



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione**  
(Laurea triennale DM 270/04)

**CARATTERISTICHE, QUALITÀ E CROMATICITÀ**  
**DELLA LUCE A LED**

**FEATURES, QUALITY AND CHROMATICITY OF THE**  
**LED LIGHT**

*Relatore: Prof. GAUDENZIO MENEGHESSO*

*Laureanda: VANESSA RIZZATO*

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013



# Indice

<b>Introduzione.....</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1 - Principi di funzionamento dei LED .....</b>	<b>7</b>
1.1 Teoria delle bande e materiali semiconduttori .....	7
1.2 La giunzione P-N.....	9
1.3 Emissione luminosa nei LED e colore della luce emessa .....	11
1.4 Package di un LED e tipologie.....	13
1.4.1 LED THT (Through Hole Technology) .....	14
1.4.2 LED SMT (Surface Mounted Technology).....	15
1.4.3 Power LED .....	15
<b>Capitolo 2 - Qualità e cromaticità della luce.....</b>	<b>17</b>
2.1 Sensibilità dell'occhio umano .....	17
2.1.1 Grandezze fotometriche .....	17
2.1.2 I fotorecettori dell'occhio umano e i regimi di visione .....	18
2.1.3 Funzione di sensibilità dell'occhio.....	19
2.1.4 Efficacia ed efficienza luminosa .....	21
2.2 La colorimetria .....	22
2.2.1 Funzioni di color-matching .....	22
2.2.2 Il diagramma di cromaticità.....	24
2.3 Temperatura di colore .....	27
2.4 Resa cromatica .....	30
<b>Capitolo 3 - Sorgenti LED a luce bianca .....</b>	<b>33</b>
3.1 Generazione di luce bianca per sintesi additiva .....	33
3.1.1 Sorgenti a luce bianca bicromatiche.....	34
3.1.2 Sorgenti a luce bianca tricromatiche .....	35
3.1.3 Sorgenti a luce bianca tetracromatiche e pentacromatiche.....	38
3.2 Generazione di luce bianca per fotoluminescenza .....	38
3.2.1 Luce bianca generata da un LED blu e fosforo .....	40
3.2.2 Luce bianca generata da un LED UV e fosfori .....	43
<b>Capitolo 4 - Pilotaggio dei LED.....</b>	<b>45</b>
4.1 Pilotaggio LED con regolatori lineari .....	45
4.2 Pilotaggio LED con regolatori switching .....	47
4.2.1 Regolatori switching.....	47
4.2.2 Dimmerabilità dei LED .....	53
<b>Capitolo 5 - I LED come fonte d'illuminazione .....</b>	<b>55</b>
5.1 Illuminazione stradale .....	55
5.1.1 Sorgenti luminose a LED .....	55
5.1.2 Apparecchio di illuminazione.....	58
5.1.3 Illuminazione di gallerie.....	60
5.2 Illuminazione di musei .....	62
5.3 Illuminazione di centri commerciali.....	64
<b>Capitolo 6 - Conclusione : tecnologie di illuminazione a confronto.....</b>	<b>67</b>
<b>Riferimenti .....</b>	<b>71</b>



# Introduzione

Il primo LED (Light Emitting Diode, diodo ad emissione luminosa), di colore rosso, fu realizzato nel 1962, poi successivamente ne furono sviluppati altri che emettevano luce gialla e verde. Inizialmente venivano utilizzati solo nel ruolo di micro-componente optoelettronica pensata per la segnalazione. Solo negli anni '90 furono realizzati LED a luce blu, i quali emettono radiazioni di frequenza maggiore: da questi fu possibile realizzare dispositivi che, mescolando la luce tra loro, potevano generare qualsiasi colore, rendendo i LED adatti ad utilizzi ad ampio raggio, tra cui quelli riguardanti l'illuminazione di ambienti interni ed esterni.

Le loro principali proprietà, quali alta efficienza, elevata capacità di potenza, una buona capacità di resa cromatica, alta affidabilità, fabbricabilità a basso costo e rispetto dell'ambiente, permette loro di competere con le fonti di illuminazione tradizionali, in particolare con le lampade a incandescenza e lampade fluorescenti.

I LED sono, infatti, considerati le lampadine del futuro. Si può notare che già attualmente questi dispositivi sono ovunque e continuano a diffondersi sempre più.

Alcuni degli utilizzi principali sono:

- indicatori di stato (lampadine spia);
- retroilluminazione di display LCD;
- semafori stradali;
- dispositivi luminosi di autovetture e motocicli;
- lampeggianti dei veicoli d'emergenza ;
- cartelloni a messaggio variabile;
- illuminazione di ambienti, quali case, uffici, negozi, supermercati, musei;
- illuminazione stradale.

I LED, infatti, presentano numerosi vantaggi:

- rispetto ai prodotti tradizionali (lampade a incandescenza, alogene, fluorescenti e a scarica) la quantità di materia utilizzata nella fabbricazione è molto minore;
- le dimensioni piccole li rendono meno ingombranti;
- non contengono sostanze tossiche e nocive, come ad esempio il mercurio;
- emettono luce priva di radiazioni infrarosse e ultraviolette;
- lunga durata di funzionamento: le sorgenti luminose a LED non tendono a spegnersi improvvisamente una volta che hanno esaurito la loro vita utile, ma diminuiscono gradualmente nel tempo il loro flusso luminoso iniziale fino ad esaurirsi completamente in un periodo molto lungo;
- costi di manutenzione ridotti;
- efficienze e rendimenti elevati;

- funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione;
- accensione a freddo;
- insensibilità a umidità e vibrazioni;
- durata non influenzata dal numero di accensioni/spegnimenti;
- direzionalità della luce;
- consente di illuminare gli ambienti con una luce paragonabile a quella solare.

Nel **primo capitolo** vengono analizzati i principi di funzionamento dei LED, la loro struttura, le diverse tipologie e le rispettive caratteristiche e funzionalità.

Il **secondo capitolo** è dedicato ad un'analisi generale della qualità e cromaticità della luce, con riferimento anche alla sensibilità dell'occhio umano. Con riferimento ai LED verranno poi analizzati i parametri che determinano la qualità della luce, quali la temperatura di colore e la resa cromatica.

Nel **terzo capitolo** vengono presentate le diverse tecniche utilizzate per produrre luce bianca (eterocromatica) a LED, analizzando i vantaggi e gli svantaggi per ognuna di esse.

Il **quarto capitolo** tratta riguardo al pilotaggio dei LED tramite l'uso di regolatori lineari e regolatori switching.

Il **quinto capitolo** presenta i LED come fonte di illuminazione di tre ambiti particolari: le strade e le gallerie, i musei e i centri commerciali (supermercati e negozi) mettendo in evidenza i vantaggi che si hanno con l'uso di questa tecnica di illuminazione.

Infine, il **sesto capitolo** costituisce una conclusione in cui viene fatto un breve confronto tra le diverse tecnologie di illuminazione, ponendo l'attenzione sui vantaggi e svantaggi che caratterizzano la tecnica a LED ancora in fase di sviluppo.

# Capitolo 1

## Principi di funzionamento dei LED

Un LED, acronimo di Light Emitting Diode, diodo ad emissione di luce, è un chip di materiale semiconduttore drogato con impurità tale da formare una giunzione positivo-negativo (P-N) : il polo positivo di tale giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo. Il LED è attraversato da corrente in un solo verso, così come un normale diodo, e ha inoltre la capacità di emettere luce. In figura 1.1 è mostrato il simbolo circuitale del LED, che ne indica 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.



Figura 1.1 : Simbolo circuitale del LED.

### 1.1 Teoria delle bande e materiali semiconduttori

Attorno al nucleo di ogni atomo ci sono degli orbitali, ovvero delle regioni di spazio in cui è massima la probabilità di avere presenza di elettroni, i quali, seguendo traiettorie circolari o ellittiche, si muovono in moto accelerato verso il centro del nucleo. Essi non disperdono energia, non decadono fino a che non sono perturbati, fino a che non valicano i confini dei rispettivi orbitali. A ogni orbitale il modello associa un livello energetico, ovvero tra livello e livello sussiste una differenza fissa di energia e queste differenze sono valutate tramite il concetto di quantum di energia. Gli orbitali più vicini al nucleo hanno energia inferiore rispetto a quelli che si trovano a maggior distanza. Quando un elettrone passa da un orbitale all'altro, si ha un' emissione o un assorbimento di energia se il transito avviene rispettivamente verso un livello inferiore, più vicino al nucleo, oppure verso un livello superiore, più lontano dal nucleo. L'apporto di energia necessario per questo transito può essere dato dal calore, dalla luce o da altre cariche elettriche.

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. 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 le due bande (di valenza e di conduzione) può trovarsi la "banda proibita" : nei materiali isolanti essa è molto grande e quindi sono 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 si sovrappongono, per cui non vi è banda proibita e un notevole numero di elettroni possiede energia sufficiente per muoversi e quindi condurre corrente elettrica. Nei materiali semiconduttori la banda proibita è piccola, quindi è sufficiente che l'atomo venga sollecitato da energia termica, elettrica o radiazioni elettromagnetiche 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.



Figura 1.2 : Banda di valenza e di conduzione rispettivamente in un materiale conduttore, isolante, semiconduttore.

Al fine di aumentare la capacità di perdere o di acquisire elettroni, modificando così la conducibilità, nella struttura cristallina del wafer di semiconduttore di partenza vengono introdotti degli atomi di impurità attraverso un processo chiamato drogaggio, tali da variare le concentrazioni di atomi accettori  $N_A$  e atomi donatori  $N_D$ . Si ottiene un semiconduttore di tipo P, caratterizzato da una concentrazione di atomi  $N_A > N_D$ , drogando con sostanze trivalenti (gallio, boro, alluminio) il wafer di partenza, mentre si ottiene un semiconduttore di tipo N, caratterizzato da una concentrazione di atomi  $N_D > N_A$ , introducendo sostanze pentavalenti (fosforo, arsenico, antimonio).

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

## 1.2 La giunzione P-N

In uno stesso materiale è possibile ottenere drogaggi differenti, di tipo N e P, in due regioni distinte, in modo da ricavare una sottozona di confine chiamata giunzione P-N. Nella regione N gli elettroni sono dotati di una loro mobilità e, approssimandosi alla giunzione, vanno a occupare le lacune della zona P prossima al confine.

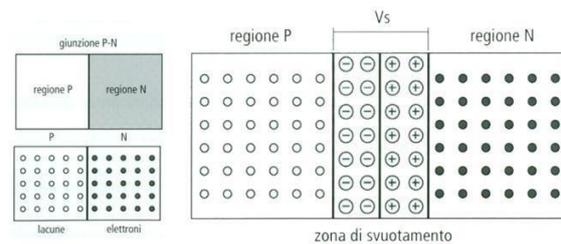


Figura 1.3 : Materiale semiconduttore con regioni P e N e zona di svuotamento.

Ogni volta che un elettrone lascia il proprio atomo attraversando la giunzione si crea uno ione positivo e, viceversa, l'occupazione di una lacuna crea uno ione negativo nella regione P.

Questo processo causa un'ulteriore sottozona, tra le due regioni, chiamata Regione di Carica Spaziale, SCR, in cui si fronteggiano gli ioni positivi con quelli negativi sui due lati opposti.

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

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

dove  $N_A$  e  $N_D$  sono le concentrazioni degli atomi accettori e donatori, mentre  $n_i$  è la concentrazione intrinseca (densità degli elettroni liberi) del semiconduttore.

Polarizzando direttamente la giunzione, cioè applicando una differenza di potenziale positiva  $V$  tra regione P e N, si abbassa la barriera di potenziale creata dalla SCR con una conseguente iniezione di portatori minoritari: elettroni dalla regione N alla P e lacune in senso opposto, ottenendo così un flusso di corrente. La caratteristica corrente – tensione di una giunzione PN è data dalla formula:

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

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

Le caratteristiche della giunzione variano a seconda dei materiali utilizzati.

In figura 1.4 sono riportate le caratteristiche I-V per diversi materiali semiconduttori alla temperatura di 295 K.

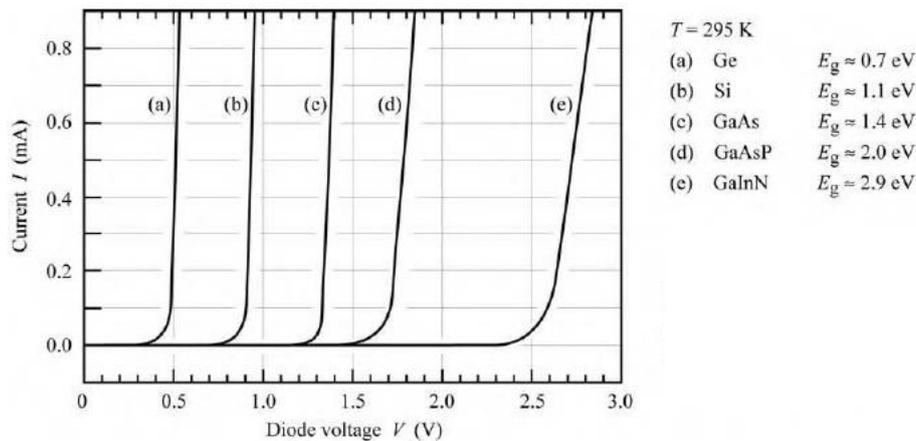


Figura 1.4 : Caratteristica I-V di diversi semiconduttori alla temperatura di 295 K.

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

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

Nel momento in cui gli elettroni di conduzione giungono nella regione P e si combinano con le lacune, passano alla banda di valenza, quindi perdono energia che si libera sotto forma di calore (radiazione IR) oppure di luce (radiazioni visibili) o sotto forma di radiazioni ultraviolette: questo processo prende il nome di ricombinazione.

Il diodo luminoso, il diodo che emette luce, prende il nome di LED.

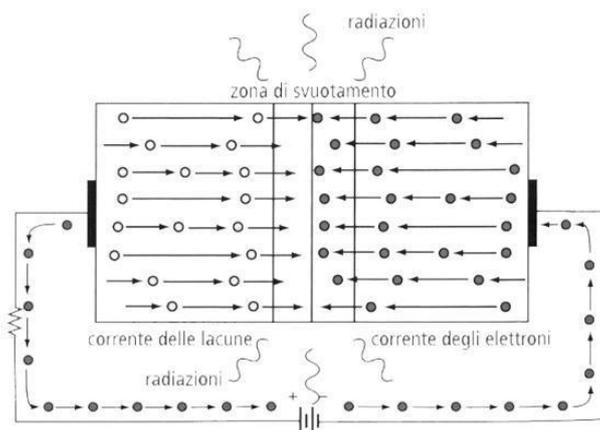


Figura 1.5 : Transito di elettroni e lacune con emissione di radiazioni.

### 1.3 Emissione luminosa nei LED e colore della luce emessa

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. L'energia assorbita dalla corrente elettrica viene 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.

L'energia del fotone emesso è strettamente legata al materiale con cui è realizzato il semiconduttore e, idealmente, è pari al salto effettuato dall'elettrone (bandgap del semiconduttore):

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

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

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.

Il wafer di semiconduttore prende il nome di chip, la cui struttura varia a seconda dei materiali usati e della funzione che dovrà svolgere. Al di sopra del substrato, solitamente in carburo di silicio o zaffiro, viene fatto crescere uno strato epitassiale di semiconduttori: sopra il substrato è presente uno strato buffer, di seguito c'è uno strato di tipo n abbastanza spesso, a cui segue la zona attiva che è la zona del chip dove avviene l'emissione luminosa. Sopra la zona attiva si trova uno strato di tipo p con la funzione di confinare gli elettroni nella zona attiva (buca quantica). Infine è presente un ulteriore strato di tipo p sul quale si pone il contatto metallico.

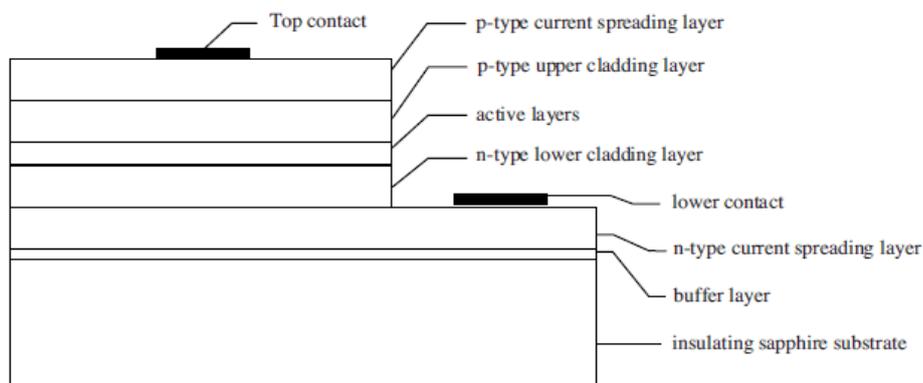


Figura 1.6 : Schema del chip di un LED

I semiconduttori LED sono costituiti da una combinazione di elementi quali fosfuri o arseniuri, 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.

Esistono diverse combinazioni, ciascuna delle quali libera quantità variabili di energia in funzione della banda proibita del materiale semiconduttore: in base alla relazione  $\lambda = hc/E$  si può notare che la lunghezza d'onda delle radiazioni emesse è inversamente proporzionale al bandgap del semiconduttore utilizzato. Si ha quindi che a bandgap bassi (silicio e germanio) corrispondono lunghezze d'onda alte nella zona dell'infrarosso, mentre a bandgap alti corrispondono lunghezze d'onda basse nella zona dell'ultravioletto.

In questo modo si produce una luce monocromatica (di un solo colore), cioè ad una specifica lunghezza d'onda. A determinare la lunghezza d'onda della luce emessa concorrono, quindi, il materiale semiconduttore utilizzato per la creazione della giunzione P-N e il livello di drogaggio di tale materiale.

Nello spettro della luce visibile, compreso tra 380 e 740 nm, tra i colori tipici di luce emessa da un LED vi sono il rosso, l'arancio, il giallo, il verde e il blu.

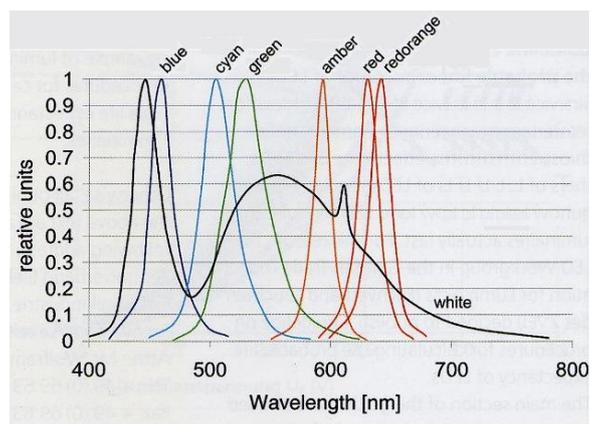


Figura 1.7 : Diagrammi energetici per LED

Nei primi LED, per riuscire ad ottenere lunghezze d'onda tali che la radiazione elettromagnetica diventi luce visibile, fu utilizzato l'arseniuro di gallio (GaAs), semiconduttore composto da arsenico e gallio che emette una radiazione luminosa visibile rossa poco sotto i 680 nm.

Sperimentando poi altri composti ci fu un processo di differenziazione della luce emessa, a partire dall'arancione, giallo, verde e blu.

Tali composti sono:

Arseniuro di Gallio (GaAs) : LED a luce rossa scura

Arseniuro di Gallio e Alluminio (GaAlAs) : LED a luce rossa di varie tonalità

Fosforo e Arseniuro di Gallio (GaAsP) : LED a luce rossa, arancio e gialla

Fosforo di Indio, Gallio e Alluminio (InGaAlP) : LED a luce rossa, arancio, gialla e verde

Fosforo di Gallio (GaP) : LED a luce rossa, arancio, gialla e verde

Nitruro di Gallio (GaN) : LED a luce verde, blu e bianca

Nitruro di Gallio e Indio (InGaN) : LED a luce verde e blu

Carburo di Silicio (SiC) : LED a luce verde, blu e bianca

Nella tabella 1.1 sono riportati i materiali semiconduttori tipici utilizzati per ottenere diversi colori a diverse lunghezze d'onda: si nota che la luce blu è prodotta se viene liberato un alto livello di energia (lunghezza d'onda più piccola), mentre la luce è rossa se il livello di energia emessa è più basso (lunghezza d'onda più grande).

SEMICONDUTTORE	COLORE LUCE EMESSA	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)
GaAs, GaAlAs, GaAsP, InGaAlP, GaP	ROSSO	623-740
GaAsP, InGaAlP, GaP	ARANCIO	612-623
GaAsP, InGaAlP, GaP	GIALLO	574-612
InGaAlP, GaP, GaN, InGaN, SiC	VERDE	505-574
GaN, InGaN, SiC	BLU	430-505

Tabella 1.1

L'unico spettro che il chip non è in grado di produrre direttamente è lo spettro della luce bianca, poiché la luce bianca rappresenta una miscela di tutti i colori della luce. Tuttavia i LED bianchi sono molto importanti in quanto solo questi rendono possibile l'illuminazione di ambienti.

Il LED eterocromatico viene prodotto tramite diverse tecniche che saranno analizzate nel capitolo 3.

## 1.4 Package di un LED e tipologie

Il chip viene racchiuso all'interno di un involucro, chiamato package, fornito di appositi elementi elettrici e ottici.

Per far transitare corrente è necessario dotare il chip di due piastrine, chiamate elettrodi, saldati ai capi delle due zone, la P e la N. Questi sottili canali per la corrente elettrica si distinguono in anodo (collegamento alla zona P) e catodo (collegamento alla zona N).

Il chip viene posizionato all'interno di una capsula di protezione, la quale è ermetica, è trasparente o semitrasparente, possiede un alto indice di rifrazione e stabilità a temperature elevate. Essa ha il compito di riflettere e rifrangere le radiazioni luminose in modo che siano concentrate nell'emisfero superiore dello spazio che circonda il LED; nessuna radiazione, infatti, segue direzioni rivolte verso l'emisfero inferiore.

Diversamente avviene, invece, nelle comuni lampade in cui le radiazioni si propagano verso l'alto, verso il basso e ai lati, in entrambi gli emisferi, superiore e inferiore.

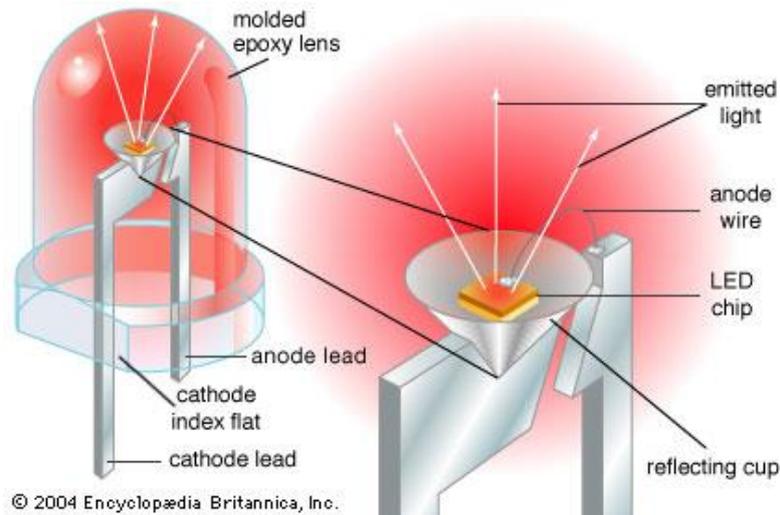


Figura 1.8 : package di un LED

I LED possono essere classificati in tre diverse tipologie : LED THT, LED SMT e Power LED.

### 1.4.1 LED THT (Through Hole Technology)

Questo tipo di LED si è affermato per primo a partire dagli anni '60, come LED idoneo nel campo della segnalazione, infatti la sua micro struttura lo rende adatto ad essere collocato in un foro in modo da realizzare la classica spia luminosa.

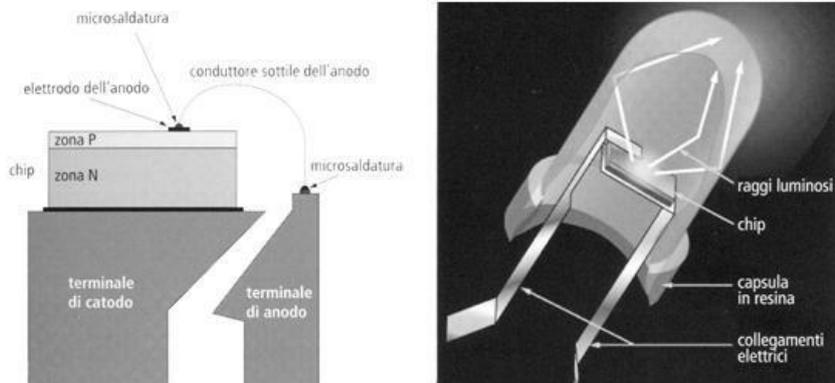


Figura 1.9 : Struttura del LED THT

Esso è caratterizzato da una piccola capsula tonda che ingloba il chip: il LED più comune ha una capsula di diametro pari a 5 millimetri, al suo interno il chip si trova nella regione centrale e intorno ad esso c'è un minuscolo elemento riflettente, un corpo cavo che riflette le radiazioni del chip verso le pareti interne della capsula. La luce viene emessa, riflessa e rifratta attraverso la capsula che lavora come una lente. Il LED del tipo THT si installa in circuiti stampati su base isolante che devono essere forniti di fori per il passaggio degli elettrodi, le cui saldature sono effettuate sulla faccia inferiore della base.

### 1.4.2 LED SMT (Surface Mounted Technology)

Si tratta di component in cui, diversamente dal LED di tipo THT, 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. Si presenta come un minuscolo box con una faccia da cui viene emessa la luce, la faccia opposta o laterale che funge da base di appoggio, mentre le rimanenti facce laterali sono munite di anodo e catodo. Questa forma molto compatta si presta bene per realizzare moduli lineari e strisce luminose. 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. Il LED SMT, inoltre, si presta bene all'accoppiamento con elementi ottici del tipo a guida di luce: si tratta di piccoli condotti realizzati in materiale plastico trasparente che permettono di trasportare il flusso luminoso dal LED fino al punto in cui si vuole che la luce sia visibile. In questo modo la spia luminosa può essere distanziata dal circuito di alimentazione elettrica.

### 1.4.3 Power LED

Con questo termine si indica un diodo che, essendo in grado di trasformare l'energia elettrica con potenza uguale o superiore a 1W in luce e calore, può essere impiegato nell'illuminazione di ambienti interni ed esterni.

La caratteristica principale di questa categoria di LED è quella di avere una gamma di potenze di funzionamento nettamente superiore alle precedenti categorie. I flussi luminosi resi oscillano solitamente tra i 50 e i 300 lumen, in funzione della potenza assorbita.

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

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. I modelli più potenti, che hanno bisogno di dissipare molto calore, hanno installata posteriormente una placca di alluminio, chiamata cooler, che funge essa stessa da elemento di dispersione termica, oppure può essere appoggiata ad un dissipatore di calore.

In figura 1.10 è mostrata la struttura di un Power LED.

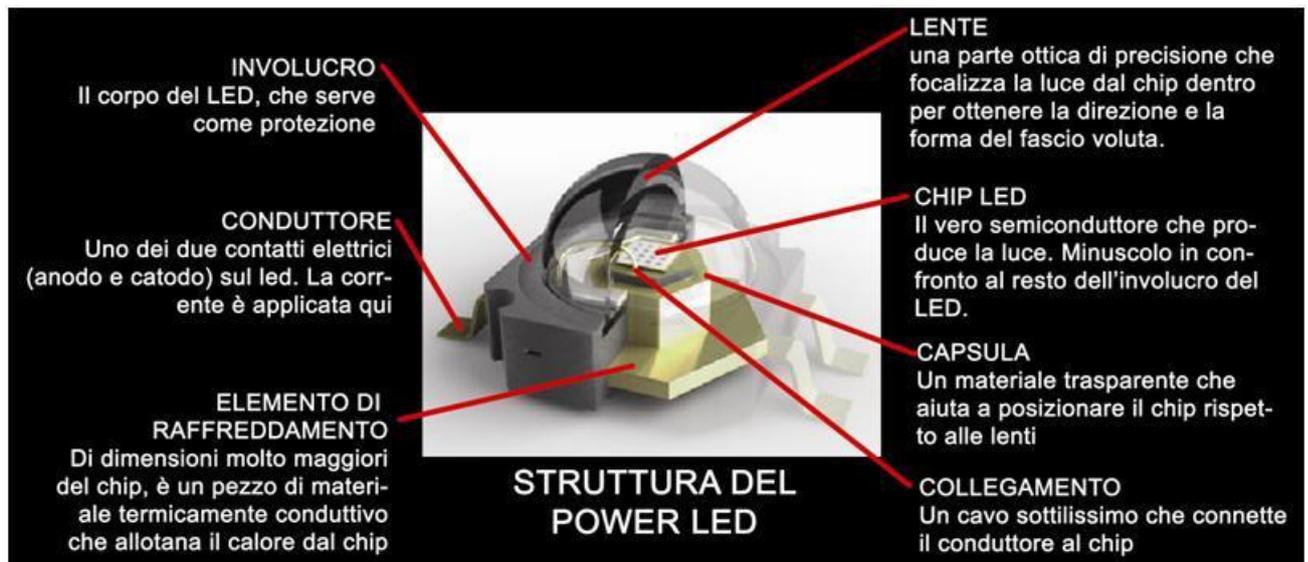


Figura 1.10

Sia i LED SMT che i Power LED sono utilizzati in aggregazione per incrementare il flusso complessivo. Uno o più LED singoli vengono montati su una scheda rigida o flessibile (circuito stampato) con varie disposizioni geometriche: questi sono i cosiddetti moduli LED.

## Capitolo 2

# Qualità e cromaticità della luce

### 2.1 Sensibilità dell'occhio umano

Il destinatario della luce emessa dallo spettro visibile dei LED è l'occhio umano, il quale presenta due tipi di fotorecettori (cellule fotosensibili) : i bastoncelli e i coni. I primi permettono la visione in condizioni di scarsa luminosità e sono molto più sensibili alla luce, mentre i secondi sono sensibili alle forme e ai colori.

Le grandezze radiometriche permettono di caratterizzare la luce in termini di quantità fisiche come, ad esempio, il numero di fotoni, l'energia fotonica, la potenza ottica (chiamata comunemente flusso radiante). Tuttavia, le grandezze radiometriche sono irrilevanti quando si tratta di luce percepita dall'occhio umano. Ad esempio, la radiazione infrarossa non provoca alcuna sensazione luminosa all'occhio.

#### 2.1.1 Grandezze fotometriche

Per caratterizzare la sensazione di luce e colore percepita dall'occhio umano, sono necessarie le grandezze fotometriche:

- **L'intensità luminosa** esprime la concentrazione di luce in una direzione specifica, radiata al secondo. È una grandezza vettoriale di simbolo  $I$  e la sua unità di misura è la candela (cd).  
1 cd è definita come l'intensità luminosa di una sorgente monocromatica con picco a 555 nm che emette con potenza ottica di  $(1/683)$  W in un angolo solido di 1 steradiano.
- Il **flusso luminoso** rappresenta la potenza della luce percepita dall'occhio umano. È una grandezza scalare di simbolo  $\phi$  e la sua unità di misura è il lumen (lm). Una sorgente con intensità luminosa di 1 cd che emette in un angolo di 1 steradiano produce un flusso luminoso di 1 lm.
- L'**illuminamento** è il flusso luminoso incidente per unità di superficie. È una grandezza scalare di simbolo  $E$  e si misura in lux ( $\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$ ). Una superficie pari a  $1 \text{ m}^2$  che riceve un flusso luminoso di 1 lm ha un illuminamento di 1 lux.
- La **luminanza** è definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa in una certa direzione (misurata in cd) e la superficie proiettata in quella direzione (misurata in  $\text{m}^2$ ). La luminanza è quindi misurata in  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Nella maggior parte dei casi, la direzione di interesse è normale alla superficie. È una grandezza vettoriale di simbolo  $I$  ed è indicativa dell'abbagliamento che può indurre una sorgente.

Le unità fotometriche e le corrispondenti unità radiometriche sono riportate nella Tabella 2.1.

Unità fotometriche	Unità di misura	Unità radiometriche	Unità di misura
Intensità luminosa	cd	Intensità radiante	W/sr
Flusso luminoso	lm	Flusso radiante	W
Illuminamento	lux	Irradianza	W/m <sup>2</sup>
Luminanza	cd/m <sup>2</sup>	Radianza	W/ (sr m <sup>2</sup> )

Tabella 2.1

### 2.1.2 I fotorecettori dell'occhio umano e i regimi di visione

(a)

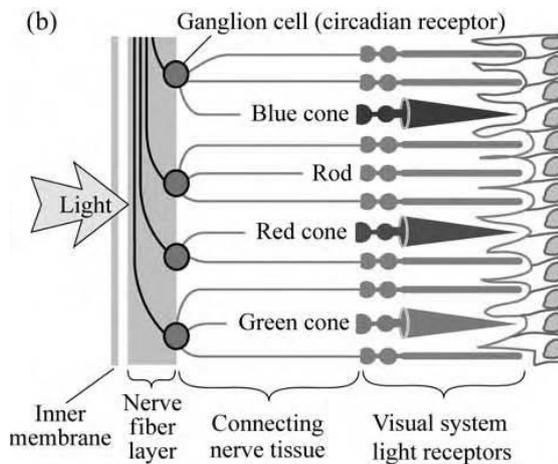
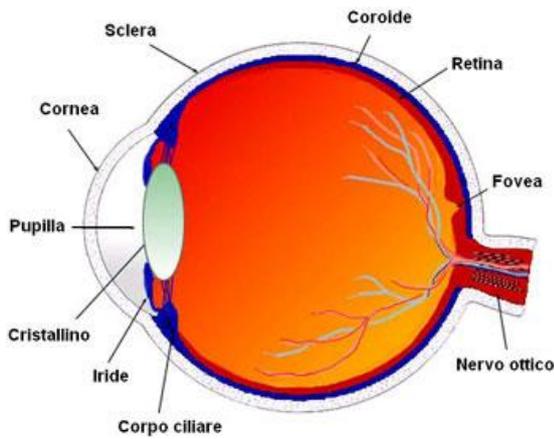


Figura 2.1 : (a) Sezione dell'occhio umano. (b) Vista schematica della retina inclusi i fotorecettori dell'occhio umano.

La figura 2.1 (a) mostra una illustrazione schematica dell'occhio umano : l'interno del bulbo oculare è rivestito dalla retina, che è la parte dell'occhio sensibile alla luce. L'illustrazione mostra anche la fovea che è la regione centrale della retina, ricca di coni e priva di bastoncelli, che permette l'alta acutezza della visione centrale.

La figura 2.1 (b) mostra la struttura cellulare della retina sulla quale si trovano i bastoncelli e i coni. Quest'ultimi si differenziano in tre tipi: quelli sensibili al rosso, al verde e al blu, permettendo, così, di percepire la luce nelle tre bande di colore. Sono indicate anche le cellule gangliari e le fibre nervose che hanno la funzione di trasmettere le informazioni visive al cervello.

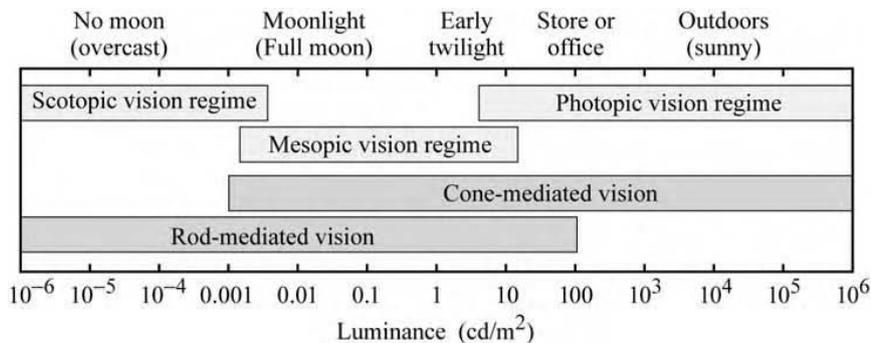
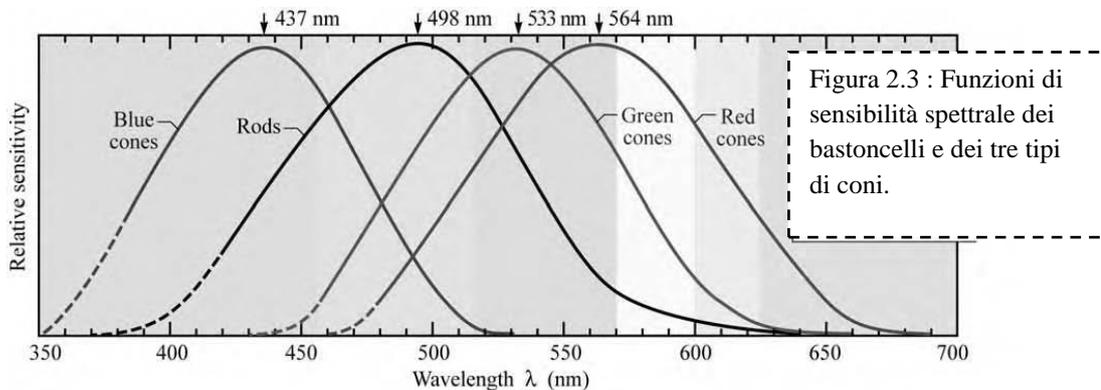


Figura 2.2 : Regimi della visione umana

In figura 2.2 sono mostrati i tre diversi regimi di visione insieme con i recettori propri di ciascun regime:

- La visione fotopica si riferisce alla visione umana ad alti livelli di illuminazione (ad esempio in condizioni di luce diurna), è dovuta ai coni e permette di rilevare differenze cromatiche. Tale regime di applica a livelli di luminanza  $> 3 \text{ cd/m}^2$ .
- La visione scotopica riguarda la visione umana a bassi livelli di luce ambientale (ad esempio di notte), ed è mediata dai bastoncelli. Sebbene i bastoncelli abbiano una sensibilità molto superiore ai coni, in tale regime si perde il senso del colore: a bassi livelli di luce gli oggetti perdono i loro colori e si differenziano solo per diversi livelli di grigio. Il regime di visione scotopica si applica a livelli di luminanza  $< 0.003 \text{ cd/m}^2$ .
- La visione mesopica si ha quando il livello di illuminazione è intermedio tra quelli dei precedenti due regimi ( $0.003 \text{ cd/m}^2 < \text{mesopica luminanza} < 3 \text{ cd/m}^2$ ); è dovuta all'attività contemporanea dei bastoncelli e dei coni e consente di rilevare differenze di colore.



La figura 2.3 mostra le funzioni di sensibilità dei bastoncelli e dei tre tipi di coni. Si nota che la visione notturna (visione scotopica) è più debole nel campo spettrale rosso e più forte nel campo spettrale blu rispetto alla visione diurna (visione fotopica).

### 2.1.3 Funzione di sensibilità dell'occhio

La conversione tra unità radiometriche e fotometriche è fornita dalla funzione di efficienza luminosa o funzione di sensibilità dell'occhio,  $V(\lambda)$ .

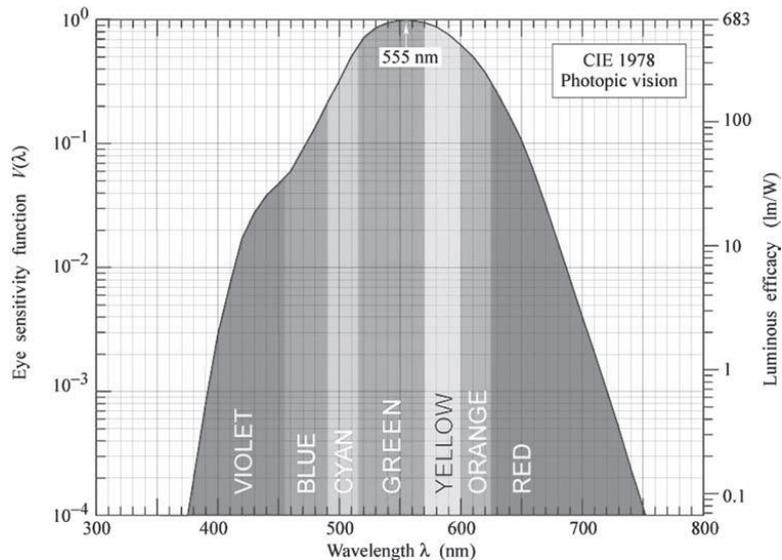


Figura 2.4 : Curva della sensibilità dell’occhio in funzione della lunghezza d’onda

La figura 2.4 rappresenta l’andamento della curva di sensibilità dell’occhio in funzione della lunghezza d’onda in regime di visione fotopica, emanato dal CIE (International Commission on Illumination). L’andamento della curva non è costante ma è approssimativamente a campana e porta a percepire maggiormente colori nella zona centrale come il verde e il giallo, rispetto a colori ai bordi come il viola o il rosso a parità di potenza elettrica. Il picco della curva è, infatti, intorno ai 555 nm nella regione del verde.

Per lunghezze d’onda comprese tra 390 nm e 720 nm, la funzione di sensibilità dell’occhio  $V(\lambda)$  è maggiore di  $10^{-3}$ . Infatti, anche se l’occhio umano è sensibile alla luce con lunghezze d’onda  $<390$  nm e  $>720$  nm, la sensibilità a queste lunghezze d’onda è estremamente bassa. Pertanto, la gamma di lunghezze d’onda  $390 \text{ nm} \leq \lambda \leq 720 \text{ nm}$  può essere considerato il campo di lunghezze d’onda visibili.

La relazione tra colore e lunghezza d’onda nel campo visibile è riportato nella tabella 2.2 : questa relazione è valida per sorgenti luminose monocromatiche o quasi monocromatiche come i LED.

Colore	Lunghezza d’onda (nm)
Ultravioletto	<390
Viola	390 – 455
Blu	455 – 490
Ciano	490 – 515
Verde	515 – 570

Colore	Lunghezza d’onda (nm)
Giallo	570 – 600
Ambra	590 – 600
Arancio	600 – 625
Rosso	625 – 720
Infrarosso	>720

Tabella 2.2

Sebbene il termine luminosità sia usato frequentemente, manca una definizione scientifica standardizzata. L’ utilizzo frequente è dovuta al fatto che il pubblico si relaziona più facilmente con il termine luminosità piuttosto che con i termini fotometrici, quali luminanza

o intensità luminosa. La luminosità è, infatti, un attributo della percezione visiva e viene spesso utilizzato come sinonimo di luminanza.

Nella fotometria standard CIE si assume che la visione umana sia approssimativamente lineare in regime fotopico : una sorgente ad emissione blu e una ad emissione rossa, ciascuna avente lo stesso flusso luminoso, hanno la stessa intensità luminosa.

Tuttavia, se i flussi luminosi delle due sorgenti sono ridotti in modo che si entra in regime mesopico o scotopico, la sorgente blu apparirà più luminosa della sorgente rossa per lo spostamento della funzione di sensibilità dell'occhio a lunghezze d'onda più corte in regime scotopico.

### 2.1.4 Efficacia ed efficienza luminosa

Il flusso luminoso,  $\Phi_{lum}$ , è ottenuto dalla potenza luminosa radiometrica utilizzando l'equazione:

$$\Phi_{lum} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

dove  $P(\lambda)$  è la densità spettrale di potenza, cioè la potenza della luce emessa per unità di lunghezza d'onda. La potenza ottica emessa da una sorgente di luce è data da:

$$P = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda$$

L'**efficacia luminosa** della radiazione ottica (chiamata anche funzione di luminosità), misurata in lm/W, è l'efficienza di conversione da potenza ottica a flusso luminoso. Essa è definita:

$$\text{Efficacia luminosa} = \frac{\Phi_{lum}}{P}$$

Per sorgenti luminose monocromatiche l'efficacia luminosa è pari alla funzione di sensibilità dell'occhio  $V(\lambda)$  moltiplicata per 683 lm / W. Tuttavia, per le sorgenti di luce multicolore e soprattutto per le fonti di luce bianca, l'efficacia luminosa deve essere calcolata per integrazione su tutte le lunghezze d'onda.

L'**efficienza luminosa** di una sorgente di luce, misurata in lm/W, è il flusso luminoso di una sorgente di luce diviso per la potenza elettrica d'ingresso del dispositivo:

$$\text{Efficienza luminosa} = \frac{\Phi_{lum}}{IV}$$

Per le sorgenti luminose con una perfetta conversione da potenza elettrica a potenza ottica, l'efficienza di una sorgente luminosa è uguale all'efficacia luminosa della radiazione.

Alcune strutture LED raggiungono un'eccellente efficienza di potenza utilizzando piccole aree ad emissione di luce, tuttavia, tali dispositivi hanno bassa luminanza perché solo una piccola parte dell'area del chip viene attraversata da corrente.

## 2.2 La colorimetria

La disciplina che si occupa della valutazione e della quantificazione del colore è la colorimetria, o "scienza del colore". La colorimetria è strettamente associata con la visione umana del colore.

Il senso visivo è molto diverso dal senso di sentire: se sentiamo due frequenze simultaneamente, ad esempio due frequenze generate da uno strumento musicale, saremo in grado di riconoscere le due frequenze diverse. Questo non avviene per i segnali ottici: mescolando due segnali ottici monocromatici ci apparirà come un unico colore e non siamo in grado di riconoscere la composizione dicromatica originale di tale colore.

### 2.2.1 Funzioni di color-matching

La luce causa differenti livelli di eccitazione dei coni rosso, verde e blu. Tuttavia, la sensazione di colore e il flusso luminoso sono percepiti in maniera diversa, in quanto la sensazione di colore è una quantità soggettiva che non può essere misurata oggettivamente, non è una caratteristica propria di un oggetto. Per questo motivo la CIE (International Commission for Illumination) ha standardizzato la misura del colore usando le funzioni di color – matching e il diagramma cromatico.

Tali funzioni sono state ricavate con un esperimento tramite l'uso di due luci poste una affianco all'altra: una monocromatica e l'altra ottenuta dalla miscela di tre luci primarie con colore rosso ( $\lambda=700$  nm), verde ( $\lambda=546$  nm) e blu ( $\lambda=436$  nm), che corrispondono alla sensibilità dei tre coni della retina, come mostrato in fig. 2.5.

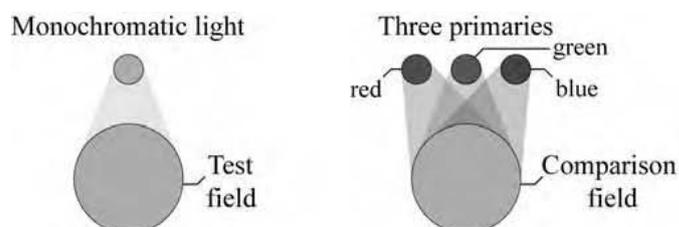


Figura 2.5

La luce monocromatica (colore di test) è stata fatta variare nello spettro elettromagnetico da 380 a 780 nm con incrementi di 5 nm; diversi soggetti umani sono stati in grado di rendere l'altra luce identica al colore di test, regolando le relative intensità della luce rossa, verde e blu e per ogni soggetto sono stati registrati i parametri ottenuti.

Lo stesso esperimento si può fare combinando altre lunghezze d'onda, ovvero altri colori, tuttavia, nel lavoro della CIE furono scelti questi primari in quanto sono quelli a cui le cellule della retina umana sono particolarmente sensibili.

La media delle intensità dei tre fasci regolati dagli osservatori al variare della lunghezza d'onda del colore di test, costituivano delle funzioni tabulate dette funzioni RGB di color matching. Tali funzioni sono riportate in figura 2.6: per ogni lunghezza d'onda in ascissa, i

valori delle tre funzioni rappresentano l'intensità necessaria per ciascuno dei tre primari al fine di ottenere il colore di test in ascissa. Si può notare come le curve, a due a due, passino per l'ascissa nello stesso punto che corrisponde alla lunghezza d'onda relativa all'altra curva: rosso e verde si annullano sui 436 nm corrispondenti al blu, rosso e blu si annullano sui 546 nm corrispondenti al verde, e verde e blu si annullano sui 700 nm corrispondenti al rosso. Non poteva essere diversamente: ad esempio, perché l'osservatore potesse uguagliare il rosso sui 700 nm, non poteva fare altro che annullare l'intensità di verde e blu e regolare opportunamente quella del rosso (discorso analogo per gli altri colori). La parte negativa della curva del rosso è dovuta al fatto che in certi casi il colore di test doveva essere corretto con l'aggiunta di rosso perché l'osservatore potesse trovare una corrispondenza: in questi casi era come se il rosso aggiunto al colore di test venisse sottratto dal colore controllato dall'osservatore.

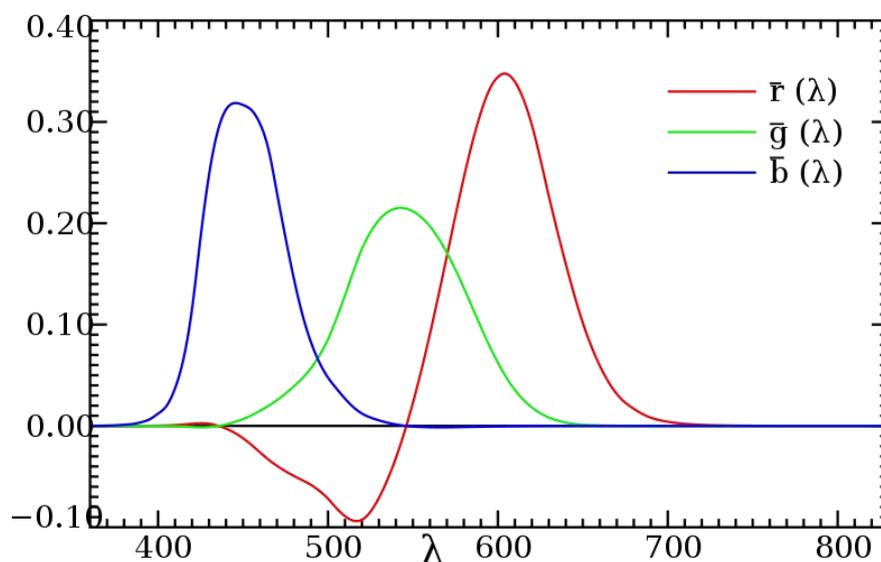


Figura 2.6 : Le funzioni di colore RGB CIE 1931

Si può dire che qualunque colore dello spettro del visibile può essere riprodotto, per quel che riguarda la percezione umana, sommando tre colori primari fissati con opportune intensità. Quindi ogni colore percepibile può essere rappresentato da tre coordinate, che sono proprio le intensità dei tre colori primari.

La CIE preferì non utilizzare direttamente queste funzioni per definire un concetto standard di colore. Con opportune trasformazioni lineari delle funzioni RGB si ottennero le cosiddette funzioni di color matching XYZ riportate in figura 2.7. Innanzitutto, esse sono tutte non-negative, inoltre, anche se questo non si può intuire dal grafico, la funzione  $\bar{y}(\lambda)$  (il verde) coincide sostanzialmente con l'intensità luminosa percepita, la funzione di sensibilità dell'occhio,  $V(\lambda)$ .

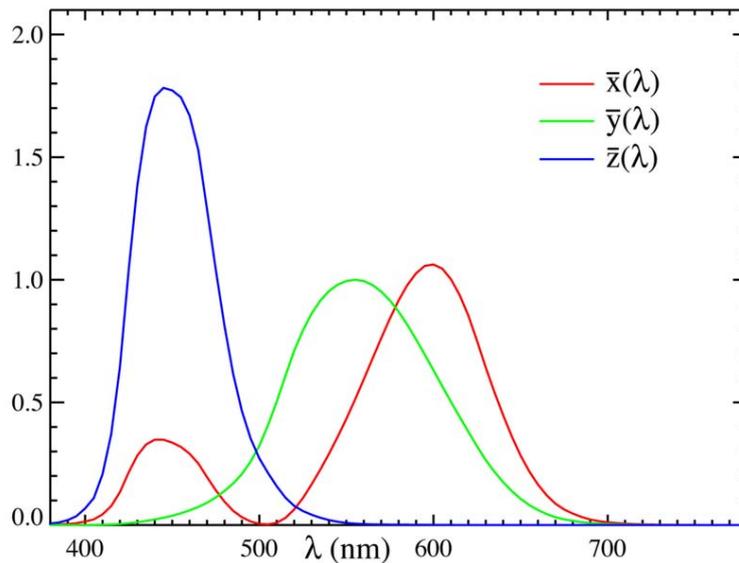


Figura 2.7 : Le funzioni di colore XYZ CIE 1931

Nota la densità spettrale di potenza  $P(\lambda)$ , i livelli di stimolo ai tre colori sono dati da:

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

dove X, Y e Z sono i valori tristimolo .

Le coordinate cromatiche x e y sono calcolabili dai valori tristimolo tramite le relazioni:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad \text{e} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

Il valore della coordinata cromatica z si può calcolare analogamente e può essere ottenuto

dalle altre due coordinate:  $z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y$

La coordinata z è quindi ridondante e quindi non è necessario usarla.

### 2.2.2 Il diagramma di cromaticità

Il diagramma di cromaticità (x,y) è mostrato in figura 2.8. I colori intorno al rosso e al verde si ottengono per grandi valori di x e y rispettivamente, mentre i colori intorno al blu si ottengono per grandi valori di z, ovvero per piccoli valori di x e y, o vicino all'origine del diagramma di cromaticità.

I colori monocromatici o puri sono localizzati sul perimetro del diagramma, mentre il colore bianco, ottenuto dalla mescolanza di più colori, è localizzato nel centro del diagramma.

In particolare il punto di uguale energia si trova nel centro del diagramma in corrispondenza alle coordinate  $(x, y, z) = (1/3, 1/3, 1/3)$  ed è chiamato “illuminante CIE” : corrisponde alla radiazione emessa da una superficie bianca illuminata da luce diurna media.

Tutte le possibili cromaticità comprese nella regione del visibile cadono all'interno del diagramma oppure sul suo confine.

Miscelando dei primari non reali può succedere di arrivare a colori che sono anch'essi immaginari, cioè non effettivamente visibili dall'occhio umano. Questi non sono altro che i punti esterni al diagramma di cromaticità, e non hanno alcun interesse pratico. E' per questo motivo che il diagramma CIE viene normalmente presentato senza mostrare il triangolo intero, lasciando fuori gli stessi vertici, che sono i primari immaginari.

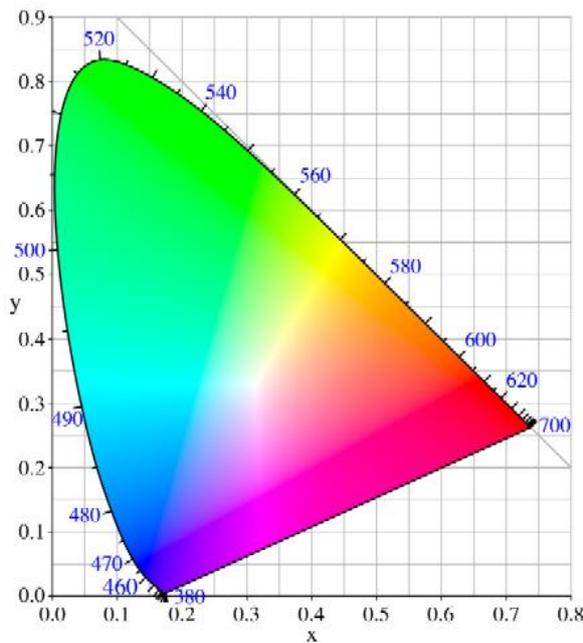


Figura 2.8 : Diagramma di cromaticità CIE 1931

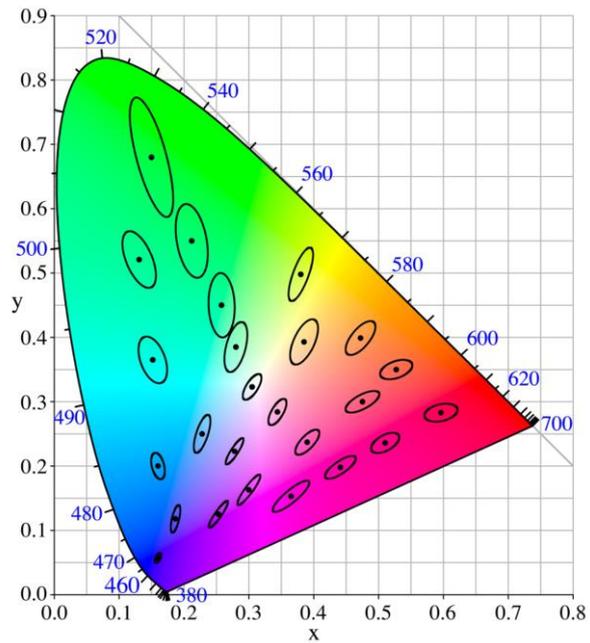


Figura 2.9 : Ellissi di MacAdam

MacAdam ha analizzato le differenze di colore tra punti ravvicinati nel diagramma di cromaticità e ha trovato che due punti di cromaticità devono avere una minima distanza geometrica per produrre una differenza nel colore percettibile. I colori all'interno di una certa piccola regione del diagramma di cromaticità sembrano identici ai soggetti umani. MacAdam ha mostrato che queste regioni hanno la forma di una ellissi. Tali ellissi, ora note come le **ellissi di MacAdam**, sono mostrate in figura 2.9.

Si parla di lunghezza d'onda dominante quando la radiazione è monocromatica. Essa si determina tracciando una linea dal punto di uguale energia al punto di coordinate cromatiche (x,y) della sorgente di luce considerata e prolungando questa linea fino al perimetro del diagramma di cromaticità. La procedura è schematizzata in figura 2.10.

La **purezza del colore**, o saturazione del colore, della sorgente di luce considerata è data da:

$$\text{color purity} = \frac{a}{a+b} = \frac{\sqrt{(x-x_{ee})^2 + (y-y_{ee})^2}}{\sqrt{(x_d-x_{ee})^2 + (y_d-y_{ee})^2}}$$

dove a e b sono mostrati in figura 2.10 e  $(x,y)$ ,  $(x_{ee},y_{ee})$  e  $(x_d,y_d)$  rappresentano le coordinate cromatiche della sorgente di luce considerata, del punto di uguale energia e del punto a lunghezza d'onda dominante, rispettivamente.

Generalmente, la purezza di un colore è 100% per le sorgenti di luce monocromatiche localizzate sul perimetro del diagramma e vicino allo 0% per la luce bianca.

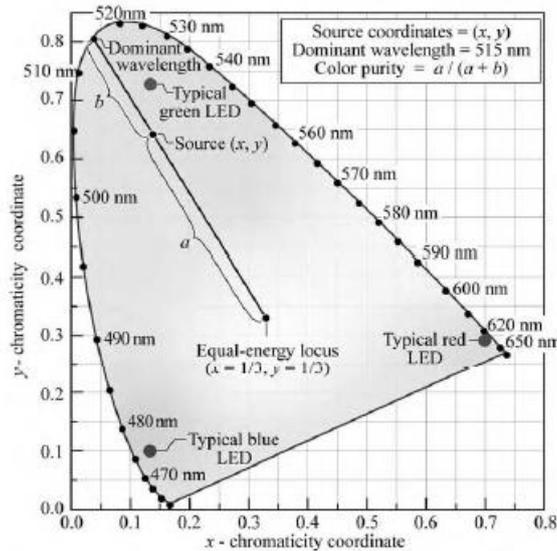


Figura 2.10

La luce emessa dai LED è monocromatica per l'occhio, ma i LED non sono esattamente monocromatici, infatti non sono situati sul perimetro del diagramma di cromaticità, ma si trovano in prossimità del perimetro. Le posizioni dei diversi LED nel diagramma di cromaticità sono mostrate in figura 2.11. Si nota che il rosso e il blu sono posizionati sul perimetro del diagramma: ciò significa che la loro purezza di colore è molto alta, vicino al 100%. Invece la posizione dei LED verde e blu-verde è spostata dal perimetro.

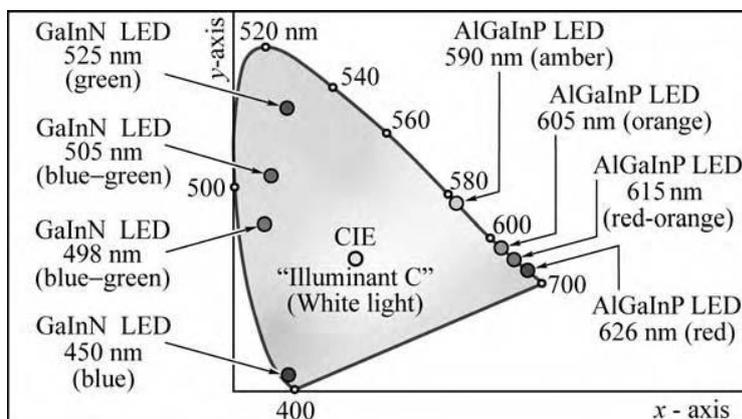


Figura 2.11 : Posizione della luce emessa dai LED nel diagramma di cromaticità

## 2.3 Temperatura di colore

Nella parte centrale del diagramma di cromaticità c'è il bianco, che può assumere diversi livelli a seconda dell'intensità degli altri colori del diagramma che, mescolandosi tra loro, determinano la sua formazione.

Per individuare i livelli di bianco si utilizza il concetto di temperatura di colore, il quale è definito sulla base dello spettro di emissione del corpo nero (radiatore di Planck) : esso è, infatti, caratterizzato da un solo parametro, quale la temperatura del corpo.

La figura 2.12 riporta l'intensità della radiazione di un corpo nero in funzione della lunghezza d'onda per diverse temperature.

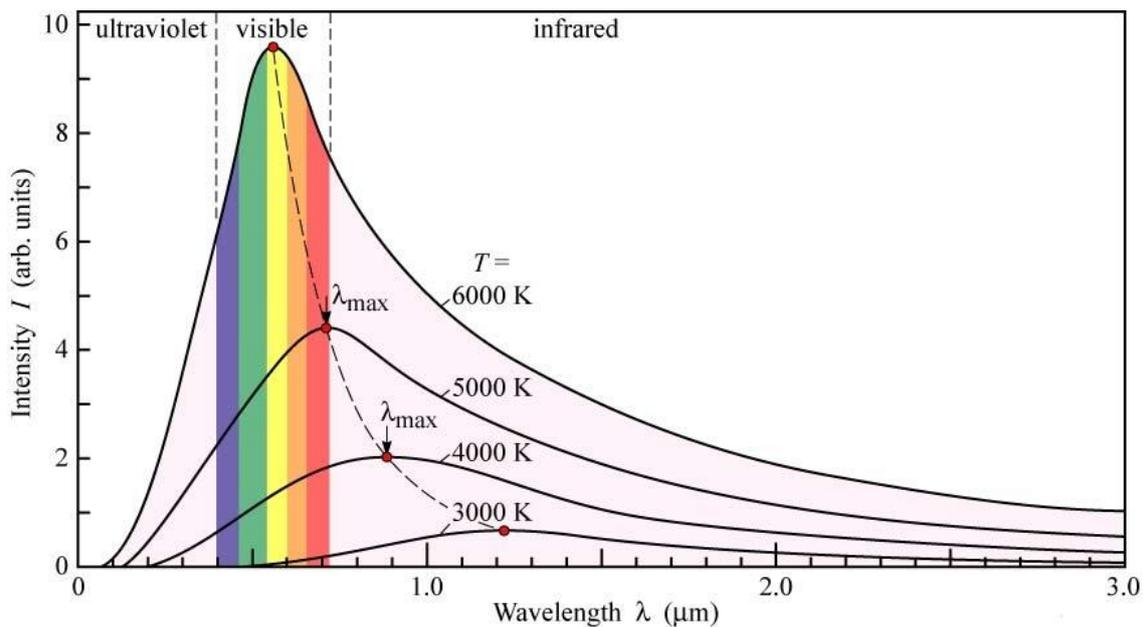


Figura 2.12 : Spettro del corpo nero

La massima intensità della radiazione corrisponde ad una specifica lunghezza d'onda data dalla legge di Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{2880 \mu\text{m K}}{T}$$

A basse temperature, intorno ai 3000K, la radiazione si verifica soprattutto nell'infrarosso, mentre, all'aumentare della temperatura, il massimo della radiazione si sposta nel campo del visibile.

La corrispondenza tra temperatura del corpo nero e cromaticità della luce è rappresentata nel diagramma di cromaticità in figura 2.13 attraverso la curva detta **luogo planckiano**. All'aumentare della temperatura del corpo nero, esso diventa rosso, arancio, bianco giallastro, bianco, e, infine, bianco bluastrò.

Temperature tipiche del corpo nero nella regione del bianco del diagramma di cromaticità variano tra 2500 K e 10000 K.

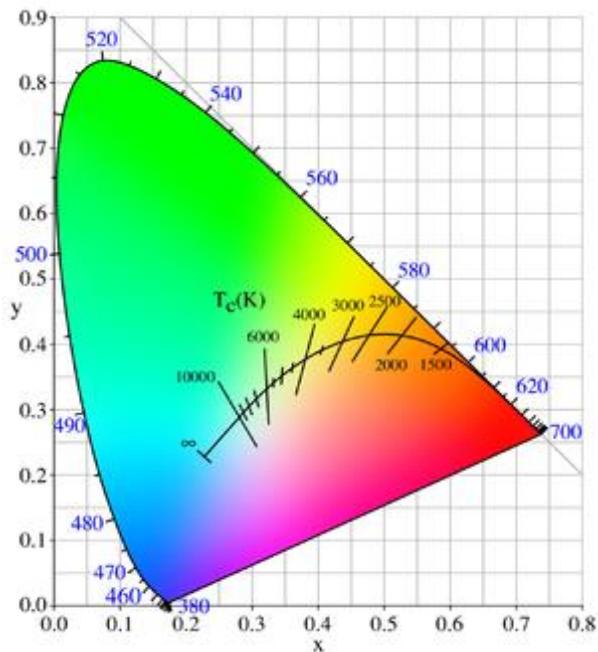


Figura 2.13 : Luogo planckiano

La **Temperatura di Colore (CT)** di una radiazione luminosa è definita come la temperatura assoluta di un corpo nero che emette radiazione visibile di colore uguale alla luce emessa dalla sorgente.

Se il colore della sorgente in esame non cade su tale curva si utilizza un altro parametro, la **Temperatura Correlata di Colore (CCT)** definita come la temperatura del corpo nero il cui colore più si avvicina a quello della sorgente in esame.

Entrambi questi due parametri sono espressi in Kelvin.

La luce emessa da una candela misura circa 1000 gradi Kelvin, la luce del sole a mezzodì in una giornata serena 5000K, nel tardo pomeriggio 3000K, tra i 6000K e gli 8000K in una giornata nuvolosa.

Noi non ci facciamo molto caso, poiché il nostro cervello si adatta immediatamente a questi cambiamenti, ma in realtà gli oggetti intorno a noi, nell'arco della giornata, variano la tonalità del proprio colore percepito.

Secondo la scala Kelvin, più è alto il numero, più la luce tende al blu (luce fredda); più è basso il numero, più la luce tende al rosso (luce calda).

In generale, secondo la Norma UNI 12464 si parla di:

- Bianco Caldo se CCT < 3300k
- Bianco Neutro se 3300k < CCT < 5300k
- Bianco Freddo se CCT > 5300k

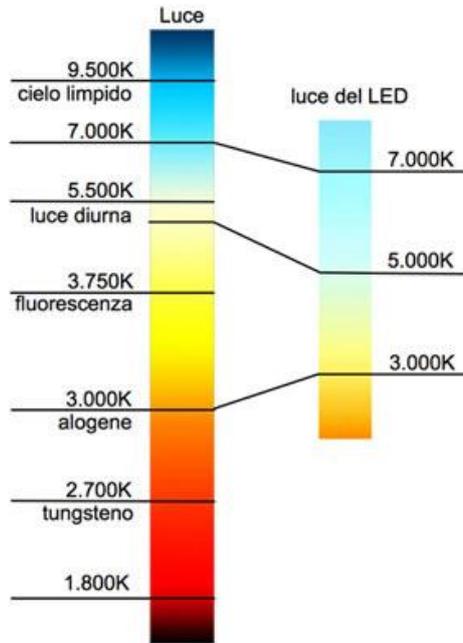


Figura 2.14 : La luce a diverse temperature di colore

Di norma i LED a luce fredda hanno un'efficienza luminosa maggiore dei LED a luce calda. La luce dei LED è oggi a forte componente blu, infatti il picco di emissione si attesta attorno a 460 nm, come mostra la figura 2.15.

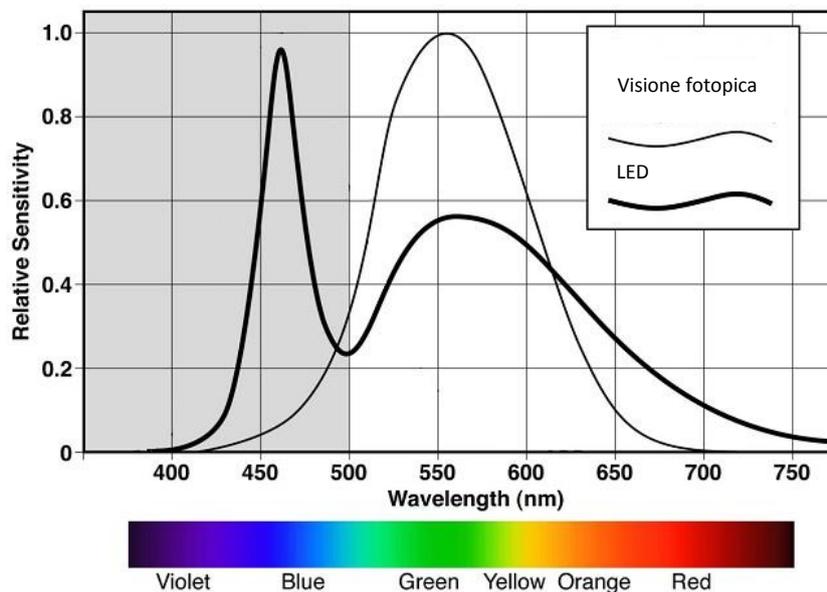


Figura 2.15

Questo valore è ben lontano rispetto alla curva tipica della visione fotopica che ha picco attorno a 550 nm. Questa forte emissione nel blu si manifesta con una luce estremamente fredda e di conseguenza le temperature di colore sono molto elevate, da 4000-5000-6000 K fino a 7000 K.

Usando LED con temperature di colore inferiore il picco si riduce ed aumenta la componente secondaria ben più vicina e compatibile con la visione fotopica ed una maggior gradevolezza della luce, ma questa componente secondaria diventa sufficientemente importante solo quando si scende a temperature di colore inferiori a 3500 K, come si vede in figura 2.16.

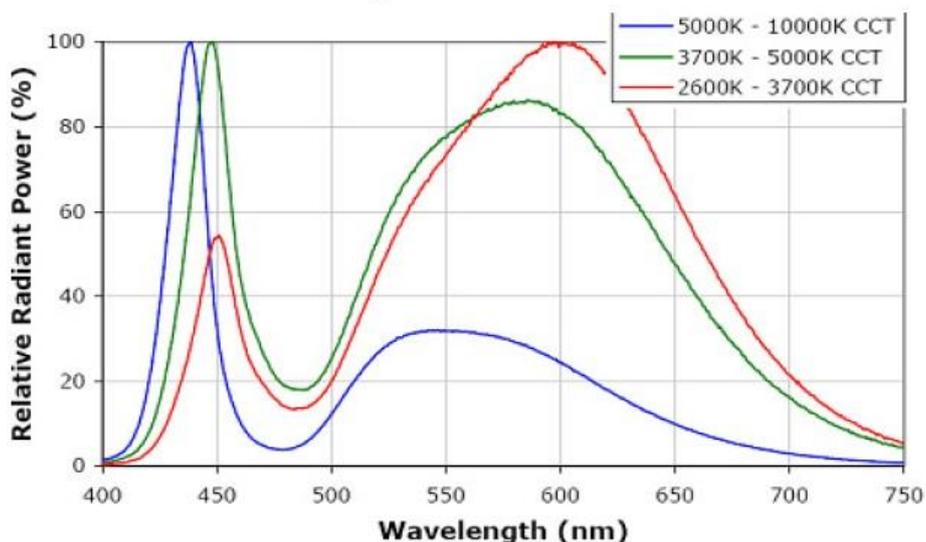


Figura 2.16

Oggi i più diffusi e noti LED in commercio hanno temperature di colore superiore a 3500 K. Solo da poco iniziano a essere commercializzati LED più caldi e gradevoli con temperature di colore da 3000-3500 K massimo.

## 2.4 Resa cromatica

Un aspetto importante nella qualità della luce è la resa cromatica che è la capacità di una sorgente a luce bianca di mostrare i veri colori degli oggetti illuminati. Essa viene misurata, in una scala da 1 a 100, tramite l'**indice di resa cromatica, CRI** ( Color - Rendering Index): i colori appaiono più realistici quanto più la sorgente di luce è caratterizzata da un CRI elevato. Un'alta resa cromatica è importante in luoghi come i musei, le case, gli uffici, invece è meno importante, ad esempio, nelle strade, mentre è irrilevante nei semafori o in altre applicazioni di segnaletica.

Per valutare l'indice di resa cromatica di una sorgente luminosa, chiamata sorgente di prova, avente una certa temperatura di colore, si prende come riferimento la radiazione emessa da un corpo nero, chiamata sorgente campione, avente la stessa temperatura di colore. Tale indice misura la differenza tra come appaiono cromaticamente gli oggetti quando sono illuminati dall'una e dall'altra sorgente: la sorgente di luce di riferimento ha CRI=100, quindi minore è tale differenza, migliore è la resa cromatica della sorgente e, quindi, maggiore è il valore dell'indice.

Si prendono otto piastrine di colori standard scelti dalla CIE e le si illuminano sia con la sorgente campione, sia con la sorgente in esame. È così possibile realizzare dei diagrammi nei quali ad ogni colore corrisponde un punto le cui coordinate sono uguali alle coordinate cromatiche del colore in questione.

Quindi, dopo avere illuminato le otto piastrine, si tracciano sul diagramma sia gli otto punti corrispondenti alle cromaticità delle piastrine illuminate con la sorgente campione, sia gli otto punti corrispondenti alle cromaticità delle piastrine illuminate con la sorgente in esame, ottenendo, complessivamente, otto coppie di punti.

Si calcola la distanza che intercorre tra i due punti di ciascuna coppia, ottenendo, complessivamente, otto valori, indicati con  $\Delta E_i^*$ .

Si calcolano, ora, gli indici di resa cromatica degli otto colori standard:

$$CRI_i = 100 - 4.6\Delta E_i^*$$

dove il fattore 4.6 deriva dalla calibratura operata utilizzando come lampada di riferimento una fluorescente standard con indice di resa cromatica posto uguale a 50.

L'indice di resa cromatica generale è dato dalla media aritmetica:

$$CRI = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 CRI_i$$

Evidentemente, se la cromaticità delle piastrine non muta passando dalla sorgente campione a quella in esame, tutte le otto distanze sono nulle e l'indice di resa cromatica è pari al 100%.

È possibile perfezionare il calcolo dell'indice di resa cromatica, aggiungendo altre sei piastrine di colori standard CIE, per un totale di quattordici piastrine, ed utilizzando diagrammi più complessi.

La norma UNI 10380 suddivide l'insieme dei possibili valori dell'indice di resa cromatica in cinque gruppi:

- **1A** :  $CRI \geq 90\%$
- **1B**:  $80\% \leq CRI < 90\%$
- **2**:  $60\% \leq CRI < 80\%$
- **3**:  $40\% \leq CRI < 60\%$
- **4**:  $20\% \leq CRI < 40\%$

Inoltre, la norma fornisce anche qualche indicazione su quale CRI utilizzare a seconda degli ambienti da illuminare:

- **1A**: abitazioni, musei, studi grafici, ospedali, studi medici, ecc.
- **1B**: uffici, scuole, negozi, palestre, teatri, industrie tessili e dei colori, ecc.
- **2**: locali di passaggio, corridoi, scale ascensori, palestre, aree servizio, ecc.
- **3**: interni industriali, officine, magazzini depositi, ecc.
- **4**: parcheggi, banchine, cantieri, scavi, aree di carico e scarico, ecc.

Una lampada ad incandescenza tradizionale presenta un valore di CRI molto vicino a 100, una lampadina a basso consumo fluorescente presenta valori intorno ai 70, mentre i moderni LED hanno valori che si posizionano tra 80/90. Tuttavia, di norma, una fonte LED con un CRI molto alto non ha la migliore efficienza luminosa.

## Capitolo 3

# Sorgenti LED a luce bianca

Nel primo capitolo sono stati analizzati i LED come emettitori di luce monocromatica. Nell'illuminazione di ambienti, quali ad esempio case e uffici è necessaria la luce bianca, tuttavia, non esistono LED che emettono direttamente nello spettro del bianco. Come è stato preannunciato nel secondo capitolo, la luce bianca, con le sue diverse tonalità, si può ottenere dalla mescolanza di più radiazioni. Essa, infatti, viene percepita tale dall'occhio umano se i tre tipi di coni posizionati sulla retina vengono eccitati con intensità simile.

In questo capitolo verranno analizzate le due tecniche principali utilizzate per ottenere luce bianca: la prima si basa sull'uso di più LED monocromatici, mentre la seconda si basa sull'uso di materiali detti convertitori di lunghezze d'onda quali, principalmente, fosfori gialli e colorati.

### 3.1 Generazione di luce bianca per sintesi additiva

La luce bianca può essere generata tramite la cosiddetta **sintesi additiva dei colori** la quale prevede l'uso di LED con approcci bicromatici, tricromatici, tetracromatici, come mostrato in figura 3.1, o con approcci a maggiore cromaticità.

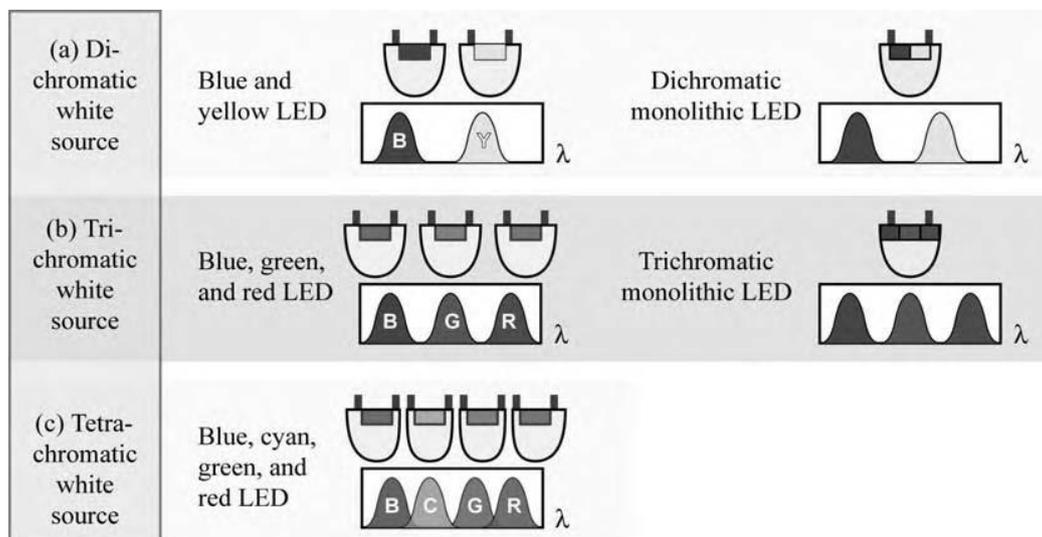


Figura 3.1 : Generazione di luce bianca tramite l'uso di LED

Il vantaggio di questa tecnica consiste nel fatto che è possibile cambiare il colore della luce mediante un controllo specifico di ciascuna lunghezza d'onda. Si può così produrre luce bianca di varie tonalità e luce colorata secondo necessità.

Le sorgenti luminose possono essere classificate in termini di efficacia luminosa della radiazione, efficienza luminosa e resa di colore.

Considerando che l'elevata efficacia luminosa e l'alta efficienza luminosa sono sempre auspicabili proprietà delle sorgenti di luce ad alta potenza, la resa di colore dipende fortemente dall'applicazione. Come già detto nel capitolo due, una resa di colore elevata è necessaria nell'illuminazione di musei, case, uffici e negozi, mentre è meno importante, ad esempio, nell'illuminazione di strade, parcheggi, e vani scale. Infine, è irrilevante in applicazioni di segnaletica.

C'è un fondamentale trade-off tra efficacia luminosa della radiazione e capacità di resa di colore di una sorgente di luce. Generalmente, la luce bianca bicromatica ha la massima efficacia luminosa e una bassa resa di colore. Una sorgente bianca tricromatica può avere una resa di colore molto buona ( $CRI > 80$ ) e un'efficacia luminosa maggiore di  $300 \text{ lm} / \text{W}$ . Infine, sorgenti tetracromatiche possono avere un indice di resa cromatica superiore a 90.

### 3.1.1 Sorgenti a luce bianca bicromatiche

Un primo modo per generare luce bianca è tramite l'uso di due strette bande di emissione, chiamate **lunghezze d'onda complementari** o colori complementari, combinate con un certo rapporto di intensità.

Le lunghezze d'onda di colori complementari sono mostrate in figura 3.2 e i corrispondenti valori numerici di tali lunghezze d'onda sono riportati in tabella 3.1.

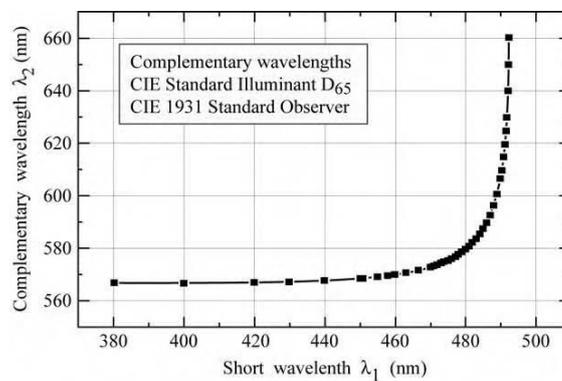


Figura 3.2 : Lunghezze d'onda di colori complementari monocromatici

Lunghezze d'onda complementari	
$\lambda_1$ (nm)	$\lambda_2$ (nm)
380	560.9
390	560.9
400	561.1
410	561.3
420	561.7
430	562.2
440	562.9
450	564.0

Lunghezze d'onda complementari	
$\lambda_1$ (nm)	$\lambda_2$ (nm)
460	565.9
470	570.4
475	575.5
480	584.6
482	591.1
484	602.1
485	611.3
486	629.6

Tabella 3.1 : Valori di lunghezze d'onda complementari

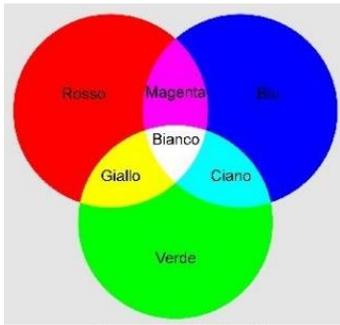


Figura 3.3 : Mescolanza additiva di colori

La figura 3.3 mostra come ottenere i colori complementari (magenta complementare al verde, giallo complementare al blu e ciano complementare al rosso) mescolando a due a due i cosiddetti colori primari (rosso, blu e verde). Inoltre, mette in evidenza come il colore bianco si possa ottenere dalla mescolanza di due colori complementari, come mostrato in questo paragrafo, o dalla mescolanza dei tre colori primari, fatto che verrà presentato nel prossimo paragrafo.

Le due sorgenti monocromatiche di LED utilizzate principalmente sono quella emettente nel blu e quella emettente nel giallo.

La massima efficacia luminosa della radiazione emessa combinando due colori complementari è stata calcolata da MacAdam (1950) il quale mostrò che essa supera i 400 lm/W. Il suo lavoro fu successivamente perfezionato da Ivey (1963) e Thornton (1971) i quali dimostrarono che sorgenti dicromatiche a luce bianca hanno una elevata efficacia luminosa ma una bassa resa di colore, rendendole adatte per l'illuminazione di display ma non per l'illuminazione di ambienti.

### 3.1.2 Sorgenti a luce bianca tricromatiche

La luce bianca di alta qualità adatta per applicazioni di illuminazione può essere generata dalla miscelazione dei tre colori primari o di più di tre colori. Thornton (1971) ha mostrato che la miscelazione di bande di emissione discrete con il picco di lunghezza d'onda vicino a 450 nm, 540 nm e 610 nm determina una sorgente di alta qualità. Thornton, inoltre, ha anche affermato che, per avere luce di alta qualità, si deve evitare l'uso di emettitori vicino a 500 nm e 580 nm.

Lo spettro di emissione tricromatico di una sorgente di luce bianca realizzata usando tre tipi di LED che emettono a 455 nm, 525 nm e 605 nm è mostrato in figura 3.4.

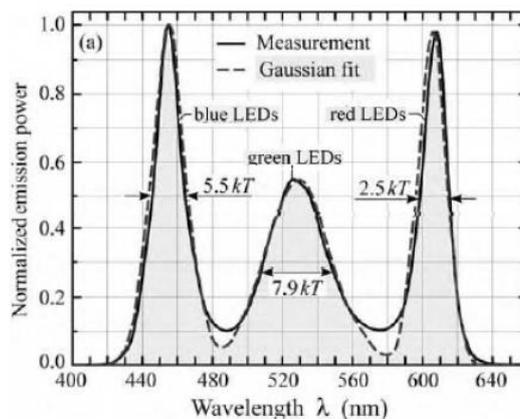


Figura 3.4 : Spettro di emissione tricromatico di una sorgente a luce bianca

Le intensità dell'emettitore blu, verde e rosso sono regolate per corrispondere alla cromaticità di un radiatore di Planck con temperatura di colore pari a 6500 K. La sorgente LED ha una efficacia luminosa di radiazione di 319 lm / W, una efficienza luminoso di 32 lm / W e un indice di resa cromatica di 84.

Ci sono un gran numero di possibili combinazioni delle lunghezze d'onda per sorgenti tricromatiche. Per raggiungere una elevata efficacia di radiazione, le lunghezze d'onda vicine ai margini dello spettro visibile (rosso scuro e viola) devono essere evitate.

In figura 3.5 sono riportati i diagrammi che indicano l'efficacia luminosa di radiazione e l'indice di resa cromatica di un LED tricromatico in funzione delle tre lunghezze d'onda, con temperatura di colore di 6500 K.

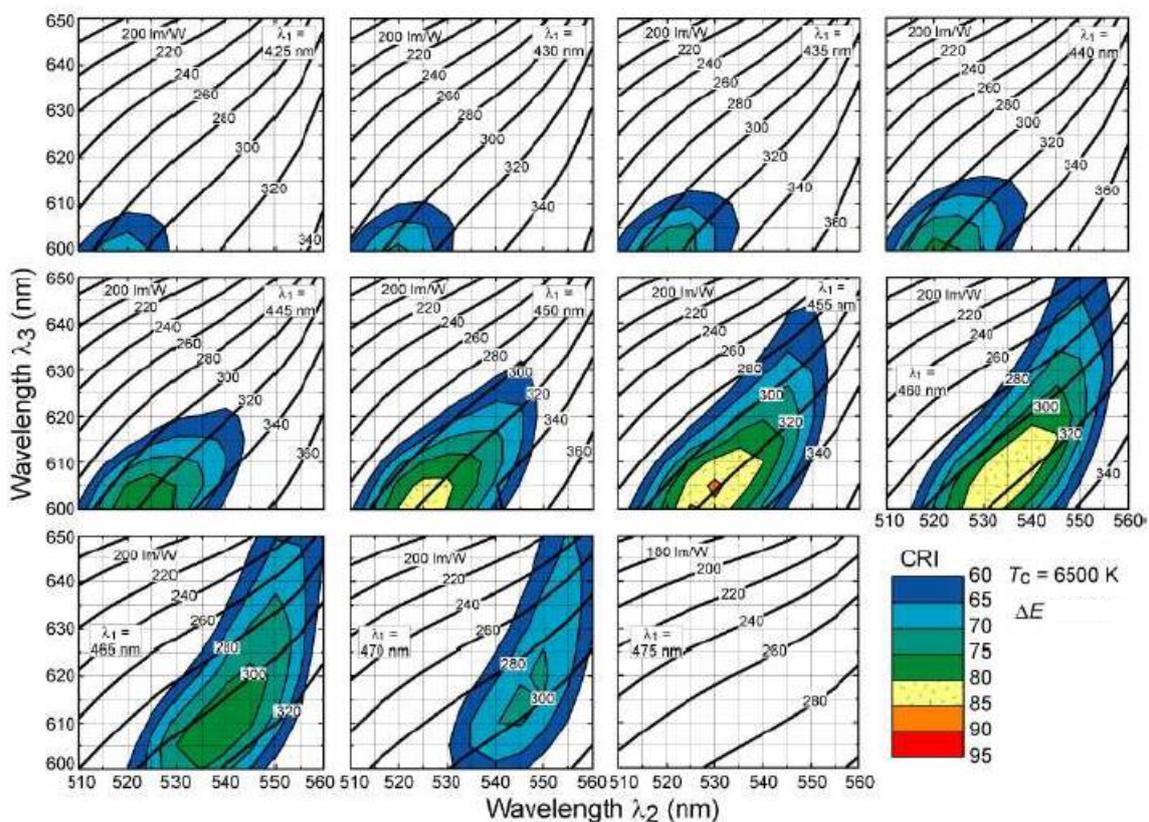


Figura 3.5 : diagrammi dell'efficacia luminosa di radiazione e dell'indice CRI di una sorgente tricromatica.

La figura mostra che per  $\lambda_1 = 455 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$  e  $\lambda_3 = 605 \text{ nm}$  si ha una elevata resa cromatica (CRI = 90) e una efficacia luminosa di radiazione pari a 320 lm / W.

La figura rivela anche che l'indice CRI dipende molto dalla posizione del picco della lunghezza d'onda. Ad esempio, lo spostamento del picco di lunghezza d'onda rossa da 605 nm a 620 nm causa la diminuzione dell'indice CRI da 85 a 65. Analogamente, cambiando la lunghezza d'onda verde da 530 nm a 550 nm il CRI diminuisce a valori inferiori a 60.

La potenza di emissione (P), la lunghezza d'onda di picco ( $\lambda_{peak}$ ), e la larghezza spettrale ( $\Delta\lambda$ ) dipendono dalla temperatura di giunzione, ciascuna attraverso un coefficiente di temperatura diverso.

La potenza di uscita ottica dei LED dipende dalla temperatura secondo una funzione esponenziale, fissata una temperatura caratteristica,  $T_1$ :

$$P = P|_{300K} \exp \frac{T - 300K}{T_1}$$

A causa di queste dipendenze dalla temperatura, il punto di cromaticità di una sorgente multi-LED a luce bianca cambia con la temperatura.

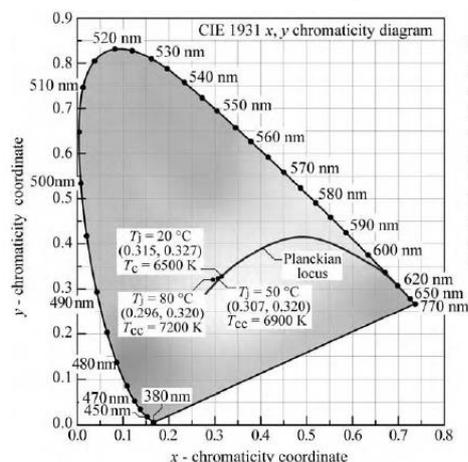
Si consideri una sorgente di luce bianca dovuta a tre tipi di emettitori che emettono nel rosso, nel verde e nel blu. Per tali LED, i coefficienti di temperatura della lunghezza d'onda di picco, della larghezza spettrale e della potenza di emissione sono stati misurati e sono riportati nella tabella 3.2.

	Blu	Verde	Rosso
$d\lambda_{picco} / dT$	0.0389 nm/°C	0.0308 nm/°C	0.156 nm/°C
$d\Delta\lambda / dT$	0.0466 nm/°C	0.0625 nm/°C	0.181 nm/°C
$T_1$	493 K	379 K	209 K

Tabella 3.2

Si consideri, inoltre, che, a una temperatura del dispositivo pari a 20 °C, le tre correnti che alimentano i LED rosso, verde e blu siano regolate in modo da individuare un punto del diagramma con  $T_c = 6500$  K.

All'aumentare della temperatura del dispositivo il punto di cromaticità della sorgente tricromatica cambia a causa della dipendenza dalla temperatura della potenza di emissione, della lunghezza d'onda di picco e della larghezza spettrale. Questo spostamento del punto di cromaticità è mostrato in figura 3.6.



La figura mostra che il punto di cromaticità si sposta verso temperature di colore più elevate. Questo è dovuto alla forte dipendenza dalla temperatura della potenza di emissione del LED rosso. Infatti, ad alte temperature, la componente rossa della sorgente luminosa decresce più fortemente (a causa del basso valore di  $T_1$ ) della componente verde e della componente blu, che è particolarmente stabile.

Figura 3.6 : Spostamento del punto di cromaticità di una sorgente LED a luce bianca al variare della temperatura.

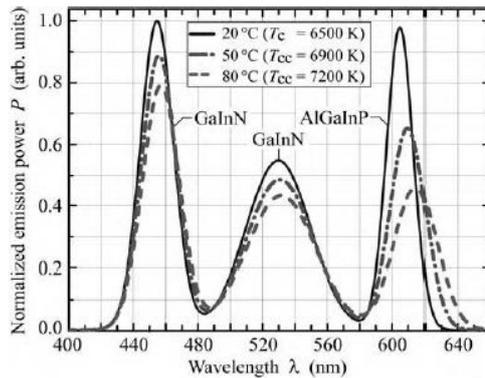


Figura 3.7 : spettro di emissione di una sorgente LED tricromatica a luce bianca per differenti temperature

Il cambiamento di cromaticità può essere eliminato regolando le potenze di emissione delle tre sorgenti LED. Per fare ciò ci sono due possibili modi.

Il primo consiste nel misurare costantemente lo spettro della sorgente di luce e nell'usare un controllo di retroazione per regolare le potenze ottiche delle tre componenti.

Il secondo prevede di monitorare la temperatura del dispositivo e di regolare la potenza ottica delle tre componenti mediante la dipendenza dalla temperatura dei diversi tipi di emettitori. Questo secondo metodo è più facile grazie alla semplicità con cui viene eseguita la misura di temperatura, tuttavia, esso non consente di operare una compensazione in grado di ridurre gli effetti di invecchiamento del dispositivo.

### 3.1.3 Sorgenti a luce bianca tetracromatiche e pentacromatiche

Le sorgenti a luce bianca tetracromatiche e pentacromatiche utilizzano, rispettivamente, quattro e cinque tipi di LED.

Generalmente, l'indice di resa cromatica di sorgenti policromatiche aumenta con il numero di LED utilizzati, mentre l'efficacia luminosa diminuisce. Così, l'indice di resa cromatica e l'efficacia luminosa di sorgenti tetracromatiche sono, rispettivamente, più alto e più bassa di quelli di sorgenti tricromatiche e bicromatiche. Tuttavia, specificatamente, dipendono dalla scelta esatta delle lunghezze d'onda di emissione: grazie al gran numero di lunghezze d'onda che è possibile scegliere, la temperature di colore di tali sorgenti può essere regolata più liberamente senza compromettere la resa di colore.

## 3.2 Generazione di luce bianca per fotoluminescenza

La seconda tecnica per generare luce bianca consiste nell'utilizzo di un LED la cui luce è parzialmente o completamente utilizzata per eccitare otticamente uno o più fosfori. Tale tecnica è dovuta al **principio della fotoluminescenza**.

I diversi approcci, mostrati nella figura 3.8., possono essere classificati in bicromatico, tricromatico e tetracromatico e possono utilizzare sia sorgenti a luce visibile (per lo più LED emettenti nel blu), sia sorgenti UV.

Generalmente, l'efficacia della sorgente luminosa decresce all'aumentare della cromaticità della sorgente. Così, sorgenti bicromatiche hanno la più alta efficacia luminosa, ma la resa di colore è più bassa per tali sorgenti e più alta per sorgenti multicromatiche: l'indice di resa cromatica CRI può raggiungere valori molto vicini a 100 per sorgenti tetracromatiche.

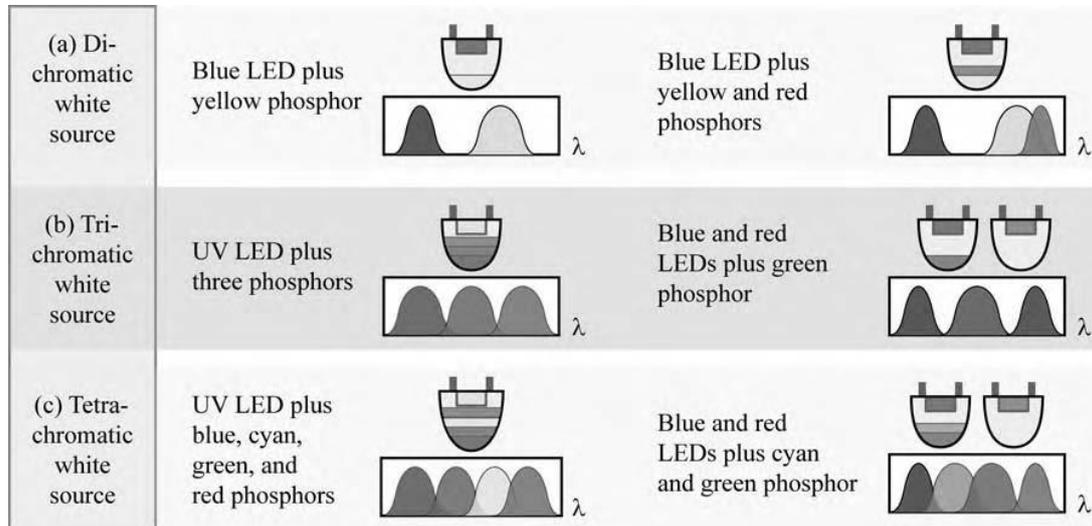


Figura 3.8 : Generazione di luce bianca tramite l'uso di fosfori

I fosfori sono materiali  $\lambda$ -**converter** (convertitori di lunghezza d'onda) e hanno diversi parametri di interesse, tra cui la lunghezza d'onda di assorbimento, la lunghezza d'onda di emissione e l'efficienza quantica. Essi convertono la radiazione assorbita avente lunghezza d'onda corta in una radiazione a lunghezza d'onda lunga. Un buon convertitore ha quasi il 100% dell'efficienza quantica.

L'efficienza complessiva di conversione di un convertitore di lunghezza d'onda è data da:

$$\eta = \eta_{\text{ext}}(\lambda_1 / \lambda_2)$$

Dove  $\eta_{\text{ext}}$  è l'efficienza quantica esterna del convertitore data da:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{numero di fotoni emessi nello spazio libero dal } \lambda \text{-converter per secondo}}{\text{numero di fotoni assorbiti dal } \lambda \text{-converter per secondo}},$$

$\lambda_1$  e  $\lambda_2$  sono, rispettivamente, la lunghezza d'onda dei fotoni assorbiti e dei fotoni emessi dal  $\lambda$ -converter.

Anche se l'efficienza quantica esterna è massima (pari a 1), c'è sempre una perdita di energia associata al processo di conversione, indicata con l'espressione **Stokes shift**, data dal rapporto  $\lambda_1 / \lambda_2$ , così che l'efficienza di conversione di un  $\lambda$ -converter è sempre inferiore all'unità.

Tale perdita di energia è la ragione per la quale i LED bianchi basati sui  $\lambda$ -converter hanno una efficienza più bassa rispetto alle sorgenti a luce bianca ottenute combinando più LED.

In particolare, tale perdita di energia è più alta nel caso in cui si usi un fosforo rosso. È preferibile, quindi, impiegare un LED rosso, anziché fosfori rossi, dove è necessario un sistema di illuminazione ad alta efficienza.

Ci sono diversi tipi di materiali convertitori tra cui fosfori, semiconduttori, e dyes. Tuttavia, i più comuni sono i fosfori e questi saranno analizzati nel resto del capitolo.

### 3.2.1 Luce bianca generata da un LED blu e fosforo

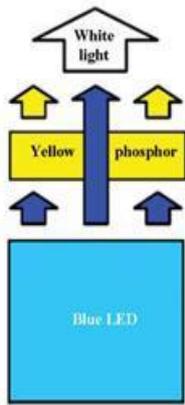
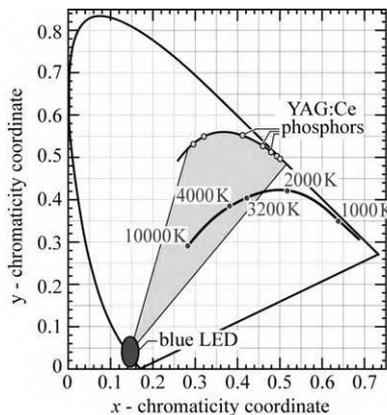
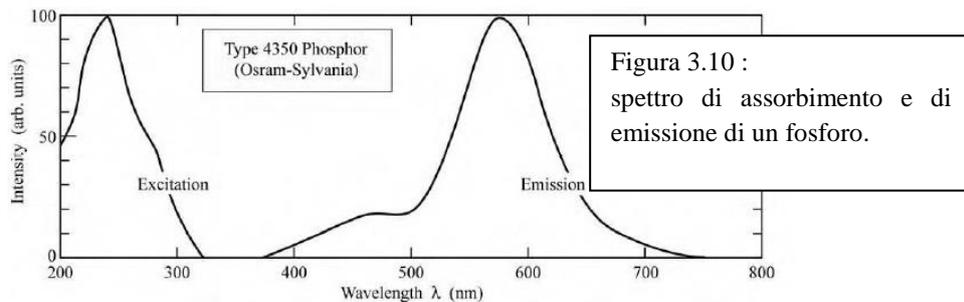


Figura 3.9

La maggior parte degli emettitori a luce bianca utilizzano un LED di un colore che emette con una lunghezza d'onda corta, generalmente blu, e un fosforo, solitamente giallo. Parte della luce emessa dal LED blu viene assorbita nel materiale convertitore e poi riemessa come luce con una lunghezza d'onda maggiore. Tale processo è mostrato in figura 3.9.

I fosfori sono costituiti da un materiale inorganico drogato con un elemento otticamente attivo. I più comuni materiali sono granati e hanno la formula chimica  $A_3B_5O_{12}$  dove A e B sono elementi chimici e O è l'ossigeno. Tra i molti granati, il granato di alluminio di ittrio (YAG),  $Y_3Al_5O_{12}$ , è un fosforo di colore giallo particolarmente comune. Il drogante otticamente attivo è costituito di terre rare, come il cerio (Ce) utilizzato nei fosfori YAG.

Lo spettro di assorbimento e di emissione di un fosforo è mostrato in figura 3.10. : la banda di assorbimento e la banda di emissione sono a bassa energia. La banda di emissione è piuttosto ampia, rendendo questo particolare fosforo adatto all'emissione di luce bianca.



I punti di cromaticità del fosforo YAG drogato con cerio sono mostrati in figura 3.11. La regione più scura mostra le cromaticità che possono essere ottenute utilizzando un LED blu, ad esempio un LED GaInN/GaN, e un fosforo YAG.

Figura 3.11

La struttura in sezione trasversale di una lampada a LED bianco è mostrata in figura 3.12 (a). La figura mostra il chip di un LED emettente nel blu e il fosforo YAG depositato sopra di esso.

Il fosforo è fatto sotto forma di resina epossidica e viene depositato sopra il chip in modo che riempia la depressione a forma di tazza nel quale si trova il chip, come mostrato in figura 3.12 (b).

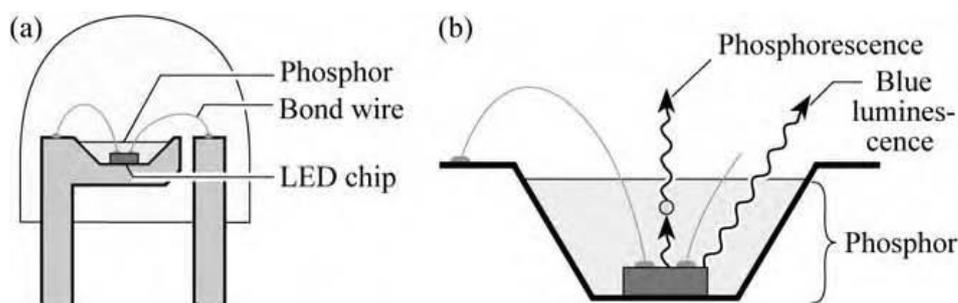


Figura 3.12 : Struttura di una lampada a LED bianco costituita da un LED GaInN a luce blu e un fosforo.

Come indicato nella figura, una frazione della luce blu viene assorbita dal fosforo e riemessa come luce a lunghezza d'onda più lunga, nel range verde-rosso con un picco nel giallo, come si vede nello spettro di emissione riportato in figura 3.13 : tale spettro consiste in una luminescenza blu dovuta al semiconduttore di cui è costituito il chip e di una fosforescenza a lunghezza d'onda più lunga, dovuta al fosforo.

A causa della scarsa componente rossa e verde, l'indice CRI è minore di 80.

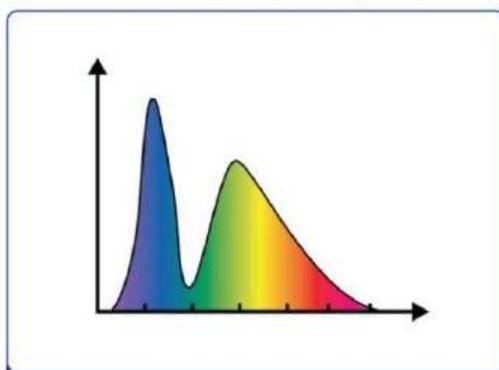
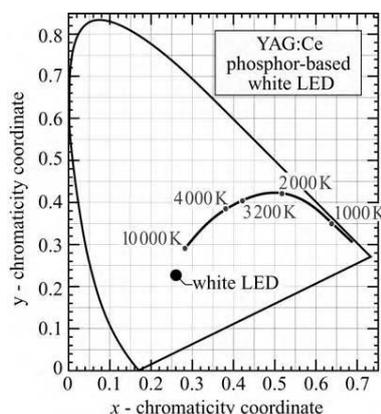


Figura 3.13 : Spettro di emissione della luce bianca ottenuta da un LED blu e fosforo giallo



La posizione di tale luce bianca nel diagramma di cromaticità è mostrata in figura 3.14. Tale posizione suggerisce che il colore di emissione è bianco con una tinta bluastra.

Figura 3.14

L'occhio umano è straordinariamente sensibile da poter percepire piccole variazioni della lunghezza d'onda del chip, che possono essere causate dallo spessore del fosforo, dalla sua concentrazione e dalla sua composizione. Anche le più piccole variazioni di uno di questi parametri porta sostanziali differenze di colore e temperatura di colore. Di conseguenza, lo spettro del LED bianco può variare ottimizzando l'efficienza luminosa e l'indice di resa cromatica.

Nel processo di produzione, purtroppo, non è possibile riprodurre con precisione LED dotati di temperatura di colore identiche. Per ovviare a tale problema, si utilizza un processo chiamato **binning**, mediante il quale i LED sono suddivisi in gruppi con temperature di colore simili.

Il livello di precisione richiesto dev'essere in funzione del tipo di applicazione: tali differenze, infatti, vengono percepite su fasci stretti, mentre su applicazioni con fasci ampi (illuminazione di ambienti, stanze, ecc..) le differenze sono molto meno evidenti.

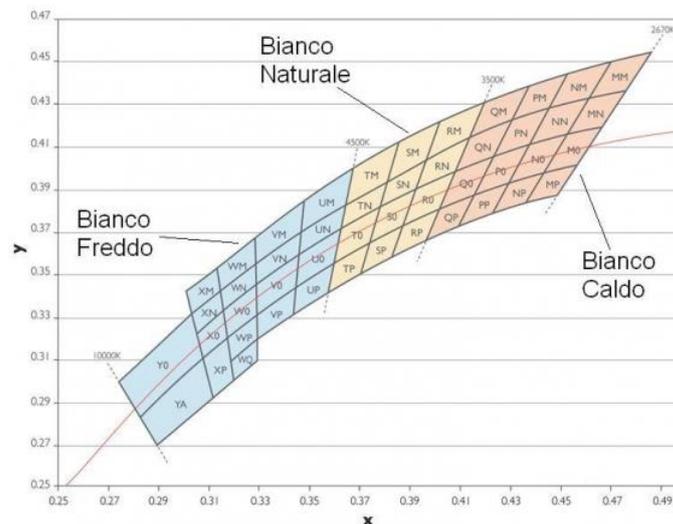


Figura 3.15 : Aree di binning per le diverse tonalità di bianco

Per migliorare la resa cromatica, si può aggiungere un ulteriore fosforo di colore rosso che, eccitato da una luce blu con lunghezza d'onda di 460 nm, fa sì che l'emissione abbia una lunghezza d'onda di picco di 655 nm. In questo modo l'emissione risulta spostata nella gamma del rosso e il picco di emissione nel blu viene ridotto, come mostrato nella figura 3.16. Si ottiene così uno spettro più omogeneo con meno discontinuità, di conseguenza si avrà un indice CRI molto elevato. LED basati su questa tecnologia vengono detti High CRI LED.

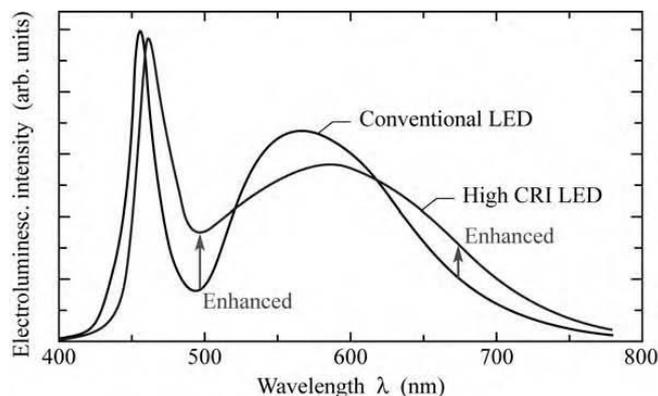


Figura 3.16 : Spettro di emissione di un comune LED bianco e di un High CRI LED

Si può così variare la tonalità cromatica della luce bianca dosando il colorante al fosforo. Lo svantaggio di aggiungere fosfori rossi è una ridotta efficienza luminosa dovuta allo Stokes shift. Così, sebbene la resa cromatica sia migliore, questo avviene a scapito dell'efficienza luminosa.

Un approccio che combina LED rossi e blu con l'uso di un fosforo giallo è la soluzione ottimale per i LED a luce calda con un CRI che può arrivare fino a 90, come è mostrato in tabella 3.3.

	<b>Bianco freddo</b>	<b>Bianco caldo</b>	<b>Bianco caldo</b>
<b>Tecnologia</b>	Chip blu + fosforo giallo	Chip blu + fosforo rosso e giallo	Chip blu + chip rosso + fosforo giallo
<b>CCT</b>	5700 K	2700 K	2700 K
<b>CRI</b>	70	82	90
<b>Efficienza relativa</b>	100%	65%	98%

Tabella 3.3

Tale tecnica basata sull'uso di un LED blu e di un fosforo, pur mostrando un'incredibile semplicità, presenta notevoli difetti dovuti principalmente all'impiego della sostanza fosforescente: primo fra tutti, il rivestimento aggiuntivo causa un aumento della temperatura interna al componente facendone diminuire la vita. Inoltre esso è causa sia della diminuzione dell'intensità della luce emessa, incontrando essa un maggiore ostacolo nell'uscire dal led, sia, degradando, del lento e progressivo peggioramento della tonalità della stessa. Infatti con il tempo il materiale utilizzato tende ad usurarsi cominciando quindi a far passare una luce che verterà sempre più verso il blu.

Nonostante questi grandi difetti è la tecnica più utilizzata perché molto più pratica, meno costosa permettendo anche di risparmiare spazio utilizzando un solo led al posto di tre.

### 3.2.2 Luce bianca generata da un LED UV e fosfori

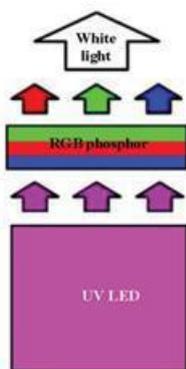


Figura 3.17

Il LED a luce bianca può anche essere ottenuto dall'eccitazione ottica del fosforo nel campo dell'ultravioletto (UV) in modo da convertire tutta la radiazione nella banda del visibile; le sorgenti più utilizzate a questo scopo sono quelle che emettono nell'UV, con lunghezza d'onda tra 320 nm e 390 nm, e nel violetto vicino al margine dello spettro visibile (390-410 nm).

Per le sorgenti che emettono nell'UV a grandi lunghezze d'onda (200-320 nm), possono essere usati per la conversione di lunghezza d'onda fosfori come quelli usati nell'illuminazione fluorescente. Tuttavia, il grande Stokes shift associato a tali fonti è uno svantaggio significativo.

Un LED bianco di questo tipo si è ottenuto utilizzando un LED basato su AlGaInN emettente a 380-400 nm, cioè tra lo spettro visibile e l'ultravioletto, e tre fosfori emettenti nel rosso, nel verde e nel blu, come mostrato in figura 3.17. L'indice di resa cromatica è di 78.

In generale l'indice CRI di questo tipo di sorgenti a luce bianca può variare tra 60 e 100. CRI eccellenti di valore 97 sono stati riportati per le miscele di fosforo eccitati vicino a 400 nm. Inoltre, per tali sorgenti basate su LED UV lo spettro di emissione è indipendente dall'esatta lunghezza d'onda emessa dal chip, ma è dovuta unicamente al fosforo.

Tali sorgenti hanno uno spettro ottico ampio come quello solare, mostrato in figura 3.18, di conseguenza hanno un indice CRI maggiore di 90 e non è necessario il binning.

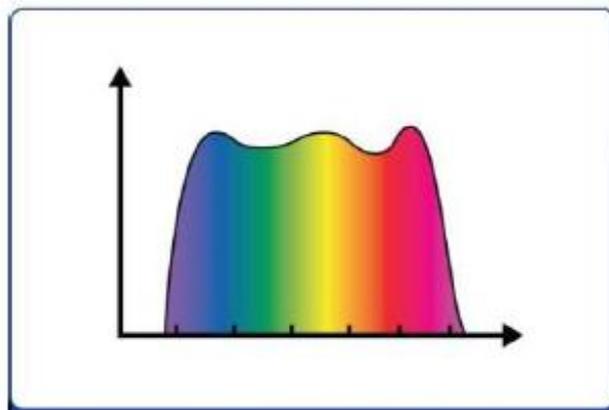


Figura 3.18 : Spettro di emissione della luce bianca ottenuta con un LED viola e tre fosfori colorati

Uno svantaggio di tali sorgenti è la perdita di energia (Stokes shift) sostenuta per la conversione da luce UV a luce bianca. Di conseguenza l'efficienza luminosa è nettamente inferiore a quella delle sorgenti a luce bianca ottenuta da un LED emettente nel blu con fosforo giallo.

## Capitolo 4

# Pilotaggio dei LED

L'alimentazione del singolo LED avviene in corrente continua (CC) tramite dispositivi elettronici chiamati driver. Poiché il LED ha le caratteristiche elettriche di un diodo, passerà corrente in una direzione ma non nella direzione inversa; inoltre l'intensità della luce emessa dal LED è direttamente proporzionale alla corrente, ovvero all'aumentare della corrente aumenta la luminosità.

In generale, i LED hanno una caduta di tensione (tensione diretta) di circa 1,5-3 V e una corrente diretta che varia da 10 a 30 mA, (20 mA è la corrente più comune che essi sono progettati per sostenere). Sia la tensione diretta che la corrente variano a seconda del materiale semiconduttore utilizzato.

Poiché i LED sono progettati per funzionare ad un livello relativamente basso di corrente, ad esempio 20 mA, applicando una tensione di alimentazione ad un singolo LED o a un gruppo di LED si può provocare anche una esplosione qualora la corrente diventi troppo grande, mentre una corrente troppo debole ne limita la resa luminosa. Per questo motivo è necessario un controllo preciso della corrente.

Ci sono essenzialmente due metodi che possono essere usati per limitare e controllare la corrente diretta che fluisce attraverso un LED: il primo metodo comporta l'uso di regolatori lineari, mentre il secondo metodo si basa sull'utilizzo di regolatori switching che pilotano il dispositivo con una sorgente di corrente costante. Questo secondo metodo è migliore del primo per una serie di motivi che verranno analizzati in questo capitolo.

### 4.1 Pilotaggio LED con regolatori lineari

I LED presentano una caduta di tensione diretta  $V_F$  associata alla corrente diretta  $I_F$  come quella riportata nel grafico di figura 4.1.

La variabilità all'interno di uno stesso dispositivo è estremamente ampia, così come è visibile nel grafico che rappresenta le caratteristiche minime, tipiche e massime di un diodo LED. Infatti, con una corrente diretta di 20 mA la caduta di tensione varia tra 3.2 V (curva minima) e 4 V (curva massima) passando per un tipico di 3.6 V.

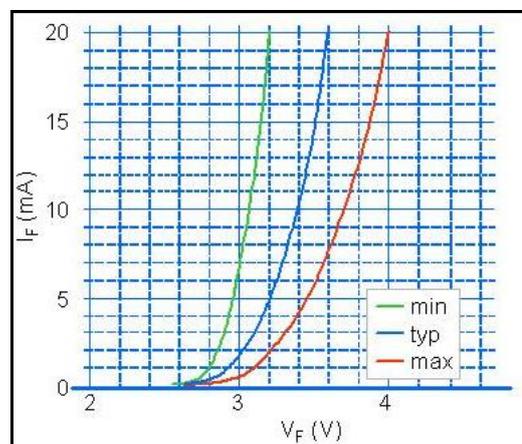


Figura 4.1 : Caratteristica I-V di un diodo LED

Quando la sorgente di alimentazione ha una tensione vicina alla tensione diretta del diodo ed è abbastanza stabile, si può regolare la corrente nel LED usando una resistenza posta in serie al LED, come mostrato in figura 4.2.

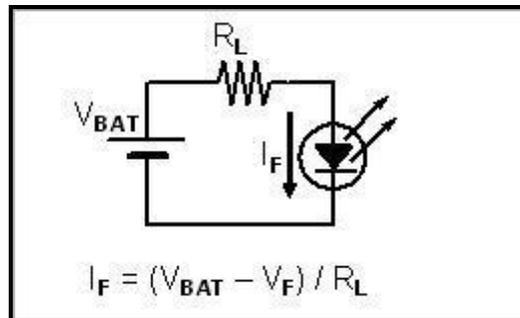


Figura 4.2 : Uso di un a resistenza per limitare la corrente

Così, attraverso l'utilizzo di una resistenza, che fornisce una relazione lineare tra tensione e corrente, è possibile limitare la corrente che fluisce attraverso il LED.

Secondo la legge di Ohm, tale corrente è data da:

$$I_F = \frac{V_{BAT} - V_F}{R_L}$$

dove  $V_{BAT}$  è la tensione di alimentazione,  $V_F$  è la tensione diretta richiesta da ciascun LED (riportata sulla confezione) e  $R_L$  è la resistenza. In questo modo, all'aumentare della resistenza, a tensione costante, la corrente diminuisce.

Anche se è comune l'uso di una resistenza in semplici applicazioni LED, per le applicazioni più sofisticate ci sono diversi svantaggi di questo metodo.

In primo luogo, una leggera variazione della tensione diretta del LED, tollerabile, a causa della temperatura o per motivi di fabbricazione, fissata una certa resistenza, può portare a un cambiamento della corrente diretta non trascurabile. Infatti, la corrente nel LED può variare tra un valore minimo e un valore massimo molto diversi e anche uscire dai limiti supportati dal dispositivo.

Analogamente, se la tensione di alimentazione non è stabile, ma varia, anche la corrente varierà.

In secondo luogo, se anche si usasse un resistore al posto di una resistenza in modo che al variare della tensione si possa comunque mantenere il valore della corrente entro certi limiti, il pilotaggio con un regolatore lineare soffre di un ulteriore problema: la dissipazione di potenza.

Vi è dissipazione di potenza sulla resistenza pari a :

$$P_R = (V_{BAT} - V_F)I_F = RI_F^2$$

e potenza dissipata dal LED per produrre luce pari a:

$$P_d = V_F I_F$$

La potenza dissipata sulla resistenza è tanto più grande quanto più il valore della tensione di alimentazione è distante dal valore della tensione diretta del LED. Inoltre, all'aumentare della potenza diminuisce l'efficienza e aumenta la dissipazione di calore.

## 4.2 Pilotaggio LED con regolatori switching

L'uso di regolatori switching è la soluzione ideale per il pilotaggio dei LED non solo quando le potenze di pilotaggio dei LED diventano consistenti, ma anche in considerazione delle diverse situazioni applicative. Per esempio quando:

- La tensione di alimentazione è inferiore alla  $V_F$  dei LED, situazione tipica nelle apparecchiature portatili alimentate a batteria;
- La tensione di alimentazione è estremamente più elevata della  $V_F$  dei LED, caso in cui l'alimentazione debba essere derivata direttamente dalla rete elettrica (220 V AC);
- La tensione di alimentazione ha una variabilità estremamente elevata e/o può essere sia superiore che inferiore alla  $V_F$ .

Questa soluzione può portare ad efficienze ben superiori all'80% e superare in alcuni casi anche il 90% e permettono di elevare, oltre che ridurre come i regolatori lineari, la tensione di uscita rispetto a quella di ingresso.

Uno svantaggio di tale tecnica è il rumore elettrico generato alle alte frequenze che comunque può essere limitato con appositi filtri.

### 4.2.1 Regolatori switching

I regolatori switching sono convertitori DC-DC i quali convertono una tensione DC in un'altra tensione DC. Questi circuiti tipicamente compiono la conversione applicando tensione continua DC su un induttore per un periodo di tempo nel quale scorre una corrente elettrica così da immagazzinare energia magnetica; quando viene tolta la tensione si trasferisce l'energia immagazzinata come tensione d'uscita del convertitore in maniera controllata.

Il principio fondamentale su cui si basa il funzionamento di un regolatore switching è detto **PWM**, dall'Inglese "Pulse Width Modulation", e cioè modulazione della larghezza dell'impulso.

La tensione di alimentazione arriva nella forma di una serie di impulsi (vedi figura 4.3), a frequenza costante, distanziati uno dall'altro da un tempo  $T$ . Chiameremo  $T_{ON}$  il tempo in cui l'impulso è alto, e cioè c'è tensione, e  $T_{OFF}$  il tempo in cui l'impulso è zero e quindi non c'è tensione.

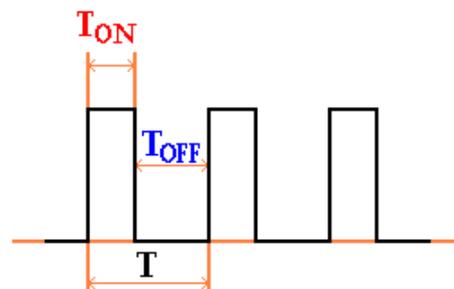


Figura 4.3 : Modulazione PWM

Poiché gli impulsi sono a frequenza costante, anche l'intervallo di tempo  $T$  ha valore costante: la modulazione PWM consiste nel far variare il tempo  $T_{ON}$ ; naturalmente, quando  $T_{ON}$  si allunga,  $T_{OFF}$  diventa necessariamente più breve, e viceversa.

Il rapporto fra il tempo  $T_{ON}$  ed il tempo totale  $T$  è una grandezza caratteristica, che viene denominata "**duty cycle**", cioè si definisce duty cycle (o rapporto acceso/spento) la frazione del periodo di commutazione  $T$  durante la quale c'è l'impulso. Perciò esso può variare tra 0 (non c'è mai impulso) e 1 (c'è sempre impulso).

Facendo pervenire tali impulsi ad una rete LC, si ottiene una tensione di uscita  $V_{OUT}$  il cui valore dipende dalla larghezza degli impulsi, ed è esattamente uguale al valore di picco moltiplicato per il duty cycle. Si comprende quindi come, modulando la larghezza dell'impulso, sia possibile ottenere qualsiasi tensione in uscita, e senza dissipare inutilmente parte della potenza.

Tutti i vari tipi di regolatori switching che si possono realizzare sono composti dagli stessi elementi base: l'induttore  $L$  che è l'elemento di accumulo di energia, il diodo  $D$ , un condensatore  $C$  e un interruttore  $S$  rappresentato da un transistor (MOS o BJT) con bassa resistenza nello stato ON. Il comando dello switch è affidato ad un apposito circuito (control) che verifica la tensione presente sul carico e, di conseguenza, modifica la durata dei tempi  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$ .

Esistono diverse tipologie di regolatori switching: esse sono presentate nel seguito sotto le ipotesi di interruttore ideale e di diodo ideale, ovvero nel caso in cui esso non introduca una caduta di tensione.

### Regolatore switching boost

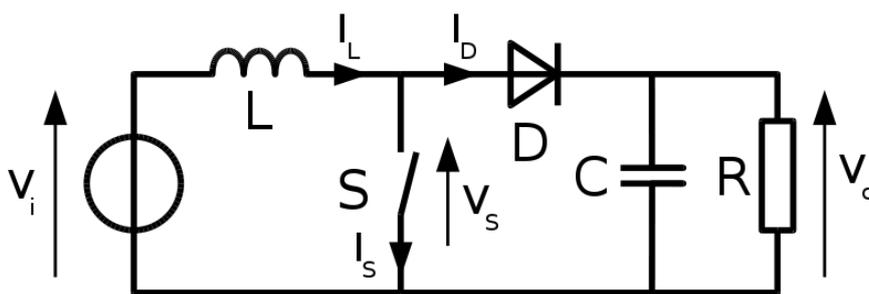


Figura 4.4 : Regolatore switching boost

Un regolatore switching boost è un convertitore DC-DC con una tensione di uscita maggiore di quella d'ingresso. Per tale motivo, esso è anche definito step-up, ossia circuito innalzatore di tensione.

Il principio base di funzionamento di un regolatore boost consiste in due stati distinti:

- Nello stato ON, il commutatore S è chiuso, provocando un aumento di corrente nell'induttore (fase di carica dell'induttore).

La tensione ai capi dell'induttore è pari alla tensione d'ingresso,  $V_L = V_i$ , mentre il diodo D, che risulta polarizzato inversamente, impedisce che il condensatore si scarichi verso la massa.

Essendo la tensione di ingresso costante e continua, la corrente nell'induttore cresce linearmente con una pendenza pari al rapporto tra la tensione di ingresso e l'induttanza L. L'energia immagazzinata nell'induttore è pari a:

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2$$

dove  $I_L$  è la corrente di picco che scorre nell'induttanza.

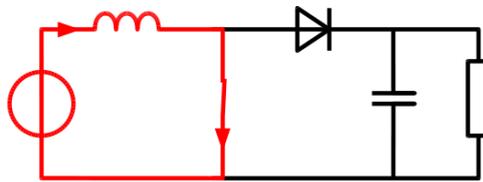


Figura 4.5: Stato ON di un regolatore boost

- Nello stato OFF, il commutatore S è aperto, e, nell'ipotesi di diodo ideale e di una capacità abbastanza grande da mantenere la sua tensione costante,  $V_L = V_i - V_o$ . Il diodo D risulta polarizzato direttamente, quindi l'unico percorso offerto alla corrente dell'induttore è attraverso il diodo D, la capacità C e il carico R (fase di scarica dell'induttore). Ciò provoca il trasferimento dell'energia accumulata durante lo stato "on" nella capacità.

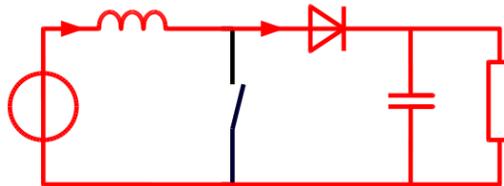


Figura 4.6 : Stato OFF di un regolatore boost

Se continuiamo ripetutamente questo processo di carica e scarica dell'induttore, la tensione di uscita aumenterà in ogni ciclo.

## Regolatore switching buck

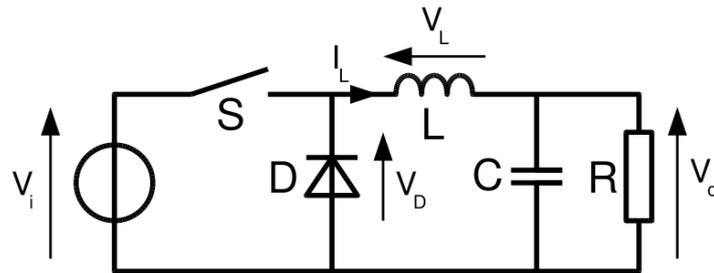


Figura 4.7 : Regolatore switching buck

Un regolatore switching buck è un convertitore DC-DC con una tensione di uscita minore di quella d'ingresso. Per tale motivo, esso è anche definito step-down, ossia circuito riduttore di tensione.

Come per il regolatore boost, il principio base di funzionamento di un regolatore buck consiste in due stati distinti:

- Nello stato ON, il commutatore S è chiuso, provocando un aumento di corrente nell'induttore (fase di carica dell'induttore).

La tensione ai capi dell'induttore è pari a  $V_L = V_i - V_o$ , la corrente nell'induttore cresce linearmente e fluisce nel condensatore, inizialmente scarico. Il diodo, invece, risulta inversamente polarizzato e quindi non fluisce corrente in esso.

In questa fase viene immagazzinata energia nell'induttore è pari a:

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2$$

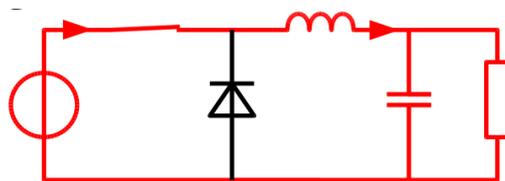


Figura 4.8 : Stato ON di un regolatore buck

- Nello stato OFF, il commutatore S è aperto, e, nell'ipotesi di diodo ideale,  $V_L = -V_o$ : essa cambia segno istantaneamente per permettere alla corrente di continuare a scorrere accendendo il diodo. Esso, infatti, risulta polarizzato direttamente, quindi la corrente dell'induttore scorre attraverso il diodo D, la capacità C e il carico R e diminuisce (fase di scarica dell'induttore). Ciò provoca il trasferimento dell'energia accumulata durante lo stato ON nella capacità.

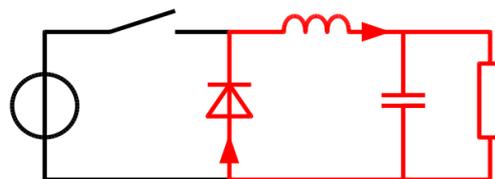


Figura 4.9 : Stato OFF di un regolatore buck

## Regolatore switching buck-boost

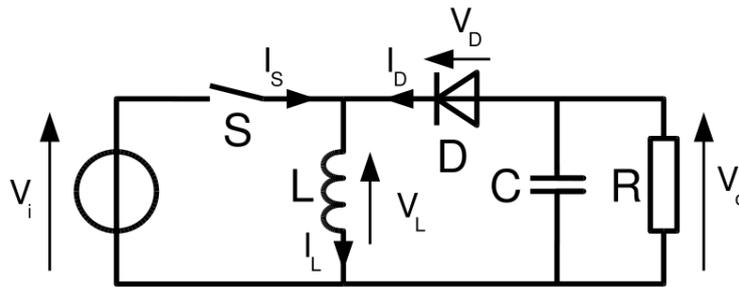


Figura 4.10 : Regolatore switching buck-boost

Il regolatore buck-boost è un convertitore DC-DC, che presenta una tensione di uscita di valore maggiore o minore del valore della tensione in ingresso. Uno dei possibili lati negativi di questo regolatore è il fatto che l'interruttore non ha uno dei terminali a terra: questo complica la circuiteria di pilotaggio; inoltre, la polarità dell'uscita è opposta a quella dell'ingresso.

Il principio base di funzionamento di un regolatore buck-boost consiste in due stati distinti:

- Nello stato ON, il commutatore S è chiuso, provocando un aumento di corrente nell'induttore (fase di carica dell'induttore).

La tensione ai capi dell'induttore è pari alla tensione d'ingresso,  $V_L = V_i$ , la corrente nell'induttore cresce linearmente e il condensatore fornisce energia al carico. L'energia immagazzinata nell'induttore è pari a:

$$E = \frac{1}{2} LI_L^2$$

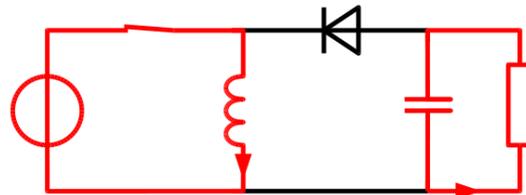


Figura 4.11 : Stato ON di un regolatore buck-boost

- Nello stato OFF, il commutatore S è aperto e la corrente continua a fluire nella stessa direzione attraverso il diodo (fase di scarica dell'induttore). In questo modo l'induttore è collegato all'uscita e al condensatore e l'energia sarà trasferita dall'induttore al condensatore, il quale si caricherà ad una tensione di polarità opposta a quella d'ingresso.

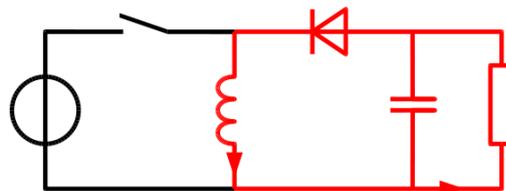


Figura 4.12 : Stato OFF di un regolatore buck-boost

L'uscita può variare in modo continuo da 0 a  $-\infty$  (per un convertitore ideale). Le variazioni dell'uscita per un buck ed un boost sono rispettivamente da 0 a  $V_i$  e da  $V_i$  a  $+\infty$ .

Durante il loro funzionamento tutti i regolatori switching possono lavorare in due modalità:

- modo di funzionamento continuo **CCM** (Continuous Conduction Mode)
- modo di funzionamento discontinuo **DCM** (Discontinuous Conduction Mode)

Il modo CCM si distingue dal DCM per il fatto che la corrente che scorre nell'induttanza non si annulla mai durante il periodo di switching.

Invece, la corrente si annulla quando la quantità di energia richiesta dal carico è abbastanza piccola da essere trasferita in un tempo minore dell'intero periodo di commutazione. In questo caso il diodo risulta interdetto fino al successivo ciclo di commutazione e il carico viene alimentato dal solo condensatore.

In figura 4.13 e 4.14 sono mostrate le forme d'onda tipiche ideali per i due modi di funzionamento:

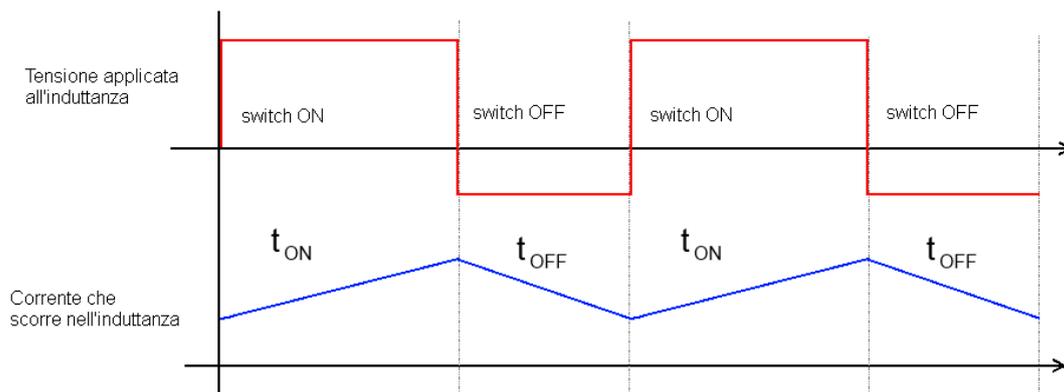


Figura 4.13 : Forma d'onda del modo di funzionamento continuo

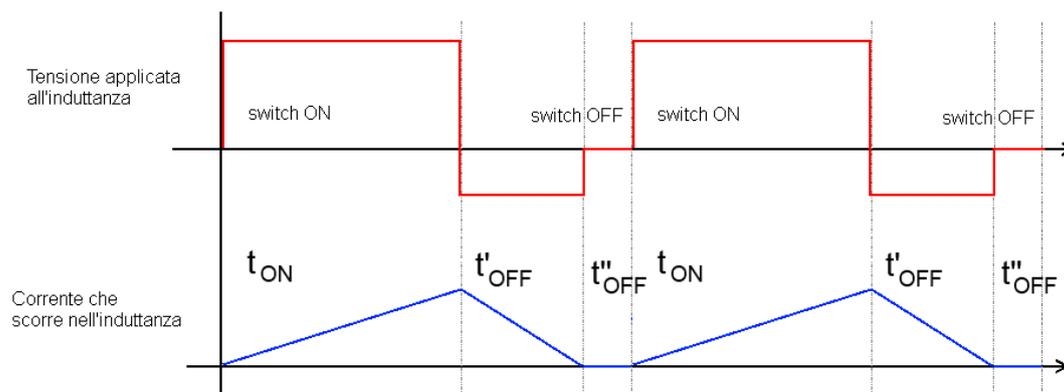


Figura 4.14: Forma d'onda del modo di funzionamento discontinuo

## 4.2.2 Dimmerabilità dei LED

Come detto in apertura l'intensità della luce emessa dal LED è proporzionale alla corrente che lo attraversa. Partendo da questa considerazione si potrebbe pensare che regolando la corrente, cioè aumentandone o diminuendone il livello, sia possibile ottenere il controllo della luminosità emessa (dimming). La cosa è sicuramente vera ma soffre di alcuni importanti inconvenienti:

- il variare dell'intensità della corrente causa, anche nei LED monocromatici, uno spostamento della lunghezza d'onda dominante;
- il variare della corrente causa, nei LED bianchi, uno spostamento della temperatura di colore correlata;
- diventa molto più difficoltoso ottimizzare l'efficienza del circuito di pilotaggio.

Per i motivi citati la scelta ottimale per il dimming è un pilotaggio a corrente costante modulato in PWM. In questo modo i LED sono dimmerabili senza alterazione di colore.

Quindi, nei LED driver si utilizzano i regolatori switching in cui, con riferimento agli schemi visti nel paragrafo precedente, il LED, o una serie di LED, funge da carico e un transistor MOSFET funge da interruttore. Quest'ultimo viene comandato da un circuito di controllo avente, appunto, modulazione PWM.

A seconda del valore della tensione di alimentazione e della tensione diretta si usa, in particolare:

- un regolatore boost se la tensione di alimentazione è minore della tensione diretta in modo da innalzare la tensione di uscita; in questo caso si usa un meccanismo di feedback per regolare la tensione del boost a un valore fisso;
- un regolatore buck se la tensione di alimentazione è maggiore della tensione diretta in modo da abbassare la tensione di uscita.  
Attualmente, un LED driver di questo tipo è comunemente usato nel settore automobilistico dove la fonte di tensione è molto superiore a quella necessaria per il funzionamento di uno o più LED.
- un regolatore buck-boost svolge la funzione sia di un step-up che di un step-down. Il costo di un driver così realizzato supera quello dei driver progettati per eseguire una sola funzione, tuttavia, la duplice funzionalità offre una maggiore flessibilità per i progettisti.

In conclusione, nonostante l'uso di un regolatore switching sia più costoso e generi rumore elettrico, in confronto a un semplice resistore, esso consente il dimming tramite un controllo della corrente o tramite una modulazione PWM, ed è molto più efficiente dato che non ci sono dissipazioni di potenza.



## Capitolo 5

# I LED come fonte d'illuminazione

Ogni famiglia di lampade ha il suo campo di impiego privilegiato, più o meno articolato in funzione delle prestazioni offerte. Anche i LED hanno qualità tali da renderli adatti a molte applicazioni. Attualmente l'unico limite sembra essere costituito dalla quantità di luce erogata che, nonostante l'efficienza luminosa, rimane modesta, a causa delle basse potenze assorbite. Perciò si può dire che gli utilizzi riguardino numerosi ambiti, con l'esclusione tuttavia di quelli in cui sono necessari alti valori di flusso luminoso.

In questo capitolo viene trattata la tecnologia a LED come fonte d'illuminazione in tre ambiti particolari: strade, musei, centri commerciali. I LED, infatti, vengono sempre più utilizzati in questi ambienti grazie agli importanti vantaggi che offrono: risparmio energetico, poche manutenzioni, longevità delle sorgenti luminose, flessibilità di utilizzo, piccole dimensioni.

### 5.1 Illuminazione stradale

Nel futuro dei LED, l'ambito applicativo di maggiore portata, sia quantitativa che qualitativa, sarà probabilmente quello urbano. In tutto il mondo civilizzato continuano a crescere le città; vasti territori appaiono densamente urbanizzati e con l'estensione delle aree metropolitane aumenta la domanda pubblica di luce.

Di riflesso assume una nuova articolazione la tipologia dell'illuminazione: luce non solo per il sistema infrastrutturale dei percorsi destinati ai veicoli a motore, ma anche per le zone riservate ai pedoni e alle piste ciclabili, per le aree verdi, per il patrimonio architettonico e monumentale, per le zone di attrazione turistica, di svago e intrattenimento serali e notturni.

In questo vasto e multiforme ambito applicativo la spesa energetica è ingente e in continua crescita; gli impianti di illuminazione devono rendere il loro servizio pubblico con continuità per molte ore all'anno. Mancanza o carenza di luce significano meno sicurezza, più incidenti, diffusi disagi per i cittadini. Questo nesso diretto tra la luce e le condizioni della sicurezza pubblica, pone la necessità di progettare impianti di grande affidabilità tecnico-funzionale, in grado di garantire la migliore visione con la minore incidenza sulla spesa energetica e manutentiva.

#### 5.1.1 Sorgenti luminose a LED

Per molti anni, per l'illuminazione stradale, si sono preferite le lampade al sodio ad alta pressione, le quali, rispetto alle lampade al mercurio ad alta pressione utilizzate in precedenza,

possiedono una maggiore efficienza luminosa e durano di più. Tuttavia la loro tipica luce giallastra rende difficile distinguere i colori di notte e conferisce ad oggetti ed edifici un effetto innaturale. Questo è uno dei motivi per cui amministrazioni comunali e illuminotecnici insistono sempre di più per un'illuminazione stradale bianca. La scelta è sempre più orientata verso sorgenti luminose a LED.

I LED bianchi, infatti, dimostrano con successo la propria validità con un'elevata efficienza luminosa, un'intensità luminosa da buona a eccellente e un'alta efficienza energetica.

Nel corso dell'evoluzione, l'occhio umano si è adattato alla luce solare bianca e brillante, motivo per cui la luce artificiale bianca viene considerata particolarmente naturale. Questo è dovuto alle cellule sensoriali dell'occhio umano di cui si è parlato nel capitolo due: esse vengono attivate per la percezione ad intensità diverse, in base al livello di luminosità. A bassi livelli di luminosità, nell'occhio vengono attivate solo le cellule sensoriali che non percepiscono il colore, i bastoncelli, le quali d'altra parte reagiscono con maggiore sensibilità alla luce blu.

I risultati indicano che sono da preferire le sorgenti luminose con spettro prevalente nella banda del blu e verde, come i LED, senza richiedere elevati valori di luminanza. Invece, le lampade al sodio ad alta pressione presentano uno spettro centrato nella banda del rosso, molto al di fuori del picco di sensibilità dell'occhio umano.

Il fiordaliso, per esempio, risplende di un blu brillante anche sotto una forte luce lunare, mentre il papavero appare di un rosso scialbo. Queste cellule sensoriali reagiscono dunque con minore sensibilità alla luce gialla e rossastra. Un basso livello di luminosità si traduce quindi nel fatto che, nell'illuminazione stradale, la luce bianca (con una maggiore componente di blu) viene percepita come più brillante rispetto alla luce gialla con una leggera componente di blu, o del tutto senza componente blu come nel caso delle lampade al sodio a bassa pressione. Quindi, con le lampade al sodio occorre aumentare la potenza luminosa dell'ordine del 50% per garantire una visione sicura.

La luce LED bianca contribuisce alla sicurezza in città: l'efficacia luminosa, che va da buona a eccellente, e la luminosità soggettivamente maggiore della luce bianca contribuiscono ad un migliore riconoscimento di oggetti, persone ed edifici. In questo modo si può ad esempio ridurre notevolmente il numero di incidenti stradali. Le ricerche hanno dimostrato che, quando l'illuminazione stradale è bianca, i guidatori si accorgono prima e da una maggiore distanza della presenza di persone sul bordo della strada. Anche i pedoni riconoscono gli ostacoli più rapidamente che con la luce giallastra delle lampade al sodio ad alta pressione. Inoltre, la luce bianca attraversa molto meglio la nebbia, rendendo i veicoli più visibili.

L'uso di sorgenti luminose bianche consente, inoltre, di ottenere una riduzione della percentuale di delitti e migliora la qualità delle immagini dei sistemi di videosorveglianza, favorendo così le indagini delle autorità.

Nel capitolo due si è parlato del fatto che i bianchi non sono tutti uguali a causa delle varie temperature di colore che spaziano dal bianco freddo al bianco caldo. Nelle piazze pubbliche e nelle zone pedonali, la luce bianca calda genera una confortevole atmosfera di benessere con

temperature di colore intorno ai 3.000 K. D'altra parte la luce bianca neutra favorisce la sicurezza nelle vie pubbliche.

Inoltre, scegliendo accuratamente la temperatura di colore, determinati materiali risaltano meglio nell'architettura: ad esempio, per il vetro e l'acciaio si sceglie una luce più fredda, mentre le facciate di mattoni acquisiscono un aspetto più naturale con la luce bianca calda. L'illuminazione, infatti, deve essere anche efficiente, attirare l'attenzione su determinati dettagli architettonici e generare una sensazione di benessere.

Fino a oggi, tutti i sistemi di illuminazione generavano più calore che luce. La filosofia dei LED cambia questo contesto migliorando la percentuale tra la luce visibile emessa e il calore prodotto, il che la rende una tecnologia molto più adatta alle attuali esigenze e soprattutto molto più conveniente in termini di consumo energetico. Inoltre, mentre i vecchi apparecchi illuminanti a forma di calice disperdono la luce, quelli nuovi a LED illuminano in modo mirato la strada.

Al momento, infatti, le lampade al sodio ad alta pressione sono lo standard prediletto per l'illuminazione stradale. Esse sono vantaggiose in ambito di prezzi, manutenzione, efficienza luminosa e sostenibilità ambientale, tuttavia, l'elevata efficienza delle lampade al sodio ad alta pressione si relativizza a causa delle perdite di dispersione: le lampade di questo tipo illuminano in tutte le direzioni. Malgrado l'impiego di riflettori, una parte di luce si disperde. I LED hanno invece il vantaggio di avere un fascio di luce direzionabile: in questo modo la quota di luce dispersa è minima. Questo comporta una più elevata efficienza energetica e meno inquinamento luminoso.

In effetti, avendo una durata di vita di almeno quindici anni (centotrentamila ore), questo tipo di illuminazione consuma dal 40 all'80% di energia in meno rispetto ai sistemi tradizionali.

Oltre al risparmio energetico, i LED sono meccanicamente molto resistenti, si riaccendono a caldo e funzionano a bassissima tensione. Il fatto che la vita utile di un LED possa arrivare anche a centomila ore e più, può costituire realmente un punto di forza per alcune tipologie applicative, quali ad esempio l'illuminazione delle gallerie. Una durata quattro/cinque volte superiore a quella di una sorgente a scarica tradizionale (per esempio lampade al sodio ad alta pressione) si traduce infatti nella possibilità di costruire impianti con oneri di gestione e manutenzione considerevolmente inferiori.

Un'attenzione particolare è riservata al traffico motorizzato. Quanto maggiore è la velocità dei veicoli a motore, tanto più è importante la qualità della luce. Una buona illuminazione conforme agli standard illumina perfettamente la superficie stradale e migliora le capacità visive complessive dei guidatori.

La norma UNI11248 introduce nuovi parametri di sicurezza: uno di questi è la qualità della luce. La UNI asserisce che nel caso di utilizzo di sorgenti con resa cromatica inferiore a 30 Ra si deve aumentare la categoria stradale di riferimento. Di fatto si deve aumentare la quantità di luce necessaria affinché l'impianto rispetti la normativa. Al contrario, con l'utilizzo di sorgenti con resa cromatica superiore a 60 Ra si può diminuire la categoria stradale di riferimento e, quindi, i relativi livelli di luminanza richiesti. Questo comporta che per l'illuminazione di una

stessa strada se si utilizzano sorgenti luminose con alta resa cromatica si diminuiscono i livelli di luminanza media richiesti dalla Norma con conseguente diminuzione della potenza installata.

Oltre alle potenze di illuminazione previste dalle rispettive norme, sono fondamentali una distribuzione omogenea della luce sulla strada e le proprietà anti-abbagliamento dell'illuminazione: si ha abbagliamento debilitante, cioè che impedisce o limita la visione, quando molta luce è diretta verso l'occhio. L'uso dei LED permette di controllare in modo molto efficace e preciso le direzioni di propagazione della luce, così con un opportuno orientamento dei singoli LED installati su un apparecchio, si può controllare tale fenomeno.

OSRAM propone alcune lampade a LED adatte all'illuminazione stradale:



**a) Streetlight 10 LED    b) SQ 50 LED    c) SiCOMPACT® A2 LED    d) Large/Small Bell LED    e) Lantern LED**

**a), b):** per l'illuminazione in aree residenziali, strade secondarie, e strade di raccordo.

**c):** per l' illuminazione di piazze, strade e vialetti, per un'illuminazione generale di ampie superfici e per l'illuminazione di edifici (in particolare per l'illuminazione di sicurezza in impianti industriali).

**d) :** per l'illuminazione di piazze, parcheggi, aree residenziali, strade residenziali, strade di raccolta.

**e) :** per l'illuminazione di piazze e parcheggi.

## 5.1.2 Apparecchio di illuminazione

Una sorgente luminosa non è che una parte di un apparecchio di illuminazione.

Un apparecchio di illuminazione può essere definito un sistema che distribuisce, filtra o trasforma la luce emessa da una o più sorgenti e che include le parti necessarie per posizionare e proteggere le sorgenti ed i circuiti ausiliari per il corretto funzionamento del sistema.

Non si può valutare la qualità solamente della sorgente, in quanto un apparecchio illuminante scadente rimane tale anche con la migliore sorgente luminosa installata; inoltre un cattivo alimentatore può compromettere il corretto funzionamento e ridurre drasticamente l'aspettativa di vita.

Quindi, a questo punto, una volta definite le peculiarità delle sorgenti luminose a LED, è necessario ampliare il discorso a comprendere tutte quelle parti che possono determinare una buona o cattiva illuminazione.

Un apparecchio illuminante stradale a LED si compone di diverse parti che vengono riassunte nella figura 5.1.

Si può notare che non esistono componenti dedicati alla diffusione del flusso luminoso: il gruppo ottico di un apparecchio di illuminazione a LED è formato dai LED stessi, disposti in vario modo, e da delle lenti secondarie in grado di direzionare il fascio luminoso.

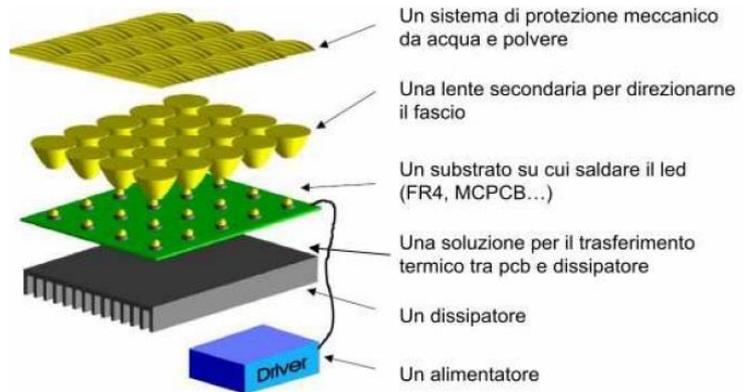


Figura 5.1: Struttura di un apparecchio illuminante stradale a LED

Un'altra peculiarità consiste nella presenza di sistemi di dissipazione, indispensabili per ridurre le temperature di esercizio dei diodi, non necessari, invece, negli apparecchi con lampade a scarica in quanto l'ambiente in cui viene alloggiata la lampada è più che sufficiente per una corretta dissipazione. Infatti, sebbene le sorgenti luminose a LED siano più fredde delle sorgenti a scarica tradizionali (che possono raggiungere valori ben al di sopra dei 2000 °C), questo non li esenta dai problemi legati al surriscaldamento. Il gap fra temperatura di giunzione e temperatura dell'ambiente di aggira attorno ai 50°C – 70°C e non potrebbe in alcun modo venire smaltito dalla piccola area dei diodi: per questo alla piastra su cui vengono saldati i LED viene affiancato un dispositivo di dissipazione.

Abbiamo visto nel capitolo quattro che i LED sono componenti a bassissima tensione, che devono essere alimentati in corrente continua. Poiché le sorgenti a LED hanno una vita media molto lunga occorre che anche i driver abbiano una mortalità molto bassa: durante il ciclo di vita previsto per un'armatura a LED è possibile prevedere la sostituzione del driver di un apparecchio di illuminazione su dieci. Questo dato annulla subito le pretese di manutenzione nulla prospettate da numerosi produttori. Inoltre la durata di vita attesa per un alimentatore elettronico decresce in maniera esponenziale all'aumentare della temperatura di lavoro: poiché le sorgenti a LED possono produrre molto calore, occorre che il driver sia adeguatamente distanziato dalla parte in cui sono alloggiati i LED, per impedire eventuali malfunzionamenti.

Data la moltitudine di apparecchi illuminanti e sorgenti a LED oggi presenti sul mercato, occorre definire un criterio di valutazione che possa accorpare gli elementi che concorrono ad una buona illuminazione: fattori come il rendimento di un apparecchio e l'efficienza luminosa delle lampade riflettono unicamente caratteristiche parziali e non esaustive.

In particolare il rendimento di un apparecchio, calcolato come rapporto fra il flusso luminoso emesso dall'apparecchio in determinate condizioni e il flusso luminoso emesso dalla lampada funzionante senza apparecchio nelle stesse condizioni, non tiene conto dell'eventuale flusso luminoso disperso verso l'alto (e quindi non utilizzato per l'illuminazione del piano stradale) e della potenza assorbita dall'apparecchio. L'efficienza luminosa della lampada, calcolata come rapporto fra flusso luminoso emesso dalla lampada e potenza elettrica consumata,

d'altra parte, non tiene conto della reale potenza assorbita dalle altre componenti elettroniche presenti all'interno dell'apparecchio ed inoltre non fornisce indicazioni sul flusso disperso a causa di riflessioni interne, lenti, ecc..

Per questo motivo si è scelto di incorporare questi due fattori in un coefficiente globale che tenga conto del flusso utile emesso dall'apparecchio e della reale potenza assorbita dall'apparecchio.

Generalmente, per un apparecchio di illuminazione stradale è fondamentale che tutto il flusso sia rivolto verso la metà inferiore della sfera luminosa (nel rispetto delle norme contro l'inquinamento luminoso) e per questo motivo al rendimento si preferisce il rendimento di flusso luminoso rivolto verso il basso, definito dal parametro  $D_{lor}$ .

L'efficienza luminosa viene calcolata come rapporto fra flusso luminoso diretto verso il basso e potenza assorbita dall'apparecchio, la quale è comprensiva di lampade, alimentatore, perdite, ecc..

In base a queste considerazioni, viene definito rendimento globale di un apparecchio di illuminazione:

$$\eta_a = \frac{\Phi_{sorgente} \cdot D_{lor}}{W_{reali}} = [lm/W]$$

dove  $\Phi_{sorgente}$  è il flusso luminoso della sorgente e  $W_{reali}$  è il consumo dell'intero sistema di illuminazione.

Il rendimento di un apparecchio illuminante a LED è leggermente al di sotto di un apparecchio tradizionale a scarica; le cose migliorano per potenze di lampada inferiore, ma peggiorano per potenze superiori.

### 5.1.3 Illuminazione di gallerie

La Norma di riferimento per la progettazione illuminotecnica delle strade è la UNI 11248 che definisce i parametri necessari per stabilire la categoria illuminotecnica di riferimento e di progetto per ogni tipologia di strada. La Norma di riferimento per la progettazione illuminotecnica delle gallerie è la UNI 11095. I principali obiettivi di un impianto d'illuminazione possono essere così riassunti:

- l'impianto di illuminazione deve garantire al guidatore una buona visibilità sia di giorno che di notte;
- il guidatore, nell'approccio all'ingresso della galleria, deve percepire la variazione delle condizioni di guida senza sviluppare una sensazione di incertezza;
- l'impianto deve garantire l'assenza di ombre e di abbagliamento diretto o riflesso.

L'ufficio Energia e Sicurezza di Autostrade per l'Italia gestisce la manutenzione e l'energia degli impianti di galleria ormai da diversi anni impegnandosi sempre di più nella ricerca di nuove tecnologie che puntino al risparmio energetico e riducano gli interventi di

manutenzione. Anche in questo caso, volendo utilizzare sorgenti luminose con resa cromatica superiore al 60% si è individuato il LED come la tecnologia con maggiore rendimento in assoluto tra le sorgenti a luce bianca.

Scelta la sorgente, è inoltre necessario realizzare un apparecchio illuminante che possa essere di uso immediato in sostituzione degli attuali al sodio già installati.

Pertanto le sue caratteristiche tecniche devono essere tali da permettere il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- piena compatibilità con le infrastrutture esistenti;
- tipologia di alimentazione uguale all'esistente;
- riduzione della potenza elettrica assorbita (risparmio energetico);
- aumento della vita utile della sorgente luminosa;
- riduzione dei cicli di manutenzione sull'impianto;
- aumento delle prestazioni illuminotecniche di impianto;
- aumento del comfort visivo.

Un esempio di lampada a LED utilizzata nell'illuminazione di gallerie è mostrato in figura 5.2.



Figura 5.2 : Apparecchio a fonti plurime per l'illuminazione di gallerie formato da otto elementi cilindrici in vetro al borosilicato con all'interno le piastre LED e i dissipatori termici. Gli elementi sono orientabili verso le pareti della galleria. Contengono moduli da sei LED con flusso luminoso 4688 lm (a 500 mA di corrente di pilotaggio) e 3250 lm (a 360 mA), potenza complessiva 60W (a 360 mA), temperatura di colore 5600 K.

La figura 5.3 mostra il confronto fra una galleria illuminata con lampade al sodio tradizionali e la stessa galleria illuminata con lampade a LED.



Figura 5.3

Facendo un confronto tra le due immagini è interessante notare come la tipologia del colore della luce, nel caso del LED, aumenti il comfort visivo facendo percepire maggiormente le caratteristiche dello scenario illuminato. Sempre dal confronto tra le immagini è importante mettere in evidenza la distribuzione della luce o, meglio, l'uniformità generale di

illuminamento. Si noti che nel caso dell'impianto a LED la luce sulle pareti è distribuita in modo uniforme con quella a terra, mentre nell'impianto al sodio il livello di illuminamento delle pareti è disuniforme e diverso da quello a terra.

Allo stato attuale gli apparecchi a LED vengono generalmente impiegati per la sola illuminazione della zona permanente, ovvero quella zona che ha origine dopo la zona di transizione (necessaria per adattare il sistema visivo del guidatore).

Ad oggi, gli elevati valori di luminanza richiesti per l'imbocco e la transizione non rendono economicamente vantaggioso l'impiego dello stato solido per queste zone, ma è ipotizzabile che in un futuro molto prossimo le leggi di mercato porteranno a una riduzione dei costi e quindi alla realizzazione di impianti in galleria "full LED".

## 5.2 Illuminazione di musei

Musei e gallerie d'arte sono illuminati, generalmente, miscelando una ben controllata quantità di luce naturale con la luce artificiale. Si tende di solito a ridurre la presenza di luce naturale proveniente da finestre, lucernari e altre aperture verso l'esterno, per proteggere le opere d'arte soprattutto dalle radiazioni infrarosse e ultraviolette e per offrire ai fruitori una visione corretta e confortevole.



Figura 5.4 : Rijksmuseum, Amsterdam, illuminato a LED

I danni più frequenti arrecati alle opere d'arte dalla luce e dalle radiazioni a essa associate (ultraviolette e infrarosse) sono:

- alterazione dei colori, ( scolorimento, ingiallimento);
- perdita di compattezza materica delle superfici verniciate, screpolature e cedimento;
- degrado strutturale con decremento della resistenza meccanica in vari tipi di supporti, in particolare quelli di origine organica ( carta, tessuto, legno, cuoio);
- le radiazioni infrarosse provocano il riscaldamento delle superfici con conseguenti dilatazioni e tensioni meccaniche.

Per proteggere le opere da questi effetti nocivi ci si affida al controllo di due parametri: il livello di illuminamento, cioè la quantità di luce che investe l'opera, (si veda la tabella 5.1) e l'esposizione energetica espressa come il prodotto di tre fattori: il valore in lux dell'illuminamento medio di esercizio, il tempo di esposizione alla luce in ore, un fattore correttivo, detto fattore di danno relativo, che tiene conto delle caratteristiche di aggressività delle radiazioni e della presenza di elementi di protezione, come vetri e filtri anti UV e IR (si veda la tabella 5.2).

Materiali	Illuminamento medio
Materiali estremamente sensibili alla luce: tessili, tappeti, arazzi, opere d'arte su carta, pitture non verniciate, disegni a pennarello	50 lux
Materiali moderatamente sensibili alla luce: pitture a olio e a tempera verniciate, affreschi, materiali organici come avorio, ossa	150 lux
Materiali relativamente insensibili alla luce: metalli, pietre, ceramiche, vetri	Oltre 300 lux

Tabella 5.1 : Valori medi di illuminamento raccomandati

Tipi di materiali	Esposizione energetica massima (lux per ora/anno)
Materiali estremamente sensibili alla luce	50000
Materiali moderatamente sensibili alla luce	500000

Tabella 5.2 : Valori massimi ammissibili dell'esposizione energetica in lux ora/anno

Inoltre le radiazioni di corta lunghezza d'onda sono le più aggressive.

L'assenza di UV nelle emissioni dei LED e l'impiego di modelli a bassa temperatura di colore (2900-3000 K, poca energia nelle radiazioni della regione spettrale del blu) consente di mantenere bassi i valori del fattore di danno.

I LED risultano vantaggiosi in questo tipo di illuminazione anche per i loro ingombri ridotti: con le piccole dimensioni delle fonti luminose si riesce a ridurre fortemente il tasso di invasività dell'impianto. Ogni operazione di integrazione, mascheramento, occultamento, risulta facilitata.

Inoltre, grazie alla possibilità di usare i LED in aggregazioni modulari, si ha in pratica a disposizione una serie di fonti, ciascuna fornita di una propria ottica secondaria che è possibile orientare verso specifiche zone dell'opera.

Componendo con cura i singoli fasci luminosi sui piani di incidenza si ottiene la giusta uniformità degli illuminamenti, oppure i contrasti desiderati. Il primo è il tipico caso dell'opera pittorica su tela, tavola, carta, oppure su parete o ad affresco che deve essere perfettamente visibile in tutta la sua estensione, senza aloni scuri o striature. Il secondo è il caso dell'opera scultorea, dell'oggetto o del reperto archeologico in cui, grazie alle ombre, è possibile restituirne la plasticità e le volumetrie.

L'esatto orientamento dei fasci, inoltre, permette di evitare l'effetto disturbante delle cosiddette riflessioni velanti. È necessario, infatti, controllare che nessuna superficie ad alta luminescenza proietti raggi direttamente verso gli osservatori, oppure nei loro possibili campi di osservazione, provocando abbagliamenti diretti o riflessi.

Infatti, tutte le superfici lucide e levigate (vetri, metalli, pietre, ceramiche, tele dipinte ad olio) hanno un comportamento ottico di tipo semispeculare, ovvero si comportano in modo simile agli specchi rinviando per riflessione la luce ricevuta dalle fonti luminose verso gli osservatori. Nasce così il cosiddetto effetto velo, dovuto alle riflessioni semispeculari, cioè

un'annebbiatura di zone del campo visivo con conseguente riduzione o annullamento dei contrasti e impedimento della visione. È il tipico caso che si verifica con le opere pittoriche protette da lastre di vetro oppure con oggetti contenuti in vetrine e in bacheche protette da lastre trasparenti. Se la luminanza dell'opera è inferiore alle luminanze delle superfici che sono poste di fronte o intorno ad essa, nel cosiddetto volume d'offesa, insorge un effetto velo più o meno pronunciato.

In molti casi il controllo delle riflessioni velanti è reso difficoltoso dall'impossibilità di collocare le fonti di luce al di fuori del volume d'offesa a causa degli ingombri degli apparecchi di illuminazione: è un ulteriore caso in cui l'impiego di sorgenti dai minimi ingombri, quali i LED, si rivela una scelta vincente.

### **5.3 Illuminazione di centri commerciali**

All'interno dei centri commerciali, la tecnologia LED trova applicazione, per esempio, nei supermercati e nei negozi.

Per quanto riguarda l'illuminazione di un supermercato, affinché i messaggi siano immediatamente captati e percepiti è fondamentale il ruolo della luce, con livelli calcolati, giusta temperatura di colore ma soprattutto resa cromatica e, in certi casi, con l'ausilio della luce colorata per richiamare l'attenzione in certe aree. La luce colorata, infatti, è idonea a segnare alcune zone o espositori attirando l'attenzione su certi punti. È dimostrato che l'utilità del colore sta anche in questo: può far decrescere il livello di illuminamento richiesto, ossia il soddisfacimento che l'occhio ha con il colore compensa un minore illuminamento; la luce d'accento può essere ridotta del 60% e produrre la stessa risposta.

I criteri che danno origine ai supermercati di nuova generazione richiedono al progettista lighting designer di:

- Illuminare per creare emozione;
- Creare più accenti, più contrasti;
- Simulare la luce naturale;
- Utilizzare diverse sorgenti luminose combinate in un unico sistema;
- Utilizzare luce integrata ( pareti luminose, apparecchi inseriti nel controsoffitto o nel pavimento);
- Utilizzare corpi illuminanti piccoli, ecologici;
- Prestare massima attenzione alla gestione della luce e alla luce dinamica;
- Prestare massima attenzione ai fattori di danneggiamento, calore e vita delle lampade.

La CEI 64-51 guida alla esecuzione degli impianti elettrici nei centri commerciali e a tal fine suggerisce livelli indicativi di illuminamento: aree vendita >700 lux, casse >500 lux, lavorazioni >400/500 lux. Tuttavia, ci sono raccomandazioni interne recenti dettate da chi opera specificatamente nel settore volutamente superiori ai requisiti minimi indispensabili: aree vendita 800 lux, ambientazioni in aree vendita 900/1000 lux, casse 700 lux, ecc.

Se gli standard relativi ai livelli di illuminamento delle gallerie commerciali richiedono infatti livelli medi di illuminamento intorno ai 400 lux, nel caso degli ipermercati che si trovano al loro interno, è giusto partire da livelli superiori, per fare sentire il contrasto e la differenza d'uso tra i due differenti spazi.

La tecnologia LED all'interno dei supermercati si è cominciata a sperimentare con successo nel caso di frigoriferi e congelatori da esposizione, distribuendo un sistema a LED su ogni ripiano, in modo da illuminare direttamente la merce. Se pensiamo che i rendimenti del LED sono in continuo aumento, il loro costo in diminuzione, che i refrigeratori commerciali all'interno dei supermercati consumano oltre il 50% dell'energia totale utilizzata nei supermercati e che la luce di questi oltre il 15%, si può comprendere come questa tecnologia venga utilizzata sempre di più.

Essa è vantaggiosa per una serie di motivi: innanzitutto, quanto meno calore viene irradiato direttamente dall'illuminazione, tanto minore sarà l'energia necessaria per raffreddare i prodotti e sappiamo che i LED, a confronto con altre sorgenti luminose, producono meno calore. Inoltre, grazie ai minimi ingombri, si ottiene una buona uniformità nei singoli vani degli espositori.

Infine, l'illuminazione con IR e UV ridotti protegge gli alimenti e gli imballaggi e la riproduzione naturale del colore assicura che il cliente riceva una buona impressione dai prodotti sensibili al calore.

È sufficiente pensare, ad esempio, all'illuminazione di carni e affettati: si utilizzano tecniche che producono un calore minimo, evitando così alla carne e agli affettati di diventare grigiastri e di perdere colore e agli altri prodotti freschi di seccarsi. I prodotti freschi non solo vengono protetti nel tempo, ma assumono un aspetto che invita ad assaggiarli.



Figura 5.5 : illuminazione a LED del banco frigo di un supermercato

Per quanto riguarda l'illuminazione dei negozi, l'illuminazione generale svolge due funzioni importanti: la prima è quella di orientare i clienti all'interno del negozio, la seconda è quella di stimolare le vendite con la giusta luce. Infatti, una perfetta illuminazione di vetrine rappresenta una componente fondamentale nell'impostazione di design di qualunque negozio: cattura gli sguardi e attrae i potenziali clienti. Oltre ai prodotti esposti e agli arredi del negozio, è l'illuminazione ad attirare l'attenzione verso il negozio e ad assicurare che i potenziali clienti ne varchino la soglia.

L'illuminazione per mensole ed espositori attira l'attenzione dei clienti sulle aree di presentazione e sulle teche e per evidenziare i dettagli più importanti, quali il colore e le strutture, e presentare i prodotti nella loro luce migliore, si utilizzano effetti sofisticati.

La tecnologia a LED utilizzata in questo settore garantisce un basso consumo di corrente e un ridotto affaticamento termico. La lunghissima durata, i bassi costi di manutenzione e la resa del colore da buona a eccellente rendono questi apparecchi particolarmente interessanti per tutte le forme di illuminazione delle vetrine e degli scaffali di esposizione.

## Capitolo 6

# Conclusione : tecnologie di illuminazione a confronto

Giunta al termine di questa tesina è utile fare un breve confronto tra le diverse tecnologie di illuminazione, al fine di evidenziare vantaggi e svantaggi delle diverse tecniche e in modo da mettere in evidenza come i LED siano certamente la lampadina del futuro.

Le lampade più comuni sono:

- Lampada ad incandescenza (tradizionali e alogena);
- Lampade fluorescenti compatte (CFL);
- Lampade a ioduri metallici;
- Lampade a vapori di sodio ad alta pressione (SAP) e a bassa pressione;
- LED.

Le **lampade ad incandescenza** sono il più comune apparecchio di illuminazione domestica che per oltre un secolo ha dominato il settore dell'illuminazione. A partire dal settembre 2012 la configurazione tradizionale è stata eliminata dal mercato a favore di quelle a basso consumo energetico. Questo non riguarda invece la configurazione alogena in quanto presenta buoni valori di efficienza. La lampada ad incandescenza tradizionale, infatti, è caratterizzata da una scarsa efficienza: basta pensare che soltanto il 5% dell'energia spesa viene trasformata in luce, mentre il restante 95% si disperde sotto forma di calore, inoltre ha una scarsa durata (circa 1.000 ore). Invece, la lampada ad incandescenza alogena, che costituisce una versione evoluta della tecnologia ad incandescenza, presenta una durata almeno doppia rispetto alle prime.



Figura 6.1 :  
Lampada ad incandescenza

Esse sono molto diffuse negli edifici domestici, per l'illuminazione degli interni, ma sono utilizzate anche per illuminare interni di grandi dimensioni, come impianti sportivi, oppure anche per gli esterni, come le facciate di edifici.

Le **lampade fluorescenti compatte (CFL)** sono tra le più comuni tecnologie di illuminazione efficiente, diffuse soprattutto in ambito domestico. Rispetto alle tradizionali lampadine a incandescenza, hanno una migliore efficienza luminosa e una durata media dieci volte superiore (10.000 ore anziché 1.000). La possibilità di scegliere tra una vasta gamma di tonalità di colore, permette di applicarle nei contesti più diversi.



Figura 6.2: Lampada CFL

Per sostituire una lampada a incandescenza tradizionale da 100 W, è sufficiente una fluorescente compatta da 20-25 W. Questo corrisponde, in termini energetici ed economici, ad un risparmio netto del 75-80%.

L'utilizzo delle fluorescenti compatte è particolarmente conveniente in tutti quegli ambienti interni, come ad esempio la cucina e la sala da pranzo, in cui la luce rimane accesa per diverse ore al giorno e in maniera quanto più continuata. Infatti, un elevato numero di accensioni e spegnimenti (oltre le 10 volte al giorno) abbassa notevolmente la durata di vita di queste lampade.

Le **lampade a ioduri metallici** hanno dimensioni ridotte, simili alle alogene, ma con un'efficienza e una durata di vita paragonabili a quelle delle lampade fluorescenti. Sono caratterizzate da un'alta temperatura di colore (luce bianchissima) e da un'elevata resa cromatica.

Il loro principale svantaggio è la lentezza in fase di accensione: impiegano infatti circa 5 minuti per arrivare a pieno regime. E in caso di spegnimento e di riaccensione a caldo, i tempi aumentano ulteriormente, fino a 10 minuti per recuperare interamente il flusso luminoso. Questi aspetti problematici sono dovuti ai complessi dispositivi che ne regolano l'accensione e l'innesco.

Queste caratteristiche le rendono adatte per illuminare grandi spazi, sia interni che esterni, attraverso l'utilizzo di proiettori. Sono utilizzate negli showroom, negli spazi industriali e commerciali, ma trovano importanti applicazioni anche negli impianti sportivi, negli spazi pubblici all'aperto e in generale in tutti quegli ambiti in cui la qualità e la nitidezza della luce sono fattori essenziali.

Le **lampade a vapori di sodio** sono impiegate principalmente nell'illuminazione stradale, industriale e più in generale degli spazi esterni. Mentre la tecnologia ad alta pressione rappresenta ormai lo standard per l'illuminazione stradale, diversamente le lampade ai vapori di sodio a bassa pressione vengono utilizzate in tutti quei casi in cui il risparmio energetico risulta decisamente più importante della resa cromatica.

Le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione costituiscono l'evoluzione della tecnologia ai vapori di sodio a bassa pressione. Rispetto a queste ultime, le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione consentono una migliore distinzione dei colori, mantenendo alti livelli di efficienza luminosa. Invece le lampade ai vapori di sodio a bassa pressione hanno dei livelli imbattibili di efficienza luminosa (fino a 200 lumen/watt) ed emettono una caratteristica luce monocromatica, con tonalità molto calda, tendente al giallo-arancione. L'utilizzo di tali lampade è ideale in tutti quei contesti in cui serve illuminare risparmiando energia, ma in cui la qualità della resa cromatica non è l'obiettivo primario. Pur emettendo una luce di scarsa



Figura 6.3 :  
Lampada a ioduri metallici



Figura 6.4 : Lampada a vapori di sodio

qualità, esse hanno ancora una certa diffusione, infatti, dal punto di vista dell'efficienza luminosa, possono essere considerate come una delle migliori tecnologie disponibili sul mercato.

In tabella 6.1 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi per ogni tipologia di lampada analizzata.

Tipo di lampada	Vantaggi	Svantaggi
Incandescenza tradizionale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo molto basso</li> <li>• Ottima resa cromatica</li> <li>• Semplicità di installazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scarsa efficienza</li> <li>• Breve vita media</li> </ul>
Incandescenza alogena	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durata superiore alle tradizionali lampade a incandescenza (2.000-4.000 ore)</li> <li>• Ottima temperatura di colore, anche superiore ai 3.000 K</li> <li>• Ottima resa cromatica</li> <li>• Possibilità di regolare e variare il flusso luminoso</li> <li>• Dimensioni ridotte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minore efficienza rispetto alle fluorescenti</li> <li>• Riscaldamento del bulbo</li> </ul>
Fluorescenti compatte (CFL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risparmio energetico</li> <li>• Elevata efficienza luminosa</li> <li>• Ampia gamma di tonalità di luce</li> <li>• Lunga durata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo iniziale</li> <li>• Necessità di un alimentatore (solo se non integrato)</li> </ul>
Ioduri metallici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risparmio energetico</li> <li>• Ottima resa cromatica</li> <li>• Luce bianca e brillante</li> <li>• Dimensioni ridotte</li> <li>• Lunga durata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accensione lenta</li> <li>• Adozione di dispositivi per l'accensione e l'innesco</li> </ul>
Vapori di sodio a bassa pressione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevatissima efficienza luminosa</li> <li>• Lunga durata</li> <li>• Risparmio energetico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nessuna resa cromatica</li> <li>• Accensione lenta</li> </ul>
Vapori di sodio ad alta pressione (SAP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ottima efficienza luminosa</li> <li>• Lunga durata</li> <li>• Risparmio energetico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resa cromatica non ottimale</li> </ul>
LED	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevatissima durata</li> <li>• Assenza di manutenzione</li> <li>• Assenza di sostanze pericolose</li> <li>• Accensione a freddo immediata</li> <li>• Resistenza agli urti e alle vibrazioni</li> <li>• Dimensioni ridotte</li> <li>• Flessibilità di installazione</li> <li>• Possibilità di regolare la potenza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo iniziale</li> <li>• Efficienza luminosa con margini di miglioramento</li> </ul>

Tabella 6.1: diverse tipologie di lampada a confronto

A parità di luce emessa, i **LED** permettono di risparmiare fino al 90% di elettricità rispetto a una lampada a incandescenza. Hanno una durata di vita praticamente imbattibile (30.000-100.000 ore), che è almeno 5-10 volte più lunga rispetto alle più efficienti lampade fluorescenti compatte disponibili sul mercato.

Tra le tante caratteristiche positive dei LED abbiamo visto l'accensione immediata e l'assenza di sostanze chimiche pericolose (come ad esempio il mercurio), che ne consentono lo smaltimento indifferenziato.



Figura 6.5 : Lampada a LED

Inoltre, le ridottissime dimensioni dei singoli LED costituiscono un grande vantaggio impiantistico. E' infatti possibile adattarli facilmente a qualsiasi esigenza progettuale, per realizzare corpi o superfici luminose caratterizzate dai più diversi effetti cromatici.

Le **lampade a LED** possono sostituire le lampade a incandescenza da 25-40 W, con risparmi in fase di esercizio che si aggirano attorno all'80-90%.

Tuttavia attualmente presentano due grandi svantaggi. Il primo è l'alto costo, anche se è destinato a decrescere nel tempo: per il momento il LED non viene molto utilizzato nelle case private proprio perché i prezzi sono ancora troppo alti e seppur ampiamente ammortizzabili grazie a ridotti consumi scoraggiano i consumatori, l'offerta nei negozi è ancora scarsa e non regge la concorrenza delle CFL, sempre più economiche e migliorate in prestazioni.

Inoltre i LED a luce bianca, per l'illuminazione di interni, hanno un'efficienza luminosa molto bassa, non superiore ai 10-20 lumen/watt, quindi è difficile ottenere un'illuminazione diffusa.

Non sono quindi ancora confrontabili con le lampade fluorescenti, che presentano una maggiore efficienza luminosa e hanno un prezzo inferiore, ma il futuro delle lampade a LED è considerato da tutti molto promettente: costruttivamente semplici, robuste, versatili, probabilmente sostituiranno le lampade fluorescenti se solo il progresso tecnologico potrà aumentare ulteriormente l'efficienza o la potenza e ridurre sufficientemente il costo.

Infatti se le CFL sono state una rivoluzione rispetto alle vecchie lampadine a incandescenza, tutti sono d'accordo nel dire che il prossimo capitolo della storia dell'illuminazione avrà per protagonisti i LED. Ci si può aspettare, quindi, che i LED diventeranno il principale dispositivo di illuminazione ad alta efficienza energetica nei prossimi anni, prendendo il posto delle tecnologie esistenti.

# Riferimenti

- E. F. Schubert, “Light Emitting Diodes”, Cambridge University Press, 2006.
- Kitai, “Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes”, Wiley, 2011
- S. Nakamura and S. F. Chichibu, “Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes”, CRC PRESS, 2000
- G. Held, “Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications”, CRC Press, 2009
- G.Forcolini, “Illuminazione LED”, Hoepli, 2008
- P.Palladino, “Manuale di illuminazione”, Tecniche nuove, 2005
- [www.osram.it](http://www.osram.it)
- [www.philips.it](http://www.philips.it)
- [www.qualenergia.it](http://www.qualenergia.it)
- [www.ruggiu.com](http://www.ruggiu.com)
- [www.disano.it](http://www.disano.it)
- [www.sonepar.it](http://www.sonepar.it)
- [www.betalux.it](http://www.betalux.it)
- [www.dlightsrl.it](http://www.dlightsrl.it)
- <http://cielobuio.org>
- [www.euroled.it/i\\_led.html](http://www.euroled.it/i_led.html)
- <http://megamanlighting.com>
- <http://online.stradeeautostrade.it/articolo/000010021524001>
- [www.voltimum.it](http://www.voltimum.it)
- <http://it.emcelettronica.com>
- [www.microst.it/tutorial/reg\\_switching.htm](http://www.microst.it/tutorial/reg_switching.htm)
- [www.verbatimlighting.com/article/VxRGB-violet-chip-technology](http://www.verbatimlighting.com/article/VxRGB-violet-chip-technology)
- [www.nextville.it/Lampade/22](http://www.nextville.it/Lampade/22)

