3-chip sono una risposta ideale perché, se accuratamente progettati, possono rendere colori saturi: dal programma utilizzato è emerso che un LED con chip a 455nm, 547nm e 623nm, con un'ampiezza spettrale di 20nm, 30nm e 20nm rispettivamente per il blu, il verde e il rosso ha una CCT è 3300K, $R_a = 73$, $R_{(9-12)} = 50$, LER = 363lm/W.

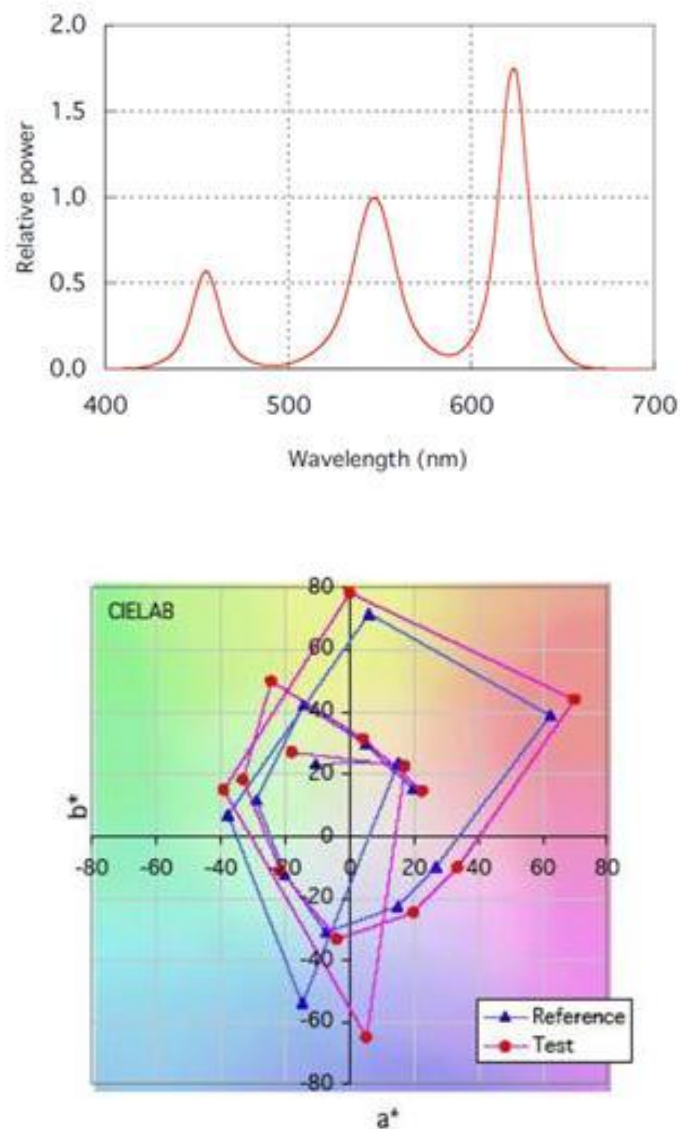


Figura V.3. Distribuzione di potenza spettrale del modello di LED a 3 chip con picchi a 455, 547, 623nm (in alto), e spostamento dei colori dei 14 campioni per la sorgente LED di cui è mostrato lo spettro (in basso).

Riassumendo:

- 1) poiché R_a è determinato solo sulla base di colori mediamente saturi, la resa cromatica dei colori saturi (da R_9 a R_{12}), in particolare R_9 , può essere molto scarsa anche se R_a è accettabile. I colori saturi devono essere in qualche modo considerati.
- 2) I risultati per i LED a 3-chip tendono ad essere sensibili a piccole variazioni dei campioni di colore, specialmente per i colori saturi.
- 3) Il CRI non prende adeguatamente in considerazione lo spostamento delle coordinate cromatiche lungo il luogo Plankiano: R_a cambia a malapena con un cambiamento della cromaticità della sorgente da $\Delta uv = 0$ a $\Delta uv = +0,015$.
- 4) Il CRI non considera la direzione dello spostamento del colore. La diminuzione della saturazione ha un effetto negativo e l'aumento ha effetti abbastanza positivi (aumenta la chiarezza visiva). E' quindi necessario considerare in qualche modo le direzioni dello spostamento delle coordinate cromatiche.

Il corpo nero a 2000K (molto rosso) o lo spettro della luce naturale a 20000K (tramonto) fornisce $R_a = 100$ anche se i colori non sono resi bene. Questo indica un problema nella sorgente di riferimento (La CCT della sorgente di riferimento si sposta con quella della sorgente da testare). Si assume perfetta la costanza del colore, CCT molto alte o molto basse dovrebbero essere penalizzate.

Capitolo VI

LED e ricerca

La ricerca sui LED è ad oggi in pieno sviluppo: risolvere tutti i problemi che costituiscono i punti di debolezza, mantenendo o potenziando i punti di forza, è il comune denominatore della breve antologia di ricerche che segue.

Attualmente la ricerca sui diodi luminosi sta muovendo in diverse direzioni:

- la verifica e misurazione delle caratteristiche dei prodotti LED già in commercio (in particolare degradazione spettrale e durata di vita);
- i possibili impieghi innovativi dei LED;
- la messa a punto di sistemi di controllo della corrente per stabilizzare le caratteristiche ottiche dei LED nel tempo (per minimizzare la degradazione delle caratteristiche ottiche);
- l'ottimizzazione dei chip per quanto riguarda le principali caratteristiche ottiche (degradazione spettrale e del flusso luminoso).

Misurazione delle caratteristiche dei LED

Capsule sperimentali per la misura della degradazione luminosa del solo chip

Ogni componente che costituisce l'involucro del LED si degrada in maniera graduale: questo può costituire un problema quando si vuole stabilire con precisione la diminuzione del flusso di un LED nel corso delle ore di funzionamento. Il LED blu è particolarmente critico da questo punto di vista, perché la pasta che lo tiene incollato all'involucro si ingiallisce nel tempo, similmente alle resine utilizzate per la capsula. Il problema si verifica perché tali materiali, investiti dalla radiazione di fotoni di breve lunghezze d'onda, le assorbono e in questo modo hanno reazioni chimiche che provocano una diminuzione della trasparenza. Per questo motivo i componenti degli involucri LED convenzionali possono oscurare il comportamento di degradazione del chip LED: in una ricerca [48] è stato valutato un nuovo tipo di involucro metallico sperimentale in cui inserire un LED blu per misurarne con accuratezza la durata di vita. Tale involucro presenta una piastra di raffreddamento in rame ed un riflettore in bagno d'oro: la prima serve per garantire una dissipazione ottimale del calore, il secondo per evitare la fotodegradazione del rame sottostante. Il risultato ottenuto dopo 5000h di funzionamento, confrontato con quello del LED nel suo incapsulamento commerciale, ha mostrato che solo un tipo di chip su 3 presenta un degradamento sovrapponibile, per cui la minor durata di vita di questo tipo di LED (GaN) è legato

all'involucro più che al chip in sé. Questa conclusione ha dato avvio ad un nuovo filone di ricerca, che si sta occupando di individuare materiali incapsulanti che non siano soggetti a ingiallimento o che quantomeno abbiano un tasso di degradazione minore di quello del chip (Fig. VI.1).

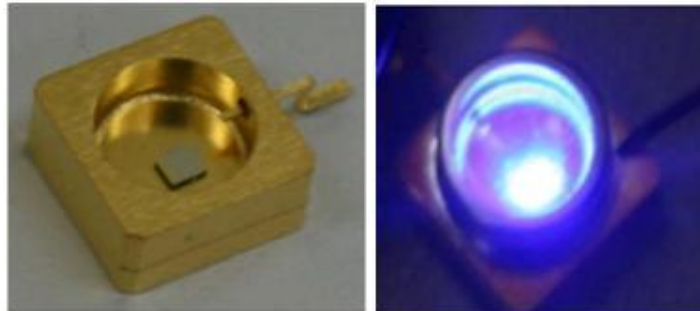


Figura VI.1. Immagini del nuovo tipo di involucro impiegato per misurare la degradazione spettrale dei LED blu.

Possibili impieghi innovativi dei LED

I LED sono una sorgente a basso consumo energetico: sono quindi allo studio sistemi per utilizzarli anche in campi che non sono a loro congeniali, come l'illuminazione da grandi distanze o l'illuminazione diffusa, o ancora la retroilluminazione degli schermi di tv e monitor. Per applicare i LED in quei casi in cui sono richiesti illuminamenti uniformi, sono allo studio ottiche diffondenti in grado di ridistribuire il fascio luminoso: tali ottiche possono riguardare il singolo chip (ottiche primarie) oppure l'intero modulo (ottiche secondarie).

Studi sulle ottiche primarie

Per quanto riguarda le ottiche primarie, è stato condotto uno studio [49] su una nuova conformazione della capsula che ne allarghi il fascio e lo distribuisca in modo il più possibile uniforme: è possibile in questo modo illuminare grandi superfici in maniera uniforme. La nuova lente studiata è in materiale plastico (PMMA, PoliMetilMetacrilato), concava al centro e convessa ai lati (Fig. VI.2). La forma, scaturita dall'analisi computerizzata, si dimostra essere ottimale per la distribuzione fotometrica sui due assi principali del LED. Il campo di applicazione di LED con questo tipo di ottica è molto ampio: dall'illuminazione architettonica di grandi ambienti dall'alto, all'uso come wall washer, fino alle applicazioni di nuova concezione, come la retroilluminazione per LCD, monitor e TV.

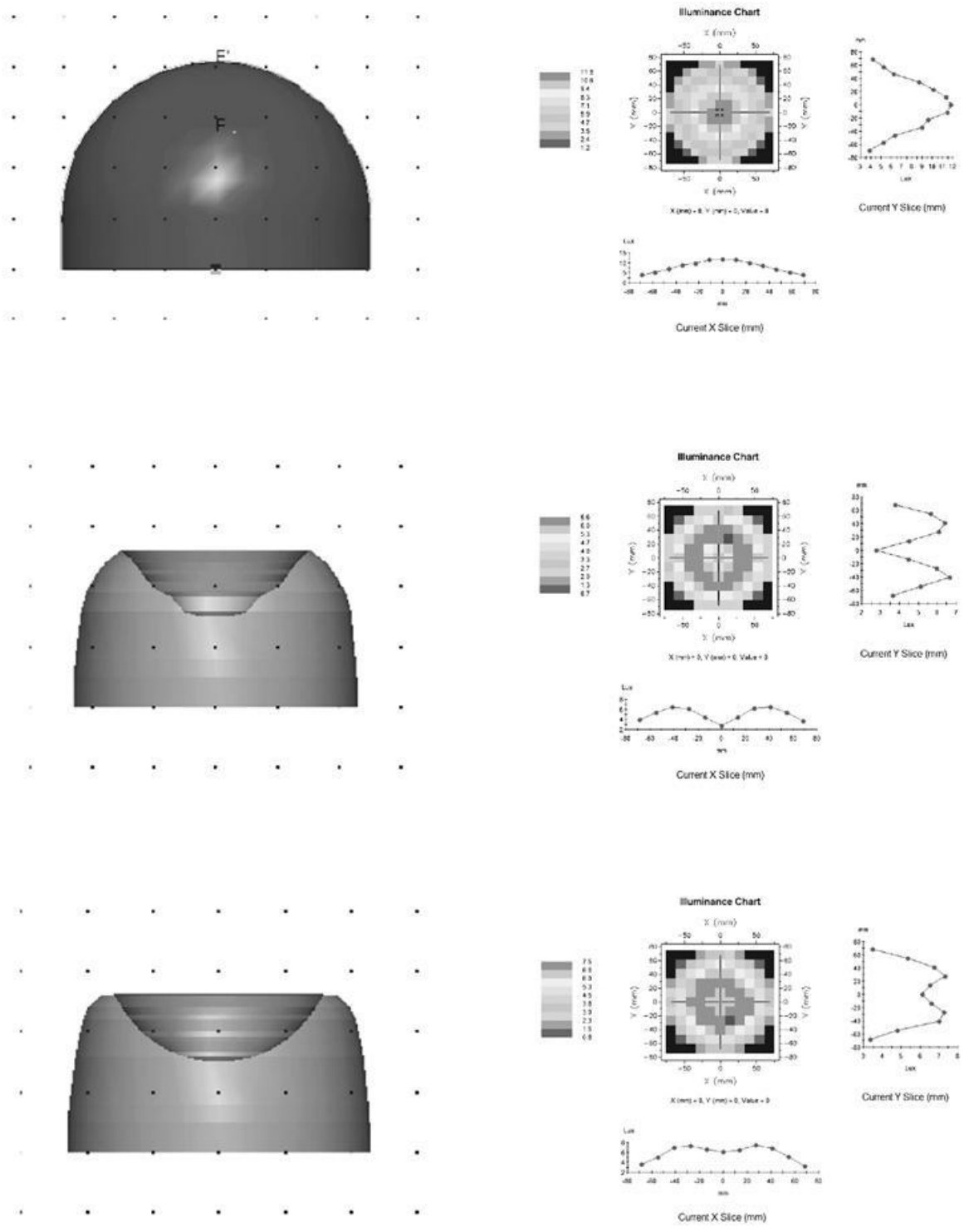


Figura VI.2. Conformazione di diversi tipi di ottiche primarie per LED: in basso, quella ottimizzata. A destra, nella figura, è riportato il confronto delle distribuzioni dell'illuminamento prodotto.

Studi sulle ottiche secondarie

Per quanto riguarda gli studi sulle ottiche secondarie, uno di questi [50] si è occupato del medesimo problema, affrontandolo però dal punto di vista dell'intero modulo LED, testando un sistema complesso di microlenti continue a doppia curvatura, che distribuiscono uniformemente i fasci ristretti dei chip sottostanti, dotati di ottiche di tipo tradizionale. E' stato verificato che tale sistema migliora le proprietà ottiche del modulo a cui viene applicato, aumentando l'uniformità della luminanza della sorgente e dell'oggetto illuminato (Fig. VI.3).

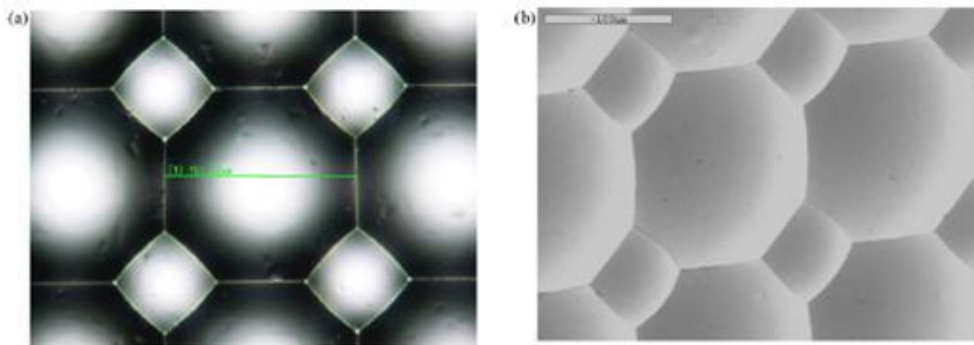


Figura VI.3. Immagine al microscopio dell'ottica secondaria con sorgenti accese (a), e immagine al microscopio della struttura dell'ottica secondaria diffondente (b).

LED per l'illuminazione generale

In [51] è stato valutato il possibile impiego di moduli LED per illuminare oggetti distanti: in particolare è stato studiato l'uso di sorgenti a soffitto per illuminare il pavimento, caso molto comune per le applicazioni relative all'illuminazione generale. E' stato verificato sperimentalmente che l'uniformità dell'illuminamento fornito da lunghe strisce di diodi varia con il numero di LED, l'interasse tra di essi e la distanza dalla superficie da illuminare. Inoltre, poiché i LED sono considerati sorgenti puntiformi, sarebbe dovuta essere valida, per distanze dell'ordine degli interassi tra solai, la legge dell'inverso del quadrato, che stabilisce che l'illuminamento E è pari al rapporto tra l'intensità luminosa I e il quadrato della distanza sorgente-oggetto illuminato h :

$$E = \frac{I}{h^2}$$

In realtà le misurazioni sperimentali hanno smentito la validità di questa legge, verificando invece l'esistenza di un coefficiente K di deviazione dalla legge dell'inverso del quadrato, il cui valore è influenzato dalla configurazione dei moduli, in particolare dal numero di LED, dall'intervallo tra di essi e dall'inclinazione del loro asse rispetto alla verticale. Questa verifica sperimentale è il primo

passo nella valutazione del numero e della distribuzione dei diodi negli apparecchi che mirano a sostituire le lampade fluorescenti imitandone con precisione le caratteristiche ottiche.

Le misurazioni sperimentali hanno stabilito anche che l'illuminamento aumenta in modo significativo con l'altezza del modulo LED, le cui dimensioni possono essere diminuite e l'uniformità di illuminamento può essere incrementata grazie a rotazioni verso l'esterno dei LED rispetto al centro dell'area da illuminare e ad un minimo incremento della corrente per aumentare l'intensità dei diodi. E' stato pertanto verificato sperimentalmente che i moduli LED sono adatti per essere utilizzati anche per illuminare superfici orizzontali da altezze elevate: la ricerca ora si occuperà di definire la conformazione ottimale dei moduli di diodi per questo tipo di applicazione.

Sistemi di controllo della corrente

Le prestazioni dei LED RGB nel campo dell'illuminazione, come l'intensità dell'illuminazione e il colore della luce, sono determinate dall'input di corrente dei LED all'interno. Il colore della luce è determinato invece dalla proporzione tra le emissioni dei tre LED: è quindi necessario un sistema di controllo dell'illuminazione LED.

L'illuminazione dei LED varia con la variazione della temperatura di giunzione che è legata alla produzione di calore da parte dei diodi e alla variazione della temperatura ambientale. L'effetto termico influenzerà sia l'intensità dell'illuminazione e il colore della luce del LED.

Controllare il flusso elettronico all'interno di un diodo è particolarmente importante, perché ad esso sono associate non solo le caratteristiche ottiche dell'emissione, ma anche la durata di vita del chip, che è legata alla temperatura di giunzione. Diversi studi si sono occupati di modelli per descrivere o incidere sul comportamento termico del diodo, al fine di controllare spettro e intensità luminosa emessi dal LED. Uno studio particolarmente importante [52] si è occupato della progettazione di un sistema di controllo della corrente in grado di bilanciare gli effetti della variazione della temperatura ambientale, assicurando un output ottico stabile. Il modello per il sistema dinamico di alimentazione ha due variabili di input (voltaggio applicato e temperatura ambiente) e due di output (corrente di mandata e temperatura del dissipatore di calore) e può controllare in modo stabile ed accurato la corrente nei LED per mantenerla costante al variare della temperatura da 20°C fino a 40°C.

Un sistema di illuminazione LED high-power consiste di un modulo per l'illuminazione LED assemblato a partire da molteplici lampade LED singole associate con un appropriato design ottico e un dispositivo di dissipazione del calore: per un apparecchio high-power, il corpo che conduce il calore e il serbatoio di calore sono solitamente pesanti (2-10Kg) in confronto alle sorgenti luminose, e riuscire a controllare la corrente in ingresso significa controllare la dissipazione di calore, e quindi poter ridurre l'ingombro del sistema di raffreddamento, ottenendo apparecchi più snelli (Fig. VI.4).

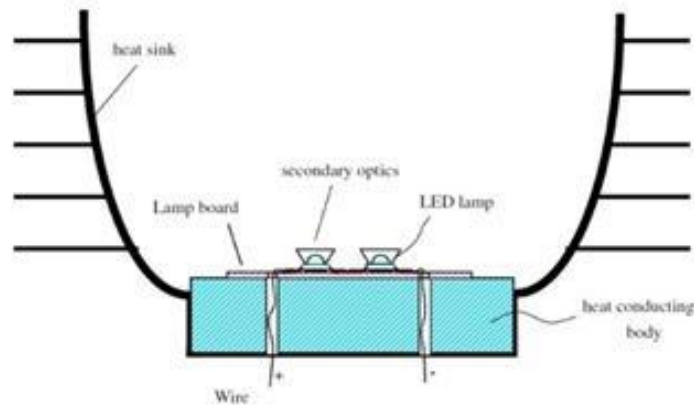


Figura VI.4. Schematizzazione grafica di un apparecchio power LED, in cui si evidenzia il rapporto tra le dimensioni delle lampade e quelle della piastra di raffreddamento e del dissipatore di calore.

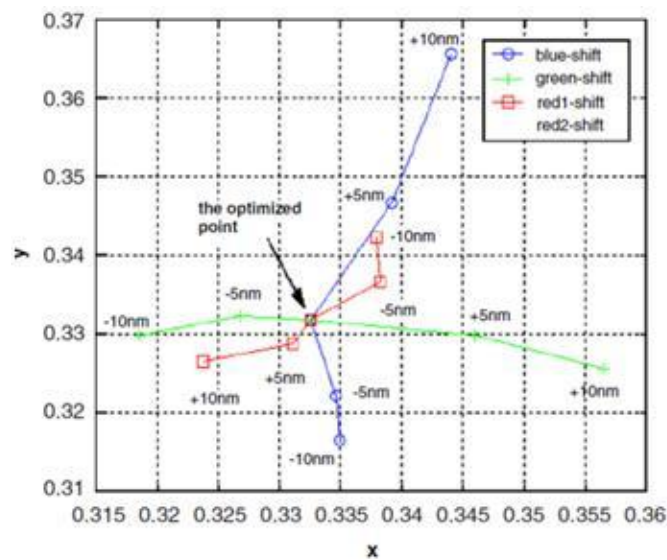
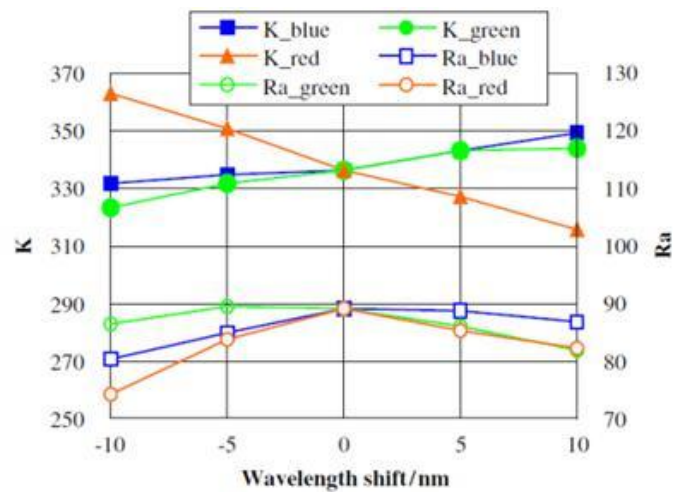
Riguardo il problema della dissipazione del calore, i LED multichip sono particolarmente critici, perché contengono al loro interno tre o più giunzioni che producono calore. Uno studio [53] si è occupato della creazione di un modello dinamico termo-elettro-ottico per apparecchi LED RGB, costituito da tre sottomodelli, cioè quello termo-elettrico, quello elettro-ottico e quello termo-ottico. Il modello termo-elettrico è collegato al trasferimento di calore dalle giunzioni attraverso il cooler verso l'ambiente: ha tre variabili di input (corrente in ingresso in ciascuno dei tre LED) e tre variabili di output (temperatura di giunzione di ciascuno dei tre LED). Il modello elettro-ottico collega la corrente in entrata all'intensità luminosa in uscita: le variabili di input sono tre (corrente in entrata in ciascuno dei tre LED) mentre la variabile in uscita è il flusso luminoso. Il modello termo-ottico collega la temperatura di giunzione all'intensità luminosa: le variabili di input sono tre (temperatura di giunzione di ciascuno dei tre LED) mentre quella di uscita è l'intensità luminosa. Il modello completo può descrivere il comportamento dinamico ottico ed essere usato nel design dei sistemi di controllo per gli apparecchi LED RGB, in quanto è in grado di prevederne la risposta luminosa: esso mostra che il modello termo-elettro-ottico mostra che l'intensità luminosa è proporzionale alla corrente in ingresso e inversamente proporzionale alla temperatura di giunzione. Il limite del modello è che, a differenza di quanto visto nello studio precedente, non considera le variazioni della temperatura ambientale: associando i due modelli, però, sarà possibile progettare con precisione le caratteristiche termo-elettriche degli apparecchi LED per consentire la stabilità delle proprietà ottiche.

Ottimizzazione del chip

Ambito particolarmente delicato è la degradazione spettrale dei LED multichip a luce bianca: ogni singolo diodo è soggetto ad una variazione nel tempo delle sue caratteristiche ottiche, ma questa varia in base al colore della luce e in base alla tecnologia con cui è costruito per cui, già dopo un numero limitato di ore di funzionamento, si verifica un viraggio cromatico tanto indesiderato quanto evidente, che inficia le caratteristiche di resa cromatica della sorgente e la sua efficienza

luminosa. Uno studio si è occupato di ottimizzare in partenza lo spettro dei singoli chip all'interno di LED tri e quadricromatici [54], prendendone in considerazione anche la velocità di degradazione. L'analisi computerizzata ha evidenziato due composizioni spettrali ottimali, che poi andranno verificate sperimentalmente e sviluppate (Fig. VI.5):

- per un LED bianco tricromatico, la combinazione delle tre lunghezze d'onda 460-540-615nm produce teoricamente un'efficienza luminosa pari a 336lm/W ed un indice di resa cromatica pari a 89;
- per un LED quadri cromatico, la combinazione dei diodi a460-525-590-640nm produce un'efficienza luminosa di 306lm/W ed un indice di resa cromatica IRC pari a 95.



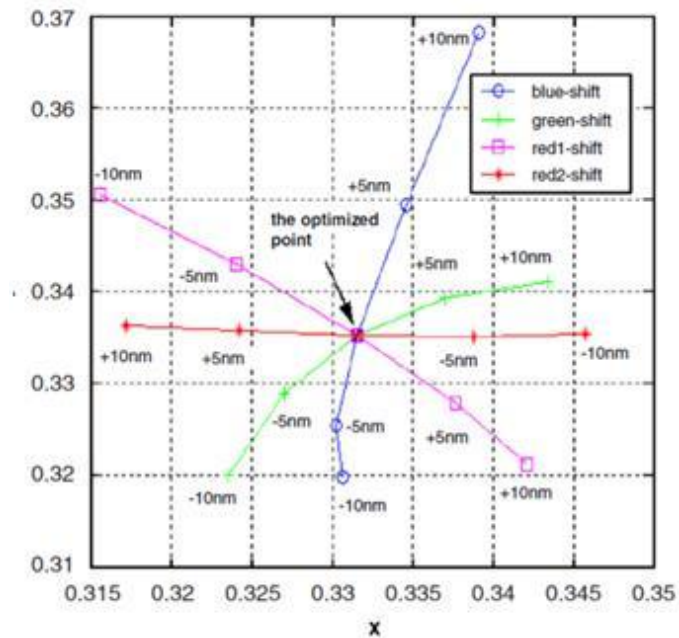
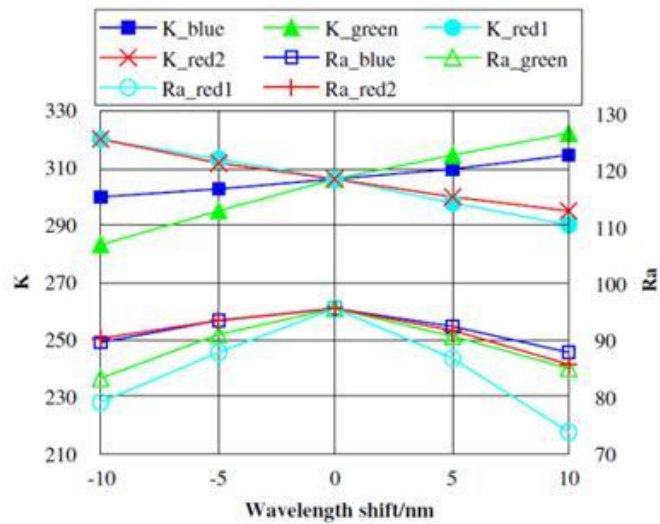


Figura VI.5. Schematizzazione grafica del LED tricromatico ottimizzato (grafici di pag. 63) e del LED quadrimatico (grafici di pag. 64). Nella prima delle due coppie di figure, è rappresentato il rapporto tra l'efficienza luminosa K (lm/W), l'indice di resa cromatica Ra e lo spostamento di lunghezza d'onda nel tempo (in nm). Nella seconda, la degradazione della cromaticità, espressa in coordinate CIE xy dei singoli diodi e il punto ottimizzato del bianco ($x=y=0.33$).

Capitolo VII

LED e normativa

In un'era di rapidi miglioramenti prestazionali, il 2008 è da ricordare come l'anno degli standard sui LED, standard che sono aspetto essenziale per le prospettive di diffusione nel mercato di questa nuova sorgente. Il 2008 ha visto la pubblicazione di diversi standard sulle performance e di diverse linee guida che richiedono l'uso di questi standard: standard basati su standard. Un buon inizio, ma solo un inizio. Ad ogni modo, sono in fase di elaborazione molti altri standard, e passi avanti sono stati fatti nella loro stesura.

Gli standard sono molto importanti per diverse ragioni. Senza standard è difficile o impossibile fare paragoni: in molti casi, le specifiche dei prodotti sono tracciabili e inoltre alcuni produttori omettono o rendono poco comprensibili dati importanti legati alla qualità dei loro prodotti. Senza standard è difficile che i consumatori si avventurino a comprare prodotti. Alcuni utilizzano la performance di un apparecchio indipendente (ad esempio il singolo LED) per approssimare la performance dell'apparecchio: ovviamente la performance reale non è conforme a quella dichiarata. Con errori grossolani di questo tipo nelle etichette dei LED, viene meno la fiducia dei consumatori e quindi il mercato non riesce a decollare [55-57].

In Tab. VII.1 sono riportati gli standard ad oggi pubblicati o in fase di elaborazione.

Standard emersi nel 2008

Attraverso i comitati sull'illuminazione allo stato solido (SSL Solid State Lighting) all'interno della National Electrical Manufacturers Association (NEMA), l'American National Standards Institute (ANSI) e l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), gli Stati Uniti hanno prodotto tre pietre miliari per gli standard sui LED:

- ANSI C77.78 "Specifiche per la cromaticità dei prodotti per l'illuminazione allo stato solido"
- IESNA LM-79 "Misure elettriche e fotometriche dei prodotti per l'illuminazione allo stato solido"
- IESNA LM-80 "Misurare il decadimento del flusso delle sorgenti luminose a LED"

Inoltre, il Comitato Tecnico per le procedure di test ha lavorato alle definizioni per i sistemi LED per fornire un dizionario sistematico di questa tecnologia (IESNA RP-16 Addendum A "Nomenclatura e definizioni per l'ingegneria dell'illuminazione").

Tabella VII.1. Elenco degli standard relativi ai LED: in nero quelli pubblicati, in rosso quelli ancora in elaborazione

Elenco degli standard pubblicati (nero) o in elaborazione (rosso)	
FOTOMETRIA	
CIE 127-2007 (TC2-45)	Misura dei LED
IESNA LM-79	Misure elettriche e fotometriche dei prodotti SSL
IESNA LM-80	Metodo per misurare il decadimento del flusso delle sorgenti luminose a LED
CIE TC2-46 CIE/ISO	Misure dell'intensità dei LED
CIE TC2-50	50 Proprietà ottiche dei gruppi di LED
CIE TC2-58	Luminanza e radianza dei LED
IESNA TM-21	Prevedere il decadimento del flusso luminoso delle sorgenti LED
COLORE	
ANSI C78.377-2008	Cromaticità dei prodotti SSL
CIE 177-2007 (TC1-62)	Resa del colore delle sorgenti a LED a luce bianca
CIE TC1-69	Scala della qualità del colore (nuovo IRC)
SICUREZZA FOTOBIOLOGICA	
IES RP-27	Sicurezza fotobiologica
IEC 60825-1-2001	Sicurezza dei prodotti laser (sarà superata)
CIE S009	Sicurezza fotobiologica
IEEE P1789	Pratiche raccomandate per modulare la corrente nei LED ad alta luminosità per minimizzare i rischi per la salute per gli osservatori
SICUREZZA	
ANSI C82.SS11	Alimentazione elettrica
ANSI C82.77-2002	Limiti per l'emissione armonica
ANSI C78.09 82	Specifiche per la sicurezza degli apparecchi
FCC 47 CFR Part 15	Apparecchi a frequenze radio
IEC SC 34A 62031:2008	Moduli LED - Sicurezza
IEC SC 34C 61347-2-13:2006	Attrezzatura per il controllo delle lampade
Part 2-13	Attrezzatura CC o AC per il controllo dei moduli LED
IEC SC 34A IEC 62560	Lampade LED con alimentatore incorporato
IEC SC 34A [da definire]	Lampade LED >50 V – Specifiche sulla sicurezza
UL 8750	Sorgenti luminose LED da utilizzare in prodotti per l'illuminazione
PERFORMANCE	
IEC SC 34C 62384	Attrezzatura di controllo elettronico in corrente continua o alternate per moduli LED
IEC SC 34A	Standard di performance per lampade LED
NOMENCLATURA	
IES RP-16	Nomenclatura e definizioni Allegato A= definizioni relative all'illuminazione allo stato solido (SSL)
IEC SC 34A - TS 62504	Termini e definizioni per LED e moduli LED
TELECOMUNICAZIONI E ALTRO	
IEC TC 34 EN 62547	LED e telecomunicazioni (EMC Electronic Message Centers) / immunità
IEC SC77A - EN 61000-3-2	LED e EMC / armoniche
ANSI SSL2 LSD-45	Prese di corrente ed interconnessioni
ANSI C82.04	Circuitazione di sicurezza del driver

ANSI C78-377-2008: Cromaticità

Questo standard definisce otto regioni confinate che identificano particolari valori della temperatura di colore per sorgenti LED bianche. Dopo un lungo dibattito, si è deciso di scegliere queste regioni sulla base di regioni simili utilizzate per le lampade fluorescenti compatte (CFLs) che sono definite dalle ellissi in 7 step di MacAdam. Un'ulteriore regione, a 5700K, è stata aggiunta ai LED per fornire un range di temperature di colore continuo. L'uso di queste definizioni per le

regioni di temperatura di colore dei LED è un buon inizio, e i produttori di LED stanno già fornendo binning per LED in accordo con questa normativa.

IESNA LM-79: Flusso luminoso

Lo standard LM-79 fornisce metodi per determinare l'output in lumen degli apparecchi LED e delle lampade LED integrate. I prodotti devono funzionare esclusivamente a tensione di rete o tramite un convertitore da corrente alternata a continua. La LM-79 non comprende i prodotti LED che richiedono circuiti di funzionamento o dissipatori di calore esterni, come ad esempio i chip, gli involucri e i moduli, né gli apparecchi disegnati per i LED che però vengono venduti privi delle sorgenti.

Tradizionalmente, le misure fotometriche si fanno separatamente per le lampade e gli apparecchi utilizzando differenti metodi di misura e verifica. Per molti prodotti LED, le lampade non possono essere separate dagli apparecchi e nessuno degli standard esistenti per le lampade o gli apparecchi sono direttamente applicabili ai LED; la conseguenza è la necessità di un metodo di misura nuovo (la fotometria assoluta).

Il metodo più semplice per stabilire l'output di una sorgente luminosa è verificare l'apparecchio e le lampade separatamente. Dopodiché la distribuzione dell'intensità luminosa è normalizzata attraverso il flusso totale delle lampade utilizzate nell'apparecchio testato. Con il metodo assoluto, la distribuzione dell'intensità luminosa di un apparecchio è misurata senza una misura separata delle lampade. La sezione 9.3 della LM-79 specifica le misure e l'allegato approfondisce il ragionamento al di là dei requisiti della fotometria assoluta. La LM-79 raccomanda di utilizzare una sfera integratrice con uno spettroradiometro, ma fornisce anche altre alternative inclusa una sfera con un fotometro e l'uso di un goniometro.

Lo spettroradiometro fornisce tutta la distribuzione spettrale da cui si calcolano diverse caratteristiche, tra cui la cromaticità, la temperatura di colore correlata e l'indice di resa cromatica. Per il goniometro, il risultato può essere spazialmente non uniforme, ma deve essere pesato spazialmente con l'intensità a seconda dell'angolo di misura.

Un'altra differenza delle misure fotometriche per i LED rispetto alle sorgenti tradizionali è la stabilizzazione termica, che è determinata da sequenze di misure ripetute finché la differenza tra due misure successive è minore di una certa entità. Nella LM-79, l'unità è stabilizzata quando tre letture di output della luce e potenza elettrica fatte per 30 minuti, con 15 minuti di pausa in mezzo, si differenziano per meno dello 0,5%.

La combinazione di stabilizzazione termica, fotometria assoluta e altri elementi nella LM-79 contribuiscono alla codificazione di uno standard affidabile per testare le sorgenti LED.

LM-80: Decadimento del flusso

Il decadimento del flusso è la diminuzione graduale dell'output luminoso di un apparecchio LED nel tempo. Molte specifiche dei produttori di LED utilizzano il decadimento del flusso per indicare la durata di vita del prodotto, ma questo è solo un aspetto della durata di vita e non una sua misura globale. Questo dato non fornisce, ad esempio, una misura reale dell'affidabilità del prodotto. Se appropriatamente controllati e gestiti termicamente, molti LED ad alta luminosità possono durare per decine di migliaia di ore, ma c'è bisogno di un metodo affidabile per fornire tale informazione: questo è lo scopo della LM-80.

Le cause della diminuzione del flusso sono solo parzialmente comprese, ma la causa primaria è in diretta relazione col calore generato alla giunzione all'interno del LED, la quale comprende i materiali di copertura, variabili a seconda dell'involucro e del progetto del sistema. Una gran quantità di produttori di LED, ad esempio, hanno cambiato il materiale di incapsulamento dalla resina epossidica al silicone, perché la prima si ingialliva a causa dell'irraggiamento luminoso.

La misura del decadimento del flusso è un concetto relativamente semplice: si lasciano accesi i LED per un lungo periodo di tempo e si misura il cambiamento nel loro output luminoso. Poiché non è fattibile misurare questi dispositivi per un decennio, perché questi saranno sorpassati da nuove generazioni di LED, è necessaria qualche forma di previsione o estrapolazione.

La LM-80 è stata creata per un'importante ragione: assicurare l'affidabilità del modo di testare le lampade LED. Tale standard non prevede il decadimento del flusso al di là del periodo di test. Nel processo di stesura della LM-80 era necessaria un'ulteriore discussione sul modello di estrapolazione, ma era importante pubblicare il metodo per testare le sorgenti per cominciare a testare in maniera standardizzata una gran quantità di dispositivi. Più dati si avranno a disposizione, più probabile sarà lo sviluppo di un buon modello predittivo. Un altro comitato, il TM-21, sta attualmente sviluppando tale modello.

La LM-80 misura il decadimento del flusso delle sorgenti LED inclusi gli involucri, gli insiemi di LED e i moduli: non include gli apparecchi. Tale standard specifica un certo numero di misure elettriche e termiche come voltaggio e corrente (livelli di AC o CC).

Un aspetto chiave della LM-80 è il valore dei livelli di misura della temperatura. Includono 55°C, 85°C e una terza temperatura selezionata dal produttore. Durante il test il movimento d'aria nella regione deve essere ridotto al minimo e ogni specifica per l'orientamento e la spaziatura può essere fornito dal produttore.

La LM-80 attualmente richiede 6000 ore di test. È stato obiettato che tale tempo di prova sia troppo lungo, ma a meno che non si trovi un modo alternativo per prevedere il decadimento del flusso con un tempo di test relativamente breve, non esiste al momento altro mezzo per assicurare una buona affidabilità del decadimento del flusso. E' molto probabile, senza molti dati a supporto, che ogni metodo predittivo sarà limitato a qualche moltiplicatore del periodo di prova. L'intervallo di test per le misure fotometriche è di minimo 1000 ore, tale da fornire sufficienti dati per calcolare la tendenza globale.

Standard ancora in fase di definizione

Al momento, il comitato tecnico della IESNA sta lavorando ad un nuovo metodo, TM-21 “Previsione del mantenimento del flusso”, che si propone di dare una risposta pratica alla questione della previsione del mantenimento del flusso delle sorgenti LED. Il comitato sta valutando un certo numero di modelli per stabilire il decadimento del flusso, ma si tratta di ben più di una semplice formula. Il decadimento del flusso al 70% di quello di partenza (L70) è utilizzato come valore di baseline per i livelli di output luminoso. Non c’è nessuna regola rigida e rapida riguardo L70, ma in genere una variazione di illuminamento del 30% è considerata differenza sufficientemente percepibile. L’illuminazione generale ha spesso il solo compito di mantenere livelli di normativa: una diminuzione del 30% è infatti una base ragionevole per i livelli di illuminamento senza compromettere la sicurezza. L50 invece può essere usato per l’illuminazione decorativa. L’illuminazione d’emergenza, invece, ricade al di fuori degli scopi dell’LM-80.

Il tempo di invecchiamento è un periodo di tempo relativamente breve, all’inizio della vita di un LED, in cui, in alcuni casi, l’output luminoso può aumentare leggermente prima di stabilizzarsi e seguire le curve di decadimento del flusso. Rappresenta solo le prime centinaia di ore di vita e si pensa che sia legato ad un processo di ricottura interna. Non si osserva in tutte le situazioni, ma se non è preso in considerazione, può inficiare i risultati delle estrapolazioni sperimentali. Un piccolo aumento, ad esempio, può causare una previsione di una durata di vita più lunga. Il modello che si sta sviluppando dovrebbe tenere in considerazione questa variazione: la raccomandazione prevede di considerare un tempo di 1000 ore. Inoltre, è probabile che verrà posto un limite al fattore di estrapolazione: prevedere una vita di 100000 ore con solo 6000 ore di test è statisticamente inattendibile, per cui verrà introdotto un fattore correttivo.

Alcuni programmi favoriscono la diffusione dei LED negli USA:

- “Title 24”: un set di codici costruttivi redatti dalla California Energy Commission che dettano gli standard dell’efficienza energetica per edifici residenziali e non (tra gli altri). Questo codice detta la densità di corrente per l’illuminazione e i produttori si sono adeguati ad esso. Una nuova versione di questo regolamento, chiamato “2008 California Building Energy Efficiency Standards” incrementa gli standard per l’efficienza energetica dei LED (www.energy.ca.gov/title24/2008standards).
- “Energy Star”: un programma del governo americano curato dal Dipartimento dell’Energia (DOE) e dall’Agenzia per la protezione ambientale (EPA), che riconosce i prodotti energeticamente efficienti. Il DOE’s Energy Star per l’illuminazione allo stato solido (versione 1.0) è entrato in vigore a fine 2008 [58].

Armonizzazione globale

Problema fondamentale per i produttori è l'armonizzazione: il coordinamento degli sforzi a livello globale sugli standard per i LED sarà cruciale. La realizzazione di un prodotto per differenti mercati richiede un investimento significativo: le richieste delle varie realtà (es. il CE in Europa) esige sforzi significativi nella progettazione e nella verifica delle sorgenti per venire incontro a tutte le normative. In alcuni casi, per alcuni mercati devono essere realizzati prodotti specifici: non è un problema nuovo, ma con i LED si presenta l'opportunità di fare prodotti nuovi in modo più facile e più veloce, per arrivare a massimizzare le possibilità di risparmio energetico.

Aggiornamento degli standard esistenti

Gli standard precedentemente discussi sono recenti, ma i progressi nella tecnologia LED e i risultati dei test di laboratorio permettono alla comunità di aumentare il risparmio energetico, restringere le specifiche e migliorare i metodi di misura. Gli standard correnti avranno bisogno di essere migliorati e ristretti. Di solito, gli standard IES sono rivisti ogni cinque anni, con il progredire della tecnologia: poiché i LED si evolvono molto rapidamente, questo processo dovrebbe essere più frequente.

Nella ANSI 377.C78, le regioni definite per la temperatura di colore rappresentano un buon inizio, ma all'interno di una data regione i LED possono essere percepiti con colore e tinta differenti. Questo non dovrebbe sorprendere, dal momento in cui le regioni sono definite a partire dalle ellissi in 7 passi di MacAdam (Fig. VII.1), e con una ulteriore espansione della regione in un quadrilatero circoscritto, che assicura che non ci siano vuoti tra regioni adiacenti. I produttori di LED, dal canto loro, stanno cominciando a offrire una sottoclassificazione all'interno di queste regioni; si sta inoltre lavorando su uno standard di binning, ma è probabile che le regioni cromatiche si dovranno restringere o suddividere, perchè possano avere un senso per l'utilizzatore finale. D'altronde, una singola ellisse di MacAdam è la regione all'interno della quale è impercettibile il cambio di cromaticità: un'ellisse di MacAdam a 3 o 4 passi rappresenta il tipico per la maggior parte delle sorgenti luminose nelle applicazioni reali, e al di là di questi confini il cambio di colore risulta abbastanza evidente.

Poichè l'attuale metodo per la caratterizzazione e la misura della temperatura correlata di colore TCC risulta inadatto ad essere applicato ai LED, sarà utile sviluppare un nuovo sistema di misura basato sulla distanza del punto di cromaticità della sorgente rispetto alla curva del corpo nero. Tale distanza, indicata con il simbolo Δ_{uv} , deve essere molto esigua per evitare che la luce risulti colorata anzichè bianca: sebbene in una nota del Report CIE 13.3 sia scritto che la temperatura correlata di colore è definita solo quando la distanza del punto di cromaticità dalla curva del corpo nero è uguale o inferiore a 0.05, tale valore potrebbe risultare ancora troppo elevato.

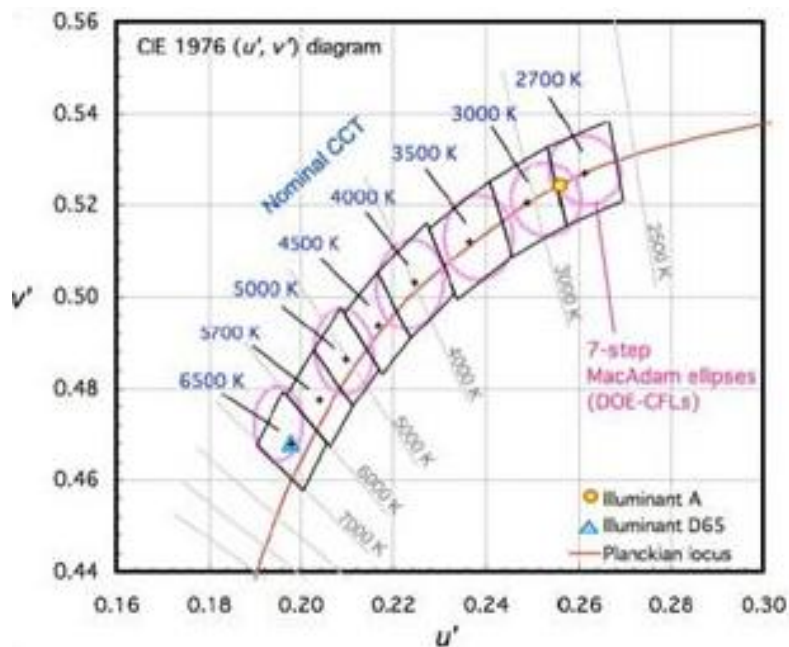
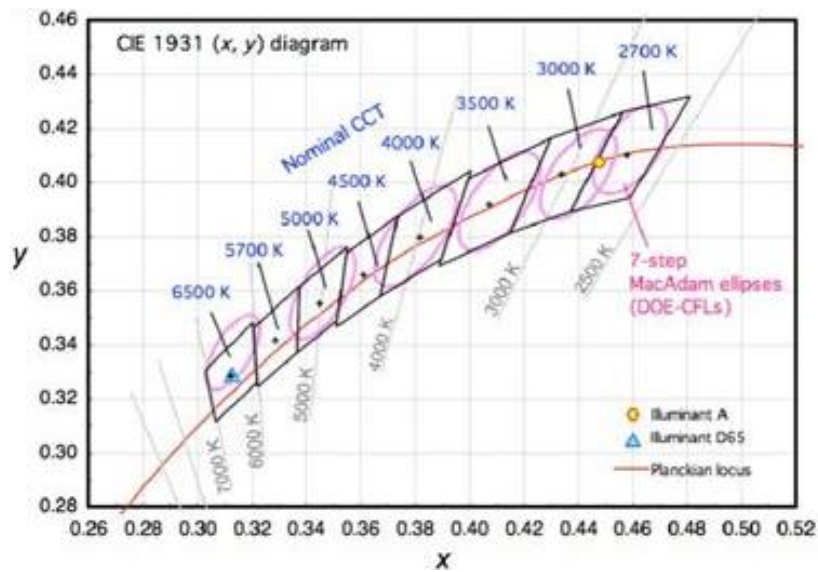


Figura VII.1. Ellissi di MacAdam nello spazio CIE xy (in alto) e nello spazio CIE u'v' (in basso)

Questa evoluzione non è nuova: anche per le sorgenti fluorescenti, come le compatte, le regioni definite erano e sono abbastanza ampie, ma i produttori hanno ridotto i valori in modo tale che i target sono diventati piuttosto piccoli, cioè all'interno degli step di MacAdam.

Standard formali e architettonici

Gli standard discussi sono standard prestazionali, ma esiste una seconda categoria, forse anche più importante per una tecnologia nascente come i LED: gli standard per l'architettura. Questi standard racchiudono le interfacce elettriche, i protocolli di dati e le connessioni meccaniche.

Comitati tecnici CIE sui LED

Le attività tecniche della CIE sono portate avanti sotto la responsabilità di sette Divisioni, ognuna delle quali copre un settore specifico dell'attività di ricerca su luce e illuminazione. Ogni Divisione istituisce Comitati Tecnici (TCs) per portare avanti il programma tecnico attraverso la redazione di relazioni tecniche sull'argomento specifico o standard. Diverse Divisioni della CIE si stanno attualmente occupando di LED in alcuni comitati tecnici.

Nell'ambito della Divisione 2, "Visione e colore", sono presenti 6 comitati tecnici dedicati ai LED:

- TC 2-46: "Standard CIE/ISO sulle misure di intensità dei LED"
- TC 2-50: "Misura delle proprietà ottiche degli assemblati LED"
- TC 2-58: "Misura della radianza e della luminanza dei LED"
- TC 2-63: "Misura ottica di LED ad alta intensità"
- TC 2-64: "Metodi veloci per testare i LED"
- TC 2-66: "Terminologia dei LED e degli assemblati LED"

Nell'ambito della Divisione, 3 "Ambienti interni e progettazione illuminotecnica", della Divisione 4 "Illuminazione e segnalazione nei trasporti", della Divisione 6 "Fotobiologia e fotochimica", è presente rispettivamente un solo comitato per divisione dedicato ai LED:

- TC 3-50: "Misure della qualità dell'illuminazione per illuminazione d'interni con sistemi LED"
- TC 4-47: "Applicazione dei LED per l'illuminazione e la segnalazione nel settore dei trasporti"
- TC 6-55: "Sicurezza fotobiologica dei LED"

Relazioni tecniche e guide già pubblicati

I comitati tecnici che hanno già concluso le loro attività sui LED hanno prodotto le seguenti relazioni tecniche:

- 177:2007 "Resa del colore delle sorgenti luminose a LED bianchi";
- 127-2007: "Misura dei LED" (seconda edizione).

Il futuro degli standard

Malgrado la crisi, i LED sono visti come una buona opportunità per offrire risparmio energetico, buona performance e molto di più. Lo stato dell'arte dei LED permette già molte applicazioni relative all'illuminazione generale, che è il settore più importante. Lo sviluppo e l'uso degli standard continuerà di pari passo, e i costi scenderanno, mentre procederanno gli sforzi per la standardizzazione.

La situazione in Italia

In Italia non esiste ad oggi una normativa specifica per le sorgenti LED, ma è allo studio una norma UNI per stabilire le modalità di misurazione delle grandezze relative a tali sorgenti.

Capitolo VIII

Campi di applicazione della tecnologia LED

Se inizialmente i LED erano studiati e prodotti solo per la componentistica elettronica in sostituzione delle spie a filamento e a neon, oggi le direzioni di sviluppo sono essenzialmente due: le segnalazioni nelle apparecchiature elettroniche civili e industriali e il mercato dell'illuminazione, inteso nel senso più ampio del termine.

A muovere i progettisti illuminotecnici verso la scelta dei LED sono arrivati fattori per lungo tempo ignorati: il contenimento della spesa energetica, l'affidabilità legata alla maggiore durata e al fatto che, essendo un apparecchio LED composto da più giunzioni, un guasto ad una giunzione non interrompe l'emissione di luce.

Le sorgenti luminose allo stato solido consentono un maggiore uso della creatività, una ridefinizione delle possibilità dell'illuminazione tramite l'utilizzo di scenari colorati e di effetti immaginativi, e quindi la creazione di un'atmosfera senza l'utilizzo di bulbi ingombranti, il tutto associato a una lunga vita e ad una grande resistenza agli urti e alla polvere. Nonostante i grandi pregi, l'applicazione dei LED all'illuminazione generale è ancora limitata, essenzialmente perché questa richiede flussi elevati, che i LED raggiungono solo se utilizzati in grande numero, quindi in apparecchi molto costosi.

Per quanto riguarda il settore dell'illuminazione, le applicazioni principali riguardano:

1. l'illuminazione generale funzionale e decorativa;
2. l'illuminazione per la coltivazione indoor;
3. la retroilluminazione per schermi LCD, TV e monitor;
4. altre applicazioni (illuminazione per sistemi di visione meccanizzata, sistemi di illuminazione portatile come torce, flash e illuminazione notturna a infrarossi).

Per quanto riguarda il campo delle segnalazioni per apparecchiature civili e industriali, le principali applicazioni sono:

1. luci per veicoli (auto, camion, autobus, navi, aerei e veicoli d'emergenza) e segnaletica luminosa (semafori e altri segnali stradali, guide di luce per atterraggio aerei, ecc.);
2. telecomunicazioni (sistemi IR di trasmissione dati tramite fibre ottiche);
3. altre applicazioni (schermi pubblicitari a colori, telefoni cellulari).

Illuminazione

Il campo in cui i LED stanno guadagnando sempre maggiore importanza è quello dell'illuminazione, nel cui sviluppo però sono frenati dal loro elevato costo e da impedimenti "infrastrutturali", legati alla rete elettrica ad alto voltaggio e in corrente alternata. I diodi luminosi sono momentaneamente in uso, seppur limitato, per l'illuminazione stradale, l'illuminazione monumentale (anche dinamica) di facciate di edifici e monumenti, l'illuminazione di interni (sia statica che dinamica) e alcuni campi della ricerca, tra i quali riveste particolare importanza quello della coltivazione in ambienti chiusi.

Illuminazione urbana

Nel futuro dei LED, uno degli ambiti applicativi di maggiore interesse è quello dell'illuminazione urbana, in quanto la continua estensione delle aree metropolitane fa aumentare in maniera vertiginosa la domanda di illuminazione pubblica. I LED si prestano in modo ottimo sia come sorgente per il sistema infrastrutturale dei percorsi destinati ai veicoli a motore per uso pubblico e privato, ma anche per le zone pedonali e ciclabili, per le aree verdi, per il patrimonio architettonico e monumentale, per le zone di attrazione turistica, di svago e intrattenimento serale e notturno: in questo vasto e multiforme ambito applicativo, la spesa energetica è ingente e in continua crescita, e la mancanza di illuminazione è associata direttamente a problemi di sicurezza. I LED forniscono risposta ad entrambi i problemi, grazie al forte risparmio energetico che consentono e alla grande affidabilità tecnico-funzionale, che dovrebbe assicurare un grande risparmio anche sui costi di manutenzione. Un ulteriore punto a favore dei LED nell'illuminazione urbana è il fatto che il loro minimo consumo energetico può essere facilmente supplito tramite l'utilizzo di mini elementi che sfruttano energie rinnovabili (micro fotovoltaico e microeolico) consentendo un forte risparmio anche sulla rete elettrica (Fig.VIII.1).





Figura VIII.1. Elementi a LED per l'illuminazione stradale senza e con fotovoltaico integrato.

Illuminazione monumentale

Alla rete viaria urbana, alle piazze e ai percorsi si dedica complessivamente la maggiore quantità di luce, ma il sistema infrastrutturale non esaurisce le applicazioni dei LED nell'ambito del territorio urbano: architetture, palazzi, monumenti, aree verdi di vario tipo, completano un panorama di applicazioni molto articolato in cui all'aspetto funzionale e utilitario si affianca quello teso a valorizzare, anche in chiave scenografica, il patrimonio architettonico, monumentale, storico artistico e naturalistico, per incentivare la fruizione serale e notturna della città. In questo ambito, i LED mettono in gioco le loro caratteristiche di sorgenti in miniatura, facilmente occultabili e i loro ristretti fasci luminosi permettono di rischiarare i monumenti in modo puntuale e preciso, come se si trattasse di colpi di pennello. Grandi effetti scenografici (sia in esterni che in interni) di luce dinamica si possono utilizzare collegando i dispositivi secondo un protocollo DMX512, convenzione usata nell'illuminazione per eventi artistici e similari: il protocollo prevede che i dispositivi usati vengano comandati mediante dati trasmessi alla consolle lungo un bus che poi li invia a ciascuno dei 512 canali possibili.

Illuminazione d'interni

Le caratteristiche dei LED sono molto apprezzate per l'illuminazione in ambienti chiusi: la loro dimensione ridotta ne consente facilmente l'occultamento al di sotto di mensole o in piccole rientranze del muro, mentre il loro fascio ristretto consente un'illuminazione puntuale, molto apprezzata per l'illuminazione di oggetti al fine di valorizzarne la volumetria: i negozi dei grandi brand internazionali utilizzano queste sorgenti, in particolare le gioiellerie e i negozi di cristalli.

L'illuminazione dinamica, precedentemente introdotta per riguarda l'illuminazione monumentale, in interni è ancora in fase di sviluppo: i protocolli Philips e iGuzzini che sono stati sviluppati per ricreare in interni l'andamento della luce esterna (in temperatura di colore e in illuminamento, seppur a livelli minori) sono infatti stati studiati per le lampade fluorescenti.

Un'applicazione molto importante dei LED è quella che riguarda l'illuminazione all'interno di musei e pinacoteche: l'uso come sorgenti illuminanti per le opere d'arte è perfetto per i diodi luminosi perché essi non emettono né infrarosso, che porta problemi di surriscaldamento e degradazione, né ultravioletto, che causa invece fotodegradazione. Il fascio ristretto dei LED consente inoltre di fornire una illuminazione estremamente precisa, che valorizzi l'opera d'arte.

Coltivazione indoor

Con l'impatto dei cambiamenti climatici, problemi seri e sempre più frequenti come siccità, inondazioni e tempeste, o come lo sviluppo di malattie, stanno diventando serie minacce per l'agricoltura. Queste minacce, insieme con eventuali rischi di carestia, stanno spingendo le persone all'agricoltura urbana (*vertical farm*) e in spazi chiusi (*indoor*): con la giusta illuminazione, l'agricoltura in interni elimina la perdita di raccolto dovuta a siccità e inondazioni e fornisce una produzione cerealicola per tutto l'anno [59].

L'uso di LED segna un grande passo avanti rispetto ai tradizionali metodi per l'illuminazione indoor: queste sorgenti permettono il controllo della composizione spettrale e l'aggiustamento dell'intensità luminosa per simulare i cambiamenti dell'intensità della luce naturale durante il giorno (Fig. VIII.2). Essi hanno anche la capacità di produrre alti livelli di illuminamento con bassi livelli di calore radiante, e si mantengono in funzione per anni. Inoltre, non contengono elettrodi e quindi non bruciano, come le lampade a incandescenza o quelle fluorescenti, che richiedono periodiche sostituzioni.





Figura VIII.2. Immagini di applicazioni pratiche dei LED per l'illuminazione delle piante

Retroilluminazione per LCD, TV e monitor

Altra applicazione in forte sviluppo è quella che prevede l'impiego dei LED come sorgenti per la retroilluminazione degli schermi LCD e di TV e monitor, specialmente di grandi dimensioni. La necessità di illuminare la superficie posta posteriormente a tali dispositivi elettronici nasce con lo scopo di limitare i problemi di abbagliamento legati all'eventuale eccessivo contrasto di luminanza tra lo schermo luminoso e l'oscurità retrostante. I LED non sono la sorgente ottimale per questa applicazione, a causa del loro fascio molto ristretto, ma sono allo studio nuove ottiche primarie e secondarie che consentono di conseguire livelli di illuminamento molto più omogenei rispetto alle ottiche attualmente in commercio (Fig. VIII.3).



Figura VIII.3. Modulo per retroilluminazione (in alto); esempio di retroilluminazione (in basso)

Segnalazioni per apparecchiature civili e industriali

Questa categoria di applicazioni riguarda campi molto diversi tra loro, dalla segnaletica stradale e degli automezzi, ai flash e all'illuminazione a infrarossi fino all'uso dei LED per la trasmissione dati.

Segnali stradali e ferroviari , illuminazione per mezzi di trasporto

I LED sono da tempo utilizzati da diverse case automobilistiche per le luci posteriori (posizione e stop, indicatori di direzione): essi vengono disposti lungo il perimetro della sagoma della luce corrispondente e davanti a un riflettore di materiale plastico e non metallico, dato che non riscaldano. Nel settore *automotive* quella dei LED è una scelta dettata non dall'economia di esercizio, ma da esigenze di sicurezza ed affidabilità: oltre alla durata molto più elevata, se si guasta un diodo la lampada globalmente continua a funzionare, perché i collegamenti per questo tipo di apparecchi sono realizzati in parallelo (Fig. VIII.4). Anche i semafori, sia per uso stradale che ferroviario, sono sempre più numerosi: la preferenza accordata ai LED in questo caso nasce sia da esigenze legate al risparmio energetico, che di sicurezza. La luce LED del semaforo è infatti costituita da cerchi concentrici di diodi collegati in serie, mentre il collegamento tra i vari cerchi è in parallelo: se un LED si brucia solo un cerchio si spegne, mentre globalmente l'apparecchio continua a funzionare. Il consumo dei LED è così basso che, come per l'illuminazione stradale, la maggior parte della segnaletica potrebbe autoalimentarsi con piccoli pannelli fotovoltaici o eolici.

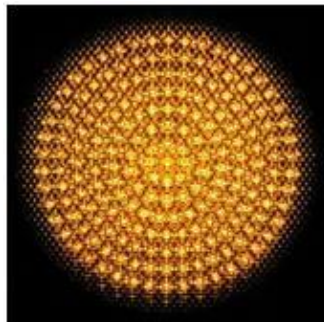


Figura VIII.4. Lampada LED per semaforo (in alto); LED nel faro di una macchina (in basso).

Flash e illuminazione notturna IR

Per riprese notturne o in condizioni di scarsa illuminazione si sfrutta la spiccata sensibilità delle telecamere con sensore d'immagine allo stato solido nei riguardi dei raggi infrarossi: più esattamente, per consentire alla telecamera di "vedere" anche al buio, si illumina la zona da riprendere mediante LED ad infrarossi.

Dispositivi mobili

Poiché i LED pesano e consumano poco (hanno bisogno di batterie piccole) sono molto utilizzati per i dispositivi mobili, in modo tale da ridurre l'ingombro e il costo delle batterie di alimentazione. Le applicazioni spaziano dai telefoni cellulari, bene di consumo su scala mondiale, fino alle torce elettriche di ultima generazione, estremamente maneggevoli.

LED e telecomunicazioni

I LED IR hanno cominciato ad essere considerati come meccanismo di trasmissione dati durante gli anni Novanta: l'emissione non nel visibile può essere utilizzata per veicolare informazioni via cavo a fibre ottiche o anche in aria: sviluppata inizialmente come meccanismo per cambiare il canale della tv, oggi ci sono LED che emettono nell'IR vicino (700-900nm) e lontano (700-1300nm) e le loro applicazioni nell'ambito delle telecomunicazioni sono abbastanza simili a quelle dei laser.

Capitolo IX

Considerazioni finali

Diversi sono gli ostacoli all'impiego su vasta scala dei LED: il costo ancora molto elevato, i problemi di alimentazione rispetto alla rete, la variabilità delle caratteristiche ottiche ed elettriche tra prodotti diversi e nel tempo, i problemi relativi al flusso e alla resa cromatica, ancora non ottimizzati e la scarsa di normativa specifica per le sorgenti luminose allo stato solido, che costringe ad utilizzare metodi di valutazione inappropriati alla nuova tecnologia.

Per fare un confronto, la situazione attuale della tecnologia LED è simile a quella della lampada di Edison che cercava di promuovere l'elettricità all'interno di un mercato dove l'illuminazione a gas era sovrana e in cui non esistevano infrastrutture per una semplice introduzione della luce elettrica. Ad oggi, le lampade a incandescenza e fluorescenti funzionano con voltaggi relativamente alti e governano il mercato, mentre non esistono infrastrutture per i LED. Purtroppo, oltre al problema relativo alla rete, le limitazioni all'uso dei diodi luminosi sono anche legate a regole e tecnologie applicative che includono gli standard, il packaging, i modelli di illuminazione, i driver, i sistemi di controllo e per l'illuminazione, gli apparecchi, le facilitazioni dall'industria delle costruzioni e i cambiamenti nelle regolamentazioni.

Considerazioni generali

Attualmente l'acquisto di LED richiede un'attenta considerazione di diversi fattori: tra questi vi sono il flusso luminoso, la direzione della luce, la capacità di essere usati con un dimmer, la durata di vita utile, la potenza consumata, la dissipazione del calore e la qualità della luce emessa.

Per quanto riguarda il *flusso*, fino a poco tempo fa quello dei LED era irrisorio rispetto a quello delle lampade ad incandescenza: una lampadina da 75W ha un flusso di 1050 lm, mentre una lampadina LED ha un flusso compreso tra 20 e 80 lumen. Per risolvere il problema sono stati aggiunti più LED all'interno di un solo bulbo, aumentando gradualmente le unità da 12 a 24 a 36 fino ad arrivare ad oggi a 150 o più : il risultato è un apparecchio con un flusso circa dimezzato rispetto a quello di una lampada a incandescenza convenzionale da 100W, ma estremamente più costoso.

Per quanto riguarda la *direzione della luce emessa*, la generazione di luce multi direzionale richiede molti LED puntati in diverse direzioni e posti all'interno del bulbo: la ricerca in questo senso è appena agli inizi, ma ha già dimostrato che in questo modo si ottengono illuminamenti uniformi anche da distanze elevate, aprendo ai LED in maniera più decisa il settore dell'illuminazione generale.

L'uso dei diodi con *dimmer* è ancora nelle prime fasi di sviluppo e servirà tempo ai produttori per sviluppare una tecnologia che consenta di incorporare più LED su un circuito dimmerabile.

Per quanto riguarda la *vita utile*, la maggior parte dei LED dichiara 60000 ore, con picchi di 100000 ore per i diodi monocromatici: questo è uno dei punti di forza della nuova tecnologia, dal momento che una lampada a incandescenza funziona per 750 ore, mentre una fluorescente compatta per 7500 ore.

Dal punto di vista della *potenza elettrica consumata*, i LED consumano circa un decimo di Watt per ogni LED all'interno del bulbo: una lampada con 150 LED consuma cioè 15W, che è il 20% di una lampada a incandescenza da 75W.

Per quanto riguarda la *dissipazione del calore*, i diodi all'interno di un bulbo LED converte quasi tutta la potenza assorbita in luce visibile; ciononostante è necessario l'utilizzo di un cooler abbastanza ingombrante per impedire il riscaldamento della giunzione P-N e la conseguente degradazione delle proprietà ottiche. Riuscire a ridurre la massa di tale componente dell'apparecchio a power LED, che può pesare 2-10Kg, è fondamentale per il risparmio di materiale e per la facilità di applicazione: per questo, è necessario che siano raffinati i sistemi di controllo della corrente, i cui sviluppi sono ancora allo stato embrionale.

La *qualità della luce* è parametro molto importante, da valutare attentamente: a tal proposito, la sospensione del binning fa venire meno le già scarse garanzie sull'omogeneità delle caratteristiche ottico-elettriche dei diodi, rendendo sostanzialmente impossibile per il consumatore l'acquisto di più sorgenti dalle caratteristiche ottiche identiche. Altro problema pressante in questo ambito è quello della necessità di sostituire il vecchio IRC con una nuova grandezza, che tenga in debito conto la resa dei colori saturi, caratteristica specifica dei diodi luminosi. Altra aspetto critico è il rapporto di mutua esclusione (proprio anche delle altre sorgenti) tra la resa cromatica e l'efficienza luminosa: i modelli teorici di LED a 3 o 4 chip ottimizzati per queste due grandezze vanno ancora verificati sperimentalmente e commercializzati, mentre attualmente le garanzie sull'effettiva resa cromatica dei LED bianchi sono scarse e inoltre la degradazione di tali caratteristiche ottiche è rapida nel tempo, con viraggio incontrollato del colore della luce dovuto alla degradazione differenziata dei vari diodi.

Considerazioni per l'acquisto

Per sintetizzare lo stato attuale della tecnologia LED, è utile fare un semplice paragone economico tra queste nuove sorgenti e le lampade tradizionali: dalla Tab. IX.1 emerge come i costi per 60000 ore di utilizzo di una lampada LED sono circa 1/8 di quelli per le fluorescenti, e addirittura 1/20 di quelli per le lampade a incandescenza, mentre il costo dell'apparecchio a diodi è 4 volte quello di una lampada ad incandescenza e fluorescenti.

Per tutte le ragioni esposte, al di là dei problemi legati al costo elevato, i LED non possono ancora considerarsi una sorgente tecnologicamente in grado di sostituire le lampade tradizionali: sono necessari ancora diversi passi avanti nella ricerca per poter consentire la commercializzazione di apparecchi veramente affidabili dal punto di vista ottico. Sono però molto probabilmente, la soluzione per il prossimo futuro.

Tabella IX.1. Costi di acquisto e funzionamento (in \$) di 3 sorgenti dalle caratteristiche simili. Il costo dell'energia elettrica è stato approssimato a 10 centesimi di dollaro per kWh. Il costo di gestione è stato calcolato moltiplicando la durata di vita del bulbo per il numero di bulbi richiesti e per la potenza consumata, e poi diviso per il costo unitario dell'energia elettrica.

Caratteristica	incandescenza	fluorescente	LED
Vita (ore)	750	7500	60000
Numero di bulbi	80	8	1
Costo dei bulbi (\$)	20	24	80
Watt consumati	100	20	9
Costi energetici (\$)	800	120	54
Costo totale (\$)	820	144	134

Bibliografia

- [1] Margolin J. The Road to the Transistor, September 2005. URL <http://www.jmargolin.com/history/trans.htm>
- [2] Nakamura S, Fasol G, Pearton SJ. The blue laser diode: the complete story, 2nd ed., Springer; 20003-540-66505-6
- [3] G. Held, Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications, CRC Press, Broken Sound Parkway (NW), 2009
- [4] E. F. Schubert, Light Emitting Diodes, II Edition, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2006
- [5] G. Forcolini, Illuminazione LED, Hoepli, Milano 2008
- [6] D. Scullino, Il LED e l'illuminazione, Sandit, Albino (BG) 2009
- [7] www.Zled.com/en/product/prd/acriche.asp
- [8] <http://www.lynkylabs.com/xylite.html>
- [9] M. Burmen, F. Pernuš, B. Likar, LED light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their assessment, Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 122002 (15pp)
- [10] CIE publication No. 15 1971 Colourimetry (Vienna: CIE Central Bureau)
- [11] CIE 177-2007 2007 Colour Rendering of White LED Light Sources (Vienna: CIE Central Bureau)
- [12] Grillo P N, Krames M R and Zhao H M 2006 Sixty thousand hour light output reliability of AlGaInP light emitting diodes IEEE Trans. Device Mater. Reliab. 6 564-74
- [13] Meneghesso G, Levada S, Zanoni E, Scamarcio G, Mura G, Podda S, Vanzi M, Du S and Eliashevich I 2003 Reliability of visible GaN LEDs in plastic package Microelectron. Reliab. 43 1737-42
- [14] MacAdam D L 1942 Visual sensitivities to colour differences in daylight J. Opt. Soc. Am. 32 247-74
- [15] Yanagisawa T 1997 Estimation of the degradation of InGaN/AlGaIn blue light-emitting diodes Microelectron. Reliab. 37 1239-41
- [16] Chuang S L, Ishibashi A, Kijima S, Nakayama N, Ukita M and Taniguchi S 1997 Kinetic model for degradation of light-emitting diodes IEEE J. Quantum Electron. 33 970-9

- [17] Narendran N, Bullough J D, Maliyagoda N and Bierman A 2001 What is useful life for white light LEDs? *J. Illum. Eng. Soc.* 30 57–67
- [18] Narendran N, Gu Y, Freyssonier J P, Yu H and Deng L 2004 Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs *J. Cryst. Growth* 268 449–56
- [19] Yanagisawa T and Kojima T 2005 Long-term accelerated current operation of white light-emitting diodes *J. Lumin.* 114 39–42
- [20] Narendran N, Bullough J D, Maliyagoda N and Bierman A 2001 What is useful life for white light LEDs? *J. Illum. Eng. Soc.* 30 57–67
- [21] Burmen M, Pernuš F and Likar B 2007 Accelerated estimation of spectral degradation of white GaN-based LEDs *Meas. Sci. Technol.* 18 230–8
- [22] 1991 US Military Handbook 217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment (Springfield: National Technical Information Service)
- [23] Burmen M, Pernuš F and Likar B 2006 Automated optical quality inspection of light emitting diodes *Meas. Sci. Technol.* 17 1372–8
- [24] Rykowski R and Kostal H 2008 Novel approach for LED luminous intensity measurement *Proc. SPIE Photonics West 2008, Integrated Optoelectronic Devices (OPTO), Light-Emitting Diodes: Research Manufacturing, and Applications XII (San Jose, CA, USA) vol 6910 ed K P Streubel and H Jeon (Bellingham: SPIE) 69100C*
- [25] Chuang S L, Ishibashi A, Kijima S, Nakayama N, Ukita M and Taniguchi S 1997 Kinetic model for degradation of light-emitting diodes *IEEE J. Quantum Electron.* 33 970–9
- [26] Narendran N, Gu Y, Freyssonier J P, Yu H and Deng L 2004 Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs *J. Cryst. Growth* 268 449–56
- [27] Yanagisawa T 1998 The degradation of GaAlAs red light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations *Microelectron. Reliab.* 38 1627–30
- [28] Yanagisawa T 1997 Estimation of the degradation of InGaN/AlGaIn blue light-emitting diodes *Microelectron. Reliab.* 37 1239–41
- [29] Narendran N, Bullough J D, Maliyagoda N and Bierman A 2001 What is useful life for white light LEDs? *J. Illum. Eng. Soc.* 30 57–67
- [30] Grillot P N, Krames M R and Zhao H M 2006 Sixty thousand hour light output reliability of AlGaInP light emitting diodes *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 6 564–74
- [31] Levada S, Meneghini M, Meneghesso G and Zanoni E 2005 Analysis of DC current accelerated life tests of GaN LEDs using a Weibull-based statistical model *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 5 688–93

- [32] Burmen M, Pernuš F and Likar B 2007 Accelerated estimation of spectral degradation of white GaN-based LEDs Meas. Sci. Technol. 18 230–8
- [33] American National Standard 2008 Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products (ANSI C78.377) URL [http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG- C78–377.cfm/](http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG-C78-377.cfm/) (30 March 2008)
- [34] Burmen M, Pernuš F and Likar B 2007 Prediction of intensity and color degradation of LEDs Proc. SPIE Photonics West 2007, Integrated Optoelectronic Devices (OPTO), Light-Emitting Diodes: Research Manufacturing, and Applications XI (San Jose, CA, USA) vol 6486 ed K P Streubel and H Jeon (Bellingham: SPIE) 64860M
- [35] Lighting Research Center ASSIST Recommends Publications 1 URL <http://www.lrc.rpi.edu/> (30 March 2008)
- [36] The Illuminating Engineering Society of North America URL <http://www.iesna.org/> (30 March 2008)
- [37] American National Standard 2008 Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products (ANSI C78.377) URL [http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG- C78–377.cfm/](http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG-C78-377.cfm/) (30 March 2008)
- [38] American National Standard Specifications for the Chromaticity of Fluorescent Lamps (ANSI C78.376) URL [http://www.nema.org/stds/c78–376.cfm/](http://www.nema.org/stds/c78-376.cfm/) (30 March 2008)
- [39] M. Burmen, F. Pernuš, B. Likar, Accelerated estimation of spectral degradation of white GaN-based LEDs, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 230–238
- [40] D. S. Mehta, K. Saxena, S. K. Dubey, C. Shakher, Coherence characteristics of light-emitting diodes, Journal of Luminescence 130 (2010) 96–102
- [41] CIE 13.3:1995, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources
- [42] Y. Ohno, Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra, Fourth International Conference on Solid State Lighting, Proc. of SPIE Vol. 5530 (SPIE, Bellingham, WA, 2004), pp. 88-98
- [43] J. Worthey, Color Rendering: Asking the Questions, Color Res. Appl. 28(6):403-412, December 2003
- [44] K. Hashimoto and Y. Nayatani, Visual Clarity and Feeling of contrast, Color Res. Appl. 19-3, 171-185 (1994)
- [45] D. B. Judd, A flattery index for artificial illuminants, Illuminating Engineering, Vol. 62, 593-598 (1967)

- [47] W. A. Thornton, A validation of the color-preference index, *J. IES*, October 1974, 48-52 (1974)
- [48] J.-M. Kang, J.-W. Kim, J.-H. Choi, D.-H. Kim, H.-K. Kwon, Life-time estimation of high-power blue light-emitting diode chips, *Microelectronics Reliability* 49 (2009) 1231–1235
- [49] Y.-C. Chang, C.-J. O, Y.-S. Tsai, F.-S. Juang, Nonspherical LED Packaging Lens for Uniformity Improvement, *Optical Review* Vol. 16, No. 3 (2009) 323–325
- [50] C.T. Pan, M.F. Chen, P.J. Cheng, Y.M. Hwang, S.D. Tseng, J.C. Huang, Fabrication of gapless dual-curvature microlens as a diffuser for a LED package, *Sensors and Actuators A* 150 (2009) 156–167
- [51] E. M. Guttsait, analysis of the Illuminance Provided by LED Modules Placed at Large Distances from Illuminated Objects, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, Vol. 54, No. 1, pp. 107–118
- [52] B.-J. Huang, P.-C. Hsu, M.-S. Wu, C.-W. Tang, Study of system dynamics model and control of a high-power LED lighting luminaire, *Energy* 32 (2007) 2187–2198
- [53] B.-J. Huang, C.-W. Tang, Thermal–electrical–luminous model of multi-chip polychromatic LED luminaire, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 3366–3373
- [54] Zhang Lei, Guo Xia, Liang Ting, Gu Xiaoling, Lin Qiao Ming, Shen Guangdi, Color rendering and luminous efficacy of trichromatic and tetrachromatic LED-based white LEDs, *Microelectronics Journal* 38 (2007) 1–6
- [55] K. Dowling, Why 2008 was the year of LED standards”, *LEDs Magazine* 4 (2009) pp. 29- 31
- [56] K. Dowling “LED lighting standards and guidelines are now building on a firm foundation”, *LEDs Magazine* 6 (2009)
- [57] G. Luoni, Lampade a LED e normative, *Sandit, Albino* (BG) 2009
- [58] www.ssl.energy.gov/energy_star.html
- [59] N. Yeh, J.-P. Chung, High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2175–2180