

Università degli Studi di Padova
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione

tesi di laurea

Illuminazione allo stato solido

lavoro di approfondimento
corso di Elettronica

Relatore: Gaudenzio Meneghesso

Laureando: Enrica Rossi

30 settembre 2013

Sommario

Questa tesi, prima di analizzare nello specifico i LED, propone una descrizione generale delle fonti di illuminazione in commercio e le mette a confronto; per fare questo vengono definiti alcuni parametri che permettono di comprendere quali siano i requisiti importanti per una lampada in base alle situazioni in cui viene impiegata. Successivamente vengono descritti i principi di funzionamento dell'illuminazione allo stato solido a partire dall'analisi di una giunzione p-n e dei dispositivi ad alta luminosità ottenuti da perfezionamenti dei LED tradizionali. L'ultima sezione riguarda alcune applicazioni delle nuove tecnologie presentate.

Indice

Sommario	3
1 Introduzione	1
2 CAPACITÀ VISIVA, FOTOMETRIA E COLORIMETRIA	3
2.1 CENNI SULLA VISTA DELL'UOMO	3
2.2 FOTOMETRIA	3
2.3 COLORIMETRIA	6
2.4 RESA DEL COLORE	14
3 LAMPADINE	17
3.1 LAMPADE A INCANDESCENZA	17
3.2 LAMPADE ALOGENE	18
3.3 LAMPADE FLUORESCENTI	20
3.4 LAMPADE A SCARICA	24
3.5 LAMPADE A LED	27
4 ILLUMINAZIONE ALLO STATO SOLIDO	31
4.1 PRESTAZIONI DI UN LED	31
4.2 RICOMBINAZIONE DI ELETTRONI E LACUNE	32
4.3 LED AD ALTA LUMINOSITÀ	43
4.4 ESTRAZIONE DI LUCE DAI LED	46
4.5 LAMPADE BIANCHE ALLO STATO SOLIDO	51
4.6 APPLICAZIONI DELL' ILLUMINAZIONE ALLO STATO SOLIDO	57
4.7 CONCLUSIONI	62
Bibliografia	63
Elenco delle tabelle	67
Elenco delle figure	68

Capitolo 1

Introduzione

L'esigenza di ridurre il consumo di energia è strettamente legata alla necessità di salvaguardare l'ambiente da materiali inquinanti: un esempio in questo senso è la produzione di luce a partire dall'energia elettrica.

L'energia utilizzata per l'illuminazione rappresenta il 14 % dell'energia totale prodotta in Europa e il 19 % dell'energia globale prodotta nel mondo, con un consumo mondiale di 6 mila miliardi di kWh all'anno. Se si riuscisse a ridurre del 10 % tale consumo la produzione di CO_2 diminuirebbe di 36 milioni di tonnellate in un anno.

I LED (Light Emitting Diode) rappresentano una forte speranza in questa direzione: essi, inoltre, sono facilmente controllabili perché la luce emessa è direttamente proporzionale alla corrente che li attraversa e, anche se hanno una frequenza di accensione-spegnimento pari a 100 Hz, lo sfarfallio che ne consegue non è percepibile dall'occhio umano.

Gli obiettivi principali che ci si è proposti di raggiungere con l'utilizzo di queste lampade allo stato solido sono:

- fino all' 80 % di risparmio energetico a pari prestazioni, rispetto alle lampade a incandescenza;
- bassi costi di mantenimento e sostituzione, con 45 mila ore di funzionamento continuo;
- luce neutra: assenza di raggi UV e infrarossi, gli oggetti illuminati dai LED non vengono alterati dalla luce emessa;
- facilità di installazione per poter sostituire facilmente le lampade tradizionali.

I LED vengono utilizzati nei più svariati campi di interesse: dall'elettronica (indicatori, spie, display...) ai PC e in quest'ultimo caso oltre ai comuni LED colorati (rosso, verde, giallo) si assiste sempre di più all'uso di LED innovativi, come quelli ad alta luminosità, oppure con emissione UV. Anche i diodi laser

dei puntatori possono essere assimilati a LED; quindi questi dispositivi hanno un impiego decisamente vasto.

Prima di analizzare le principali tipologie di sorgente oltre ai LED vengono introdotti di seguito alcuni parametri utili in tutto l'ambito dell'illuminazione.

Capitolo 2

CAPACITÀ VISIVA, FOTOMETRIA E COLORIMETRIA

2.1 CENNI SULLA VISTA DELL'UOMO

Il primo passo che permette all'occhio umano di osservare ciò che lo circonda avviene quando l'immagine è proiettata sulla retina: questa comprende i recettori (cellule rivelatrici) che convertono l'energia luminosa in impulsi nervosi.

I recettori sono di due tipi: coni e bastoncelli; i primi sono i più sensibili e giocano un ruolo importante nella visione notturna, quando l'occhio si adatta al buio (visione scotopica). D'altro canto essi non permettono di distinguere i colori perché contengono un solo tipo di fotopigmento e per questo sono concentrati nella zona periferica della retina. Se si è in presenza di luce sufficiente, invece, la risposta dei coni è satura e la vista è possibile grazie ai bastoncelli (visione fotopica).

Lo spettro della sensibilità scotopica ha il picco nella regione tra il blu e il verde a una lunghezza d'onda di 507 nm nell'aria; invece per quanto riguarda la sensibilità fotopica il picco è tra il giallo e il verde alla lunghezza d'onda di 555 nm, sempre nell'aria. La maggior parte delle attività umane richiede l'uso della visione fotopica.

Nel 1924 La Commissione Internazionale per l'Illuminazione (CIE) introdusse la funzione di efficienza luminosa relativa $V(\lambda)$ per la visione fotopica e nel 1951 una funzione simile $V'(\lambda)$ per quella scotopica (Figura 2.1).

2.2 FOTOMETRIA

La luce è radiazione elettromagnetica. La *radiometria* misura grandezze associate all'energia radiante: queste grandezze (radianti) utilizzano unità di misura

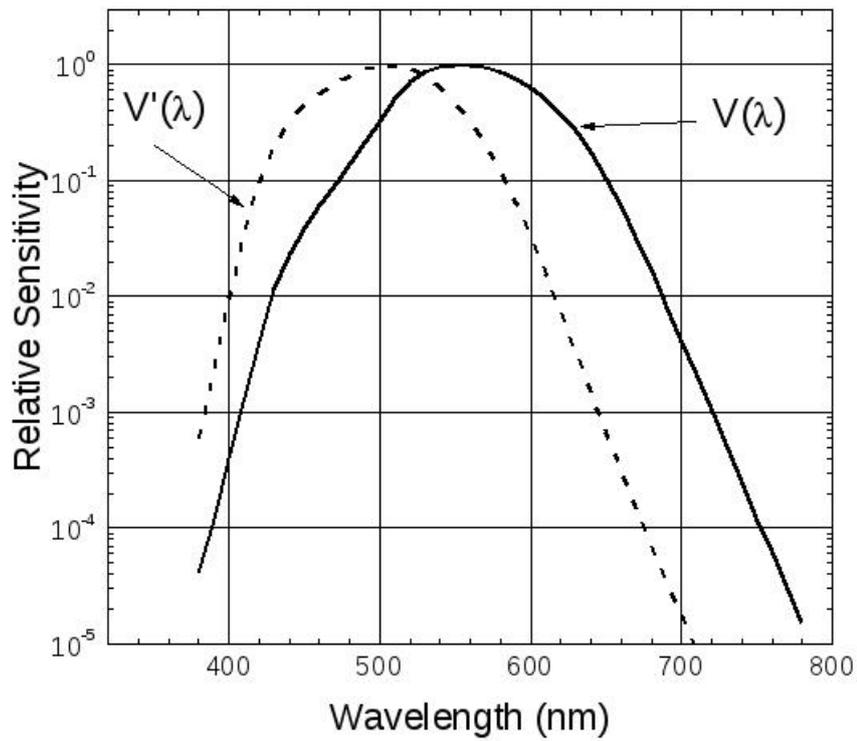


Figura 2.1: Sensibilità spettrale normalizzata: $V(\lambda)$, vista fotonica (coni: rossi verdi o gialli), ambiente luminoso; $V'(\lambda)$, vista scotopica (bastoncelli), ambiente buio.

che fanno riferimento all'energia: i joules.

- Il *flusso radiante* ϕ_e indica l'energia radiante nell'unità di tempo e si misura in watt;
- l'*intensità radiante* $I_e = d\phi_e/d\omega$, (W/sr) è il flusso radiante per unità di angolo solido in una data direzione.

La *fotometria* riguarda il senso visivo di luminosità della nostra vista, attivato dalla luce, cioè essa riguarda la risposta dell'occhio umano alla radiazione che lo investe.

- Il *flusso luminoso* ϕ_ν è legato alla densità spettrale di potenza $S(\lambda)$, cioè alla densità spettrale del flusso radiante $\phi_{e\lambda} = d\phi_e/d\lambda$, attraverso la funzione di efficienza luminosa $V(\lambda)$ ed è misurato in lumen (lm):

$$\phi_\nu = 683 \text{ lm/W} \times \int \phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda.$$

L'integrale dev'essere esteso a tutto lo spettro del visibile così da sommare l'emissione luminosa in tutte le direzioni.

- Quindi l'*intensità luminosa* I_ν , unità di misura la candela (cd), è il flusso luminoso di una sorgente puntiforme per unità di angolo solido:

$$I_\nu = d\phi_\nu/d\omega = 683 \text{ lm/W} \times \int I_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda,$$

dove $I_{e\lambda} \equiv dI_e/d\lambda$ è la densità spettrale dell'intensità radiante.

- Il concetto di intensità luminosa non è direttamente applicabile a una sorgente estesa; per questo si introduce la *luminanza*, che è il flusso luminoso che si propaga da un elemento di superficie dA e osservato all'angolo θ per unità di angolo solido:

$$L = d^2\phi_\nu/(d\omega dA \cos\theta) \equiv dI_\nu/dA',$$

con dA' l'area proiettata nella direzione dell'osservazione. La luminanza è misurata in candele per metro quadro (cd/m^2). Le sorgenti con una luminanza elevata appaiono più brillanti. Il sole, per esempio, visto dal livello del mare, esibisce una luminanza media di $1.6 \times 10^9 \text{ cd/m}^2$, mentre la luna approssimativamente 2500 cd/m^2 .

- L'aspetto luminoso di un oggetto che non emette radiazione, ma la riflette, dipende dalla radiazione stessa: una misura della capacità di provocare una sensazione visiva è l'*efficacia luminosa*, che si misura in lm/W ;

$$K = \frac{\phi_\nu}{\phi_e} = 683 \text{ lm/W} \times \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda)S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda) d\lambda}$$

Si noti che l'efficacia luminosa caratterizza la radiazione emessa piuttosto che la sorgente. Vengono introdotte di seguito due grandezze che permettono di capire quanto efficientemente una sorgente converta l'energia in luce.

- L'*efficienza radiante* indica la capacità della sorgente di convertire la potenza consumata P in flusso radiante; essa può variare tra 0 e 1:

$$\eta_e = \phi_e/P.$$

- L'*efficienza luminosa* è la capacità della sorgente di convertire la potenza consumata in attivazione della vista e si misura in lm/W :

$$\eta_\nu = \phi_\nu/P \equiv \eta_e \times K.$$

- Le applicazioni pratiche dell'illuminazione spesso utilizzano l'*illuminamento*, cioè la densità di flusso luminoso incidente su una superficie:

$$E = d\phi_\nu/dA = I_\nu \cos\theta/r^2.$$

dA è l'elemento di superficie, θ l'angolo di incidenza e r la distanza da una sorgente puntiforme al piano illuminato. L'unità di misura è il lumen per metro quadrato, chiamato anche lux (lx). Più questa grandezza aumenta, più l'occhio umano riesce a distinguere i dettagli, i piccoli contrasti e le tonalità dei colori. Un esempio: il sole genera un illuminamento sulla superficie terrestre che varia tra 10^4 e 10^5 lx, mentre la luna non supera 0.1 lx.

2.3 COLORIMETRIA

La colorimetria riguarda tutto ciò che si può misurare del colore: la sensazione del colore è molto più complicata di quella di luminosità.

Una descrizione numerica può essere data solo basandosi su un modello che tenta di essere il più vicino possibile alla reale percezione visiva dell'uomo. Uno tra i risultati ottenuti nelle ricerche sulla percezione visiva sono i *valori tristimolo*: molti colori, infatti, possono essere imitati accuratamente con la combinazione di tre colori primari (tristimoli) come rosso [R], verde [G] e blu [B]. Purtroppo però alcuni colori quasi monocromatici sono difficili da rappresentare solo con quantità positive di questi valori e ne richiedono quantità negative.

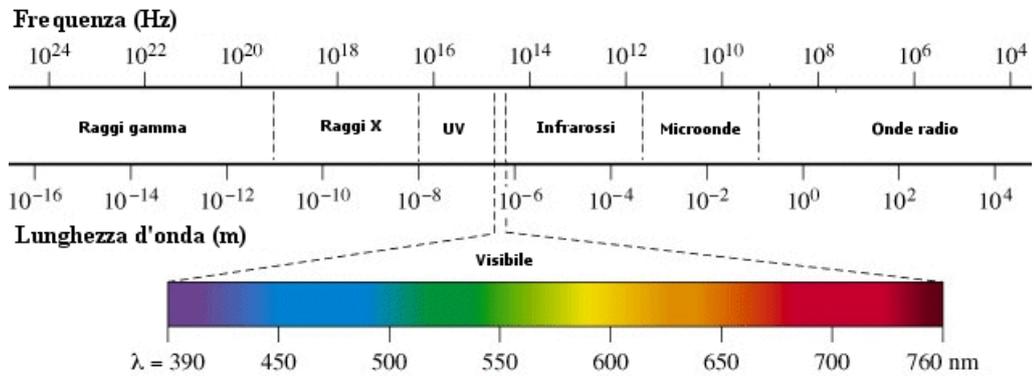


Figura 2.2: Spettro elettromagnetico.

TYPE OF ACTIVITY	ILLUMINANCE ($lx = lumen/m^2$)
Orientation and simple visual tasks (public spaces)	30-100
Common visual tasks (commercial, industrial and residential applica- tions)	300-1000
Special visual tasks (including those with very small or very low contrast critical elements)	3000-10000

Tabella 2.1: Range di illuminamento consigliati per i diversi tipi di attività.

Tale inconveniente è stato risolto introducendo stimoli immaginari [X], [Y] e [Z] (si tratta di tinte ipersature, non visibili all'occhio umano). I valori tristimolo X, Y e Z (la quantità di ogni stimolo in un colore è rappresentata da una certa *Spectral Power Distribution* SPD $S(\lambda)$ che è la distribuzione di potenza per unità di lunghezza d'onda nello spettro del visibile) sono ottenuti utilizzando le *color-matching functions* $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ in questo modo (esse rappresentano la quantità di un colore necessaria per riprodurre la percezione cromatica di una luce in funzione della frequenza; descrivono, cioè, numericamente la percezione del colore di un osservatore standard):

$$X = \int \bar{x}(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

Le corrispondenze tra i valori X, Y e Z e le lunghezze d'onda dello spettro sono:

X : rosso violaceo ipersaturo contraddistinto da due picchi nello spettro cromatico intorno ai 450 nm e ai 600 nm;

Y : verde ipersaturo con lunghezza d'onda dominante di 520 nm: la tinta Y ha un andamento proporzionale alla sensibilità dell'occhio alla luminosità delle tinte;

Z : 477 nm.

Per praticità sono state definite le *coordinate cromatiche*; poiché l'occhio umano ha tre tipi di sensori del colore che rispondono a diversi ranges di lunghezza d'onda, sarebbe necessario un grafico in tre dimensioni per rappresentare tutti i colori del visibile.

Tuttavia si può descrivere il colore tramite due soli parametri trascurando la luminanza e utilizzando invece le coordinate x e y che mappano il colore in base a tonalità e saturazione (in questo modo ogni colore dello spazio bidimensionale che ne deriva può avere una luminanza che varia dal bianco al nero). Ciò che viene fatto è, cioè, una normalizzazione delle tinte, in modo che la somma sia sempre pari a 1; se X, Y e Z rappresentano un colore e le coordinate sono:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

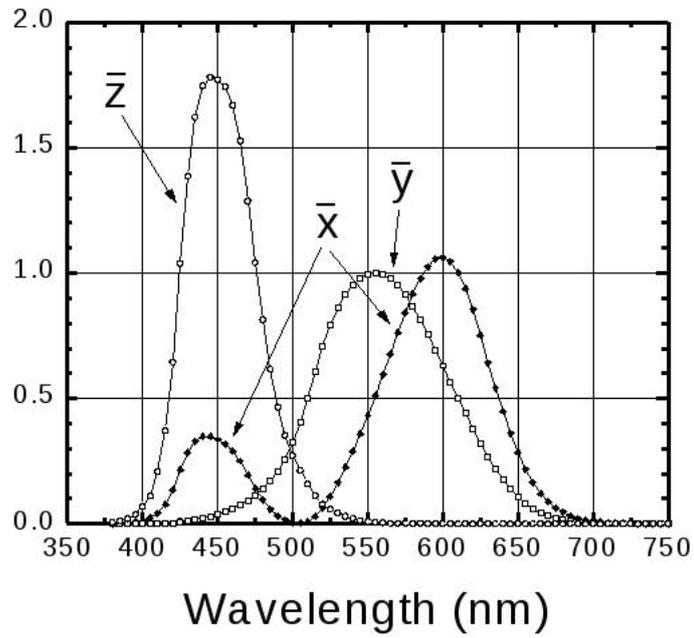


Figura 2.3: 1931 CIE color-matching functions: porpora \bar{x} ; verde \bar{y} ; blu \bar{z} .

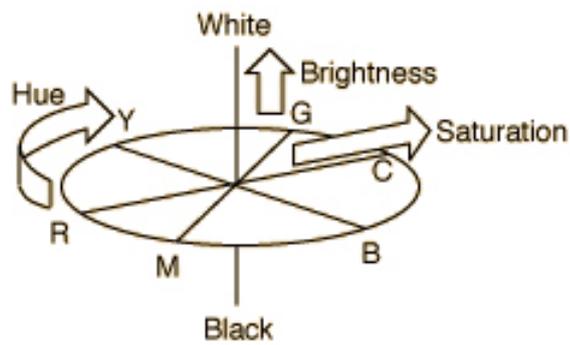


Figura 2.4: I tre attributi del colore: tinta, saturazione e luminosità.

La terza coordinata non aggiunge informazione poiché $x + y + z = 1$:

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

Per avere un'idea più chiara di cosa rappresentino le coordinate si osservi la figura 2.3.

Ora mostriamo il diagramma cromatico costruito dalla CIE per studiare quanto più oggettivamente possibile la percezione visiva:

- In figura 2.5 si può vedere il diagramma cromatico della CIE del 1931 dove sono selezionate le zone corrispondenti ai vari colori; lungo il perimetro troviamo i colori monocromatici con saturazione massima, che decresce verso l'interno fino ad arrivare alla luce bianca. Il punto evidenziato al centro è quello con $x = y = \frac{1}{3}$, detto punto acromatico. Il *luogo plankiano* è l'insieme dei punti del diagramma cromatico che appartengono allo spettro del corpo nero alle diverse temperature. La figura mostra in particolare il triangolo all'interno del quale si trovano i colori creati a partire soltanto da rosso blu e verde; tra questi sono visibili all'occhio umano solo quelli all'interno della figura curvilinea.

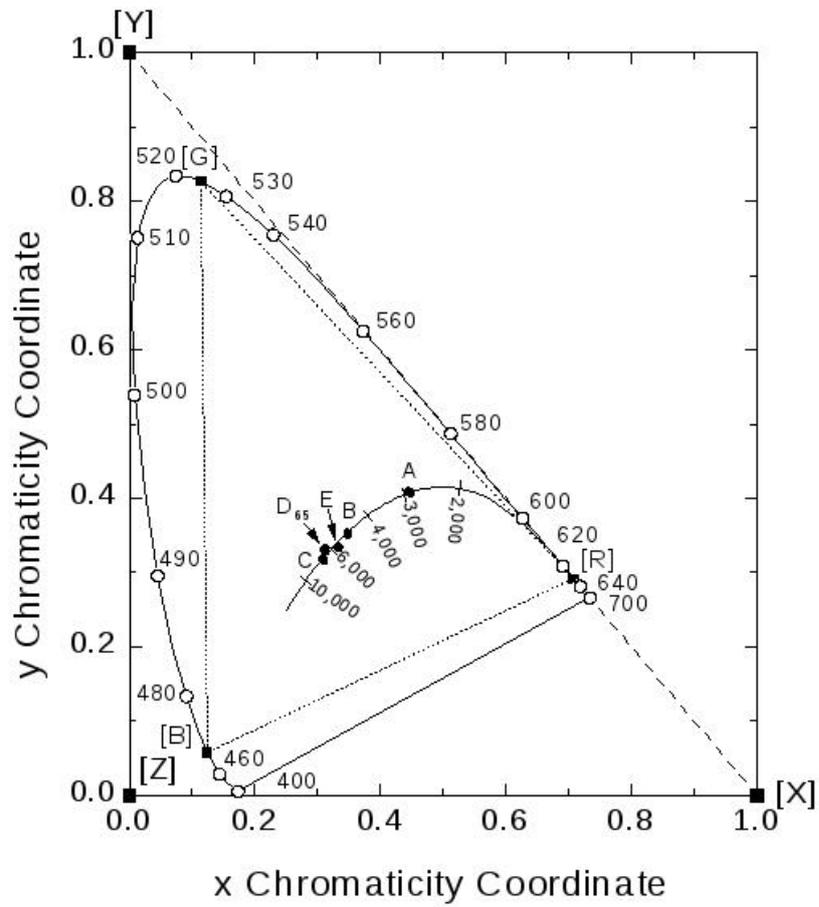


Figura 2.5: Diagramma cromatico CIE, 1931.

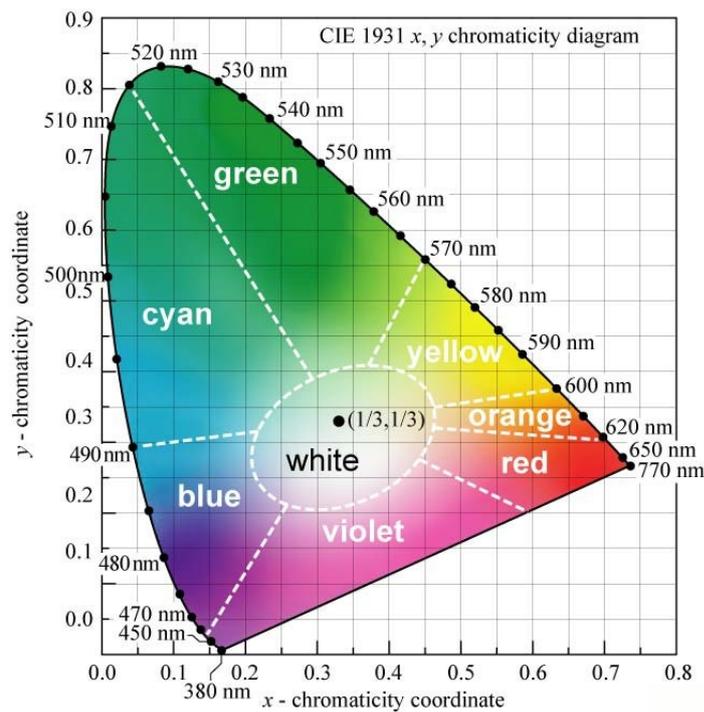


Figura 2.6: Diagramma cromatico CIE, 1931. I colori monocromatici sono localizzati sul perimetro. La saturazione dei colori decresce all'avvicinarsi al centro del diagramma (dove è localizzata la luce bianca).

- Infine in figura 2.7 si vedono le emissioni di alcuni LED in base ai materiali usati (Shubert e Miller, 1999).

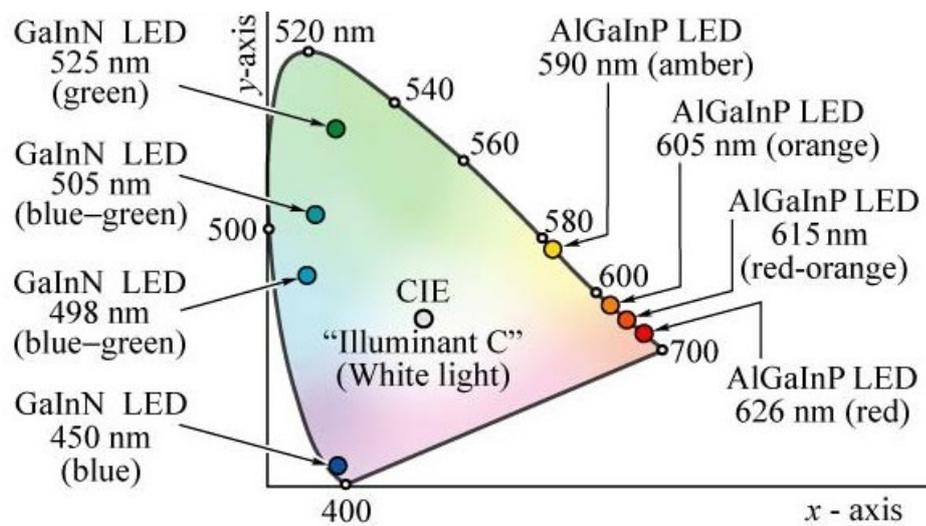


Figura 2.7: Punti del diagramma CIE in cui emettono luce i LED (Schubert e Miller, 1999).

2.4 RESA DEL COLORE

Le proprietà della vista fanno sì che le stesse coordinate cromatiche possano essere ottenute da un radiatore di Plank (corpo nero), da una combinazione di sorgenti monocromatiche o da una sorgente che irradia alcune righe spettrali diverse. Sorgenti, queste, caratterizzate da spettri differenti, ma con la stessa cromaticità vengono dette *metameriche*.

Ogni qualvolta un oggetto venga irradiato, lo spettro riflesso è spostato, in termini di frequenze, e così un oggetto illuminato da sorgenti metameriche può apparire di diversi colori in base a quale di esse venga utilizzata. Per questo motivo si utilizza sempre una sorgente di riferimento rispetto alla quale misurare la qualità di una qualsiasi altra.

Per poter confrontare la qualità di una sorgente luminosa si utilizzano alcuni indici che la mettono a confronto con il corpo nero:

- CCT (correlated color temperature): essa è la temperatura assoluta di un corpo nero che ha cromaticità molto vicina a quella della sorgente in esame;
- CRI (color rendering index): è la misura di quanto la radiazione riflessa da un oggetto venga spostata (in termini di lunghezza d'onda) rispetto a quella causata dall'illuminazione da parte di un corpo nero con la stessa CCT della sorgente. Il CRI (indicato con R_a) dà un'idea di quanto naturalmente una sorgente luminosa renda un oggetto illuminato da essa stessa.

Poiché la nostra vista è molto più sensibile ai colori simili al verde e al giallo il diagramma cromatico non è ben distribuito e uniforme, perciò nel 1960 la CIE lo ritenne non adatto e lo sostituì con il *diagramma di cromaticità uniforme*, mostrato in figura 2.8:

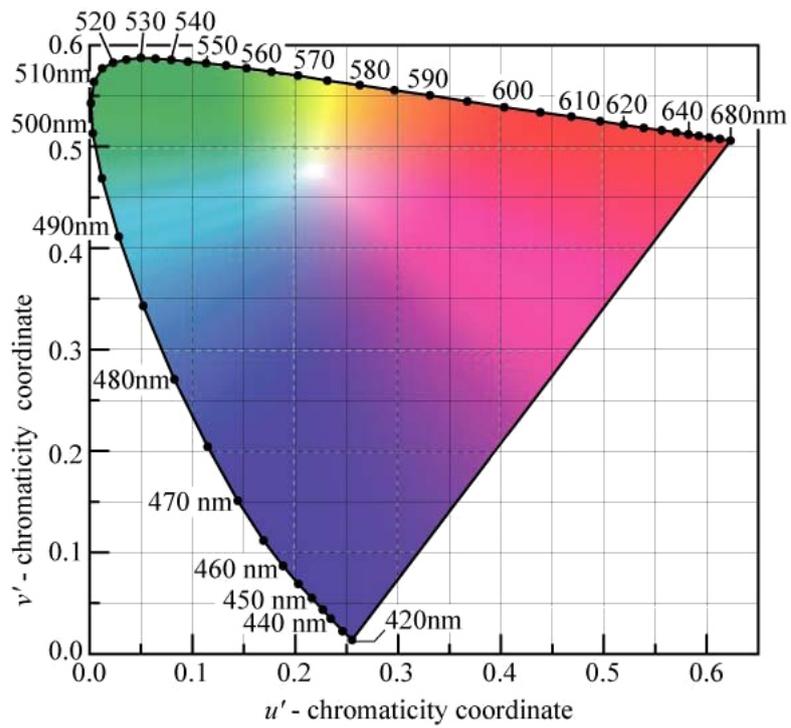


Figura 2.8: Diagramma CIE di cromaticità uniforme, 1976.

Capitolo 3

LAMPADINE

3.1 LAMPADE A INCANDESCENZA



Figura 3.1: Lampada a incandescenza

Una breve cronologia degli sviluppi sperimentali nel campo dell'illuminazione vede al primo posto l'avvento della lampada a incandescenza, oggetto di studi fin dal 1835, anche se il primo modello sufficientemente durevole fu costruito da Thomas Alva Edison nel 1878: i principali elementi che la costituiscono sono un filamento, che viene avvolto in un'elica in modo da ridurre la quantità di calore condotto tra la superficie del filo e il gas circostante, il gas di riempimento stesso, l'ampolla e l'attacco. Il filamento è realizzato in tungsteno perché, tra tutti i metalli ha il punto di fusione

più elevato (3683 K); quando la lampada è collegata alla rete elettrica, scorre corrente attraverso il filamento, il quale di conseguenza si riscalda fino all'incandescenza ed emette quindi onde elettromagnetiche appartenenti anche allo spettro del visibile. In realtà solo se viene raggiunta una temperatura elevata energia sufficiente si concentra nel visibile (per esempio a 2000 $^{\circ}C$ solo il 3% dell'energia consumata si trasforma in energia luminosa).

L'efficienza luminosa di questo tipo di lampade aumenta con la temperatura del filamento, cioè al crescere della corrente che lo attraversa; al tempo stesso l'aumento di temperatura fa aumentare la dissipazione di calore e diminuire il tempo di vita medio della lampada (in condizioni di alimentazione normale è di 1000 ore). L'83% della potenza globale della sorgente è consumata in radiazione infrarossa, il 12% in calore e il solo 5% in radiazione luminosa utile. L'efficienza luminosa risulta, quindi, essere bassa (15 lm/W); per questo motivo a partire dal settembre 2012 non è più stato possibile immetterle sul mercato nonostante abbiano anche dei vantaggi, come il tempo di accensione nullo, il basso costo d'acquisto e indice di resa cromatica uguale a 100. La luce prodotta ha una tipica tonalità calda.

- *Vantaggi*: costo molto basso; ottima resa cromatica; semplicità di installazione.
- *Svantaggi*: scarsa efficienza; breve vita media.

3.2 LAMPADE ALOGENE

Per ridurre il tasso di evaporazione del tungsteno delle lampade a incandescenza e quindi poter operare a temperature più elevate e ottenere un'efficienza maggiore si utilizzano le lampade alogene: al gas contenuto nel bulbo vengono aggiunti alcuni elementi come lo iodio e il kripton così, quando il tungsteno evapora, reagisce con il gas del bulbo formando alogenuri e, nel momento in cui il nuovo composto viene a contatto con il filamento incandescente, il tungsteno si deposita su di esso (questo *ciclo* viene detto *alogeno*). In questo modo può essere raggiunta una temperatura più elevata (pari a 3450 K) con il conseguente miglioramento dell'efficienza o, equivalentemente, la durata di vita di una lampada alogena risulta essere circa il doppio di una lampada ad incandescenza con la stessa efficienza. Al tempo stesso le lampade alogene impiegano molto tempo per riscaldarsi e raffreddarsi (≈ 1 s) e non possono essere oscurate perché alle basse temperature il ciclo alogeno non avviene più.

- *Vantaggi*: vita media superiore alle tradizionali lampade a incandescenza; si evita il fenomeno di annerimento del bulbo (dovuto al metallo evaporato che, a contatto con le pareti interne del bulbo, conden-



Figura 3.2: Lampada alogena

- sa); ottima temperatura di colore; ottima resa cromatica; possibilità di variare e regolare il flusso luminoso; dimensioni ridotte.
- *Svantaggi*: riscaldamento del bulbo; minore efficienza rispetto alle fluorescenti (vedi di seguito).
 - *Ambiti di utilizzo*: edifici domestici per l’illuminazione degli interni, impianti sportivi; anche per gli esterni, come le facciate degli edifici.

3.3 LAMPADE FLUORESCENTI

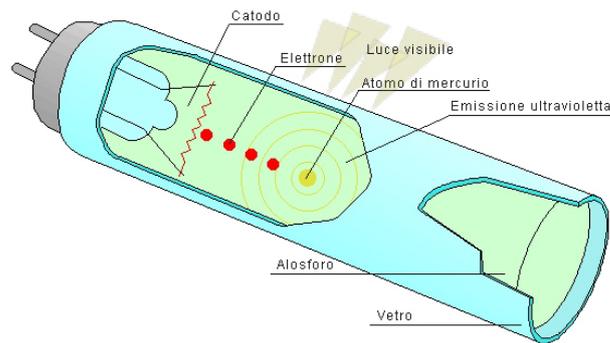


Figura 3.3: Lampada fluorescente



Figura 3.4: Lampada fluorescente tubolare

Lampade tubolari Le lampade fluorescenti tradizionali fanno parte della famiglia delle sorgenti luminose a scarica in gas a bassa pressione (descritte nelle pagine seguenti) in cui l’emissione luminosa visibile è indiretta, ossia non è emessa direttamente dal gas ionizzato, ma da un materiale fluorescente. Esse sono comunemente conosciute come “lampade al neon” anche se la corretta definizione è “lampade a vapori di mercurio a bassa

pressione" dato che contengono mercurio e non neon.

Per *fluorescenza* si intende la proprietà di un materiale di emettere luce quando è eccitato da radiazioni ultraviolette.

Le lampade che sfruttano questo fenomeno sono costituite da un tubo di vetro al cui interno è prima praticato il vuoto, poi introdotto un gas nobile (argon, xeno, neon o krypton) a bassa pressione e in piccola quantità del mercurio liquido (il quale in parte evapora). La pressione di vapore del mercurio è circa 1 Pa, mentre quella del gas raro è dell'ordine di $10^2 \div 10^3$ Pa. All'interno del tubo la superficie è rivestita di un materiale fluorescente, mentre alle estremità si trova un elettrodo (di solito un filamento di tungsteno) ricoperto da sostanze che possono emettere elettroni in grandi quantità.

Quando la lampada viene collegata all'alimentazione gli elettrodi emettono elettroni: essi colpiscono gli atomi di mercurio per poi scinderli in ioni ed elettroni e questi ultimi si comportano allo stesso modo con altri atomi di mercurio. Quello che avviene quando, poi, alcuni elettroni si ricombinano è l'emissione di radiazioni ultraviolette, non visibili. Queste investono il materiale fluorescente della superficie ed esso emette a sua volta onde di lunghezza d'onda maggiore (quindi frequenza minore), visibili all'occhio umano: esse però hanno energia minore e ciò significa che una parte dell'energia iniziale è andata persa sotto forma di calore.

Il tipo di lampade appena descritto è caratterizzato da un'elevata efficienza luminosa, compresa tra i 40 e i 65 lm/W; i consumi e l'ingombro non sono eccessivi. In condizioni ottimali, l'energia consumata è convertita in radiazioni UV con un'efficienza del 63 % (la rimanente è dissipata in calore); solo il 40 % della radiazione UV è poi convertita nel visibile perlopiù a causa dello spostamento di Stokes (la radiazione uscente ha meno energia di quella iniziale). Inoltre circa il 3 % dell'energia è convertito direttamente in radiazione visibile per cui l'efficienza complessiva si aggira attorno al 28 %.

La vita di un lampada fluorescente, che può variare dalle 5000 alle 24000 ore, si avvicina al termine quando i catodi si deteriorano; la durata è nettamente superiore rispetto alle lampade a incandescenza; esse sono, tra le sorgenti luminose, fra le più utilizzate per l'illuminazione d'interni.

Tra gli aspetti negativi vi sono il decadimento del flusso luminoso nel corso del tempo e la dipendenza della luce emessa dalla temperatura dell'aria dell'ambiente circostante, che influenza la pressione del vapore di mercurio. La presenza stessa del mercurio è uno degli aspetti negativi di queste lampade perché ad un certo punto bisogna riciclarle; in ogni caso la quantità presente è inferiore rispetto a quella delle lampade a incandescenza. D'altro canto il prezzo, rispetto ad esse, è maggiore.

Infine distinguiamo tra lampade fluorescenti compatte e a trifosforo: le prime occupano poco spazio, costano meno e sono usate perlopiù in am-

biente domestico, dove il volume da illuminare non è molto grande; le altre utilizzano tre rivestimenti al fosforo, la cui combinazione genera una luce bianca di elevata qualità. Le lampade tubolari, oltre che per le diverse prestazioni, si distinguono anche per il diverso diametro dei tubi:

-T12 (diametro 38 mm) sono i vecchi tubi fluorescenti, di grandi dimensioni e ormai poco utilizzati;

-T8 (diametro 26 mm) rappresentano il tubo al neon, il più diffuso negli ambienti interni;

-T5 (diametro 16 mm) sono quelle di nuova generazione con ottime prestazioni energetiche e di dimensioni ridotte; sono quelle che presentano efficienza maggiore tra le tre.

La qualità della luce emessa dipende dai materiali utilizzati per rivestire la parete interna del tubo. I rivestimenti più usati sono:

-Polveri trifosforo: utilizzate dove occorre avere un CRI elevato (maggiore di 80), come negli uffici.

-Polveri pentafosforo: danno CRI prossimi a 100, usate nei casi in cui è necessario poter distinguere i vari colori, per esempio negli ospedali.

- *Vantaggi*: risparmio energetico (75 % rispetto alle lampade incandescenti); elevata efficienza luminosa; ampia gamma di tonalità di luce; lunghissima durata.
- *Svantaggi*: alto costo iniziale; necessità di un alimentatore, infatti non si possono collegare direttamente alla rete elettrica; l'alimentatore serve per innescare la scarica iniziale e limita anche la corrente nel tubo. Quelli più comuni sono quelli elettromagnetici formati da un reattore e da uno starter, ma assorbono fino al 50 % del consumo totale. Quindi si preferiscono gli alimentatori elettronici ad alta frequenza: non necessitano dello starter, consentono un'efficienza luminosa superiore, eliminano lo sfarfallio all'accensione e aumentano la durata della lampada.
- *Ambiti di utilizzo*: interni ed esterni, in particolare dove vengono usate per tempi lunghi, infatti frequenti accensioni e spegnimenti riducono la durata di vita media.

Lampade compatte (CFL) Questo tipo di lampada funziona come le tubolari, ma ne rappresenta una versione miniaturizzata poiché utilizza tubi più corti e ricurvi. Anche queste lampade necessitano di un alimentatore elettronico, incorporato all'interno (integrate) oppure no (non integrate).

- *Vantaggi*: risparmio energetico, elevata efficienza luminosa, ampia gamma di tonalità di luce, lunga durata.
- *Svantaggi*: alto costo iniziale, necessità di un alimentatore (se non integrato).



Figura 3.5: Lampada fluorescente compatta.

3.4 LAMPADINE A SCARICA

Le lampade a scarica sfruttano il fenomeno della *luminescenza*, per cui un gas, ionizzato tramite un campo elettrico, emette fotoni.

Viene emessa luce monocromatica gialla alla lunghezza d'onda caratteristica di emissione del sodio, pari a 589 nanometri, molto vicina al picco di sensibilità dell'occhio umano e per questo l'efficienza è elevata.

Queste lampade vengono solitamente utilizzate negli impianti di illuminazione stradale, soprattutto dove c'è spesso nebbia.



Figura 3.6: Lampada al sodio a bassa pressione.

Lampade al sodio a bassa pressione Nelle lampade al sodio a bassa pressione la pressione di vapore del sodio è dell'ordine di 1 Pa, mentre quella del gas raro, es. neon, varia tra 10^2 e 10^3 Pa; condizione, questa, che si trova anche nelle lampade fluorescenti, dove però le onde emesse dalla scarica del mercurio hanno lunghezza d'onda che non appartiene al visibile. Sebbene non sia necessario un ciclo di raffreddamento nel caso di interruzione dell'alimentazione, è richiesto un tempo lungo (fino a 10 minuti) per il riscaldamento del sodio che deve poi vaporizzare e, nel frattempo, assume un colore tra il rosa e il rosso.

- *Vantaggi*: elevatissima efficienza luminosa, lunga durata, risparmio energetico.
- *Svantaggi*: nessuna resa cromatica, accensione lenta.
- *Ambiti di utilizzo*: contesti in cui si punta all'economicità in primo luogo e dove la qualità non è importante.

Lampade a scarica ad alta pressione (SAP) Queste lampade rappresentano l'evoluzione di quelle a bassa pressione. Producono una luce

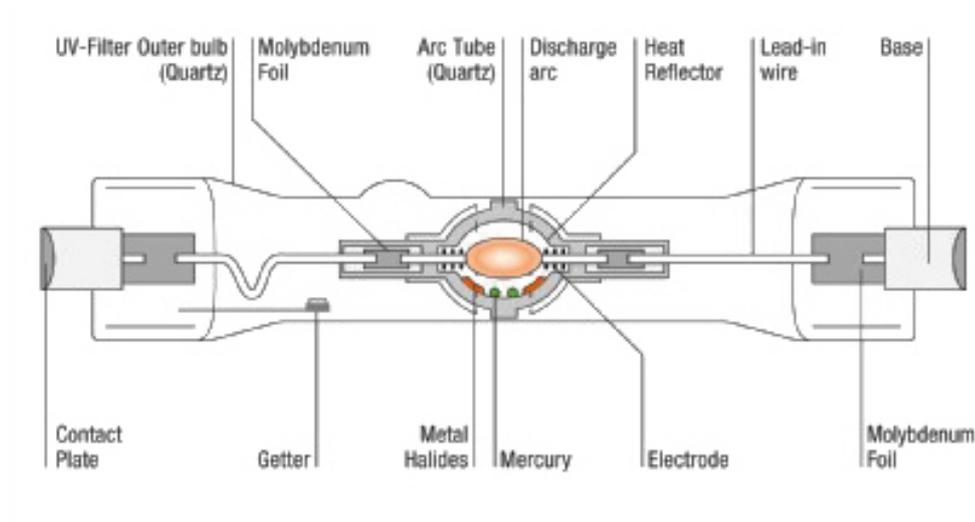


Figura 3.7: Lampada a scarica ad alta pressione.

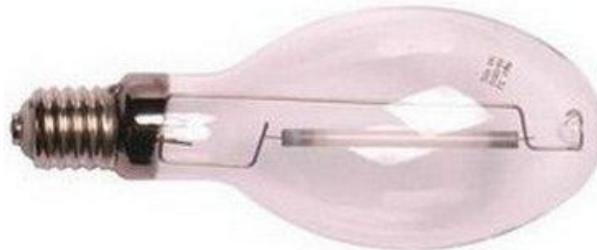


Figura 3.8: Lampada SAP.

bianca tendente al giallo.

Per funzionare utilizzano un alimentatore (elettromagnetico o elettronico), che regola la tensione, e un accenditore, che innesca la scarica iniziale.

Il principio di funzionamento si basa sulla scarica del gas contenuto nel tubo ad arco tra due elettrodi dopo l'accensione. La conducibilità elettrica è stabilita dai gas ionizzati contenuti nel tubo che fa parte della lampada. Gli elettrodi sono alimentati in un recipiente scarico completamente sigillato.

Durante la scarica del gas gli alogenuri metallici e il mercurio sono eccitati dal flusso di corrente ed emettono energia nella forma che dipende dalla loro radiazione caratteristica (il mercurio è completamente vaporizzato durante il funzionamento).

L'insieme di diverse componenti di radiazioni produce la temperatura di colore e le proprietà di riproduzione del colore desiderate.

Le lampade a scarica ad alta pressione sono di tre tipi: a *mercurio*, al *sodio* e con *ioduri metallici*.

- *Vantaggi*: ottima efficienza luminosa, lunga durata, risparmio energetico.
- *Svantaggi*: resa cromatica non ottimale.
- *Ambiti di utilizzo*: illuminazione stradale, industriale e di spazi esterni come piazze e monumenti, dove non è richiesta un'ottima qualità della resa cromatica, ma si punta di più al risparmio.



Figura 3.9: Lampada a ioduri metallici

Lampade a ioduri/alogenuri metallici All'interno del bulbo in vetro, in cui è presente un tubo di scarica in quarzo, ci sono vapori di mercurio o di sodio ad alta pressione e una miscela di ioduri metallici.

- *Vantaggi*: risparmio energetico, ottima resa cromatica, luce bianca e brillante, dimensioni ridotte, lunga durata.
- *Svantaggi*: accensione lenta (5 minuti per arrivare a regime e il tempo cresce se viene spenta e subito riaccesa), necessità di dispositivi per l' accensione e l'innesco.
- *Ambiti di utilizzo*: illuminazione di grandi spazi sia interni che esterni dove la qualità e la nitidezza della luce sono fondamentali.

3.5 LAMPADE A LED



Figura 3.10: LED

A parità di luce emessa, rispetto a una lampada a incandescenza, i LED permettono di risparmiare fino al 90 % di elettricità e hanno una vita che dura fino alle 100 mila ore (5-10 volte maggiore rispetto a quella delle fluorescenti compatte in circolazione).

L'energia spesa viene convertita quasi totalmente in luce visibile infatti emettono luce fredda, in termini di calore emesso e non di tonalità.



Figura 3.11: LED



Figura 3.12: LED

TIPO	EFFICIENZA LUMINOSA (lumen/W)	RESA (%)	TEMPERATURA DI COLORE (K)	DURATA (ore)
INCANDESCENZA	11-12	100	2000-3000	1000
ALOGENE	18-22	100	2900-3000	2000-4000
FLUORESCENTI	55-120	60-90	2700-6500	10000-24000
FLUORESCENTI COMPATTE	70-90	80-90	2700-6000	6000-15000
IODURI METALLICI	40-100	65-90	4000-6000	6000-20000
VAPORI DI SODIO AP	70-150	20-80	2000-2500	12000-20000
VAPORI DI SODIO BP	125-200	0	1800	10000-12000
LED	40-150	60-80	3000-9000	30000-100000

Tabella 3.1: TABELLA COMPARATIVA (valori medi tipici)

L'accensione è immediata e non vengono utilizzate sostanze chimiche pericolose, come il mercurio. Le dimensioni sono molto ridotte e per questo possono essere utilizzati in molti e diversi progetti.

Purtroppo i costi sono ancora proibitivi perciò non sono ancora confrontabili con le lampade fluorescenti che, con un prezzo inferiore, hanno un'efficienza luminosa maggiore.

Si stima che entro dieci anni i LED potranno competere con gli altri tipi di lampade in circolazione per quanto riguarda l'illuminazione domestica.

- *Vantaggi*: elevatissima durata, assenza di manutenzione, assenza di sostanze pericolose, accensione a freddo immediata, resistenza a urti e vibrazioni, dimensioni piccole, flessibilità nell'installazione, possibilità di regolare la potenza.
- *Svantaggi*: alto costo iniziale, efficienza luminosa con margini di miglioramento.
- *Ambiti di utilizzo*: semafori, spie e qualche applicazione nell'illuminazione anche se non ancora conveniente.

Per avere un'idea dei costi da affrontare nell'utilizzo di determinate sorgenti di illuminazione si tenga presente che se le CFL integrate hanno un costo d'acquisto che si aggira intorno ai 6-10 €, i LED arrivano anche a 35 € e

costano mediamente 2.75 €/anno, circa 1.4 € in più rispetto alle CFL integrate.

Capitolo 4

ILLUMINAZIONE ALLO STATO SOLIDO

La luminescenza per iniezione è il principio su cui si basa il funzionamento delle lampade a LED: si tratta di un caso particolare dell'elettroluminescenza, per cui un corpo nero emette radiazioni se eccitato da un campo elettrico; un esempio concreto è la scarica dei gas di cui sopra si è già discusso in parte. Il modo più efficiente in cui si realizza l'elettroluminescenza è, però, il caso dell'iniezione di portatori nei semiconduttori; questo fenomeno fu scoperto da Round nel 1907: egli iniettò dei portatori nel carburo di silicio tramite un contatto di metallo e osservò luce gialla.

4.1 PRESTAZIONI DI UN LED

Un dispositivo che sfrutta il principio dell'elettroluminescenza è caratterizzato dall'*efficienza radiante*, che esprime l'efficienza del dispositivo nella conversione da potenza elettrica a ottica:

$$\eta_e = \eta_{ext}\eta_f,$$

dove η_{ext} è l'*efficienza quantica esterna*, rapporto tra il numero di fotoni emessi dal LED e il numero di elettroni che lo hanno attraversato, e η_f è l'*efficienza di alimentazione* ossia il rapporto tra l'energia media dei fotoni emessi e l'energia totale che una coppia elettrone-lacuna acquisisce dall'alimentazione passando attraverso il LED.

Il parametro η_{ext} si può esprimere in funzione di:

efficienza di iniezione η_{inj} , cioè la frazione di elettroni che, attraversato il dispositivo, vengono iniettati nella regione attiva,

efficienza quantica interna o *efficienza radiativa* η_{rad} , rappresenta la parte delle ricombinazioni elettrone-lacuna (che avvengono nell'area attiva, definita successivamente) che sono radiative, producono cioè fotoni,

efficienza di estrazione o *ottica* η_{opt} che esprime la quantità di fotoni che, generati nella regione attiva, lasciano il dispositivo;

$$\eta_{ext} = \eta_{inj} * \eta_{rad} * \eta_{opt}.$$

4.2 RICOMBINAZIONE DI ELETTRONI E LACUNE

– GENERAZIONE COPPIE ELETTRONE-LACUNA

Si consideri il silicio come semiconduttore per costruire un LED.

Gli elettroni di ogni atomo sono localizzati a diversi livelli di energia: quelli dello strato più esterno, secondo il modello atomico di Bohr, vengono detti di valenza e sono quelli che determinano le proprietà elettriche dell'elemento e il comportamento dell'atomo nelle reazioni chimiche.

In una struttura cristallina, per temperature prossime allo zero assoluto praticamente tutti gli elettroni sono ancorati ai legami covalenti (figura 4.1) e occupano livelli di energia molto vicini tra loro che formano la banda di valenza (non si trovano tutti allo stesso livello perché stiamo considerando un reticolo di atomi di silicio, non un singolo atomo).

Per avere elettroni che possano partecipare alla conduzione è necessario aumentare la temperatura e allora si ha che la banda di conduzione comincia a riempirsi degli elettroni estratti dai legami covalenti a causa dell'energia termica che li ha spezzati. L'ampiezza della banda proibita rappresenta l'energia minima necessaria per rompere un legame covalente e per liberare un elettrone. Ci si trova ora nella situazione in cui gli elettroni, abbandonata la banda di valenza, hanno lasciato al loro posto delle cariche positive, le lacune, le quali contribuiscono al processo di conduzione; si sono formate cioè coppie elettrone-lacuna (EHP).

In generale si può utilizzare lo stesso modello a bande di energia (figura 4.2) per semiconduttori estrinseci, drogati con atomi accettori (che introducono lacune, in tal caso si parla di drogaggio di tipo p) o donatori (che apportano elettroni, drogaggio di tipo n). I primi introducono nel diagramma a bande ulteriori stati localizzati su un livello E_A accettore che si trova nella banda proibita in prossimità del livello E_V di valenza, mentre i donatori aggiungono stati su un livello E_D donatore vicino al livello E_C di conduzione.

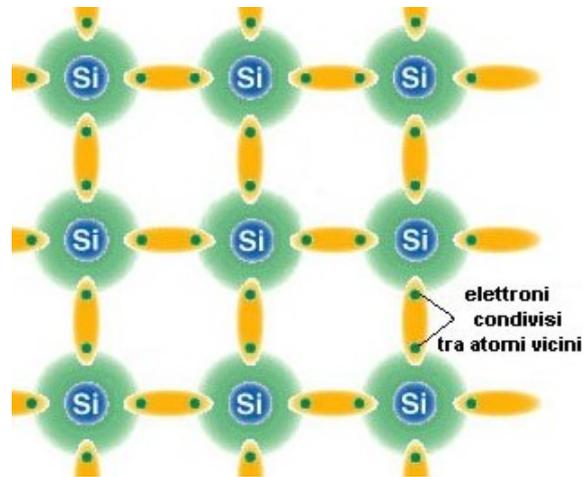


Figura 4.1: Rappresentazione bidimensionale del reticolo cristallino del silicio e dei legami covalenti. Per temperature prossime a 0 K tutti i legami sono soddisfatti.

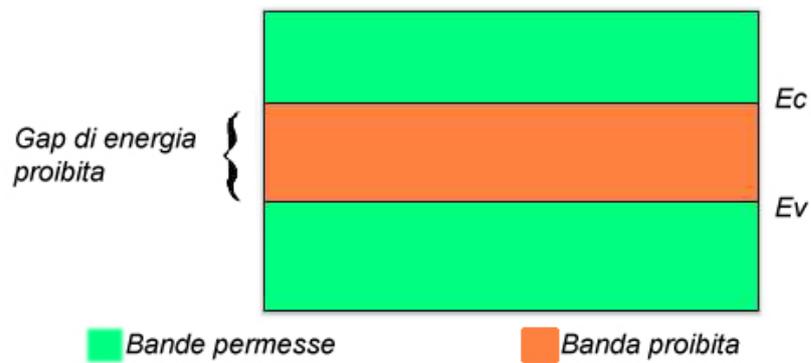


Figura 4.2: Modello a bande di energia

A temperatura ambiente tutti i donatori sono ionizzati, cioè gli elettroni che hanno apportato sono passati da E_D a E_C o equivalentemente tutti gli accettori sono ionizzati, cioè è avvenuto il passaggio di elettroni da E_V a E_A (figura 4.3).

Quando si parla di portatori di carica in un semiconduttore, quindi, si fa riferimento agli elettroni nella banda di conduzione e alle lacune in quella di valenza.

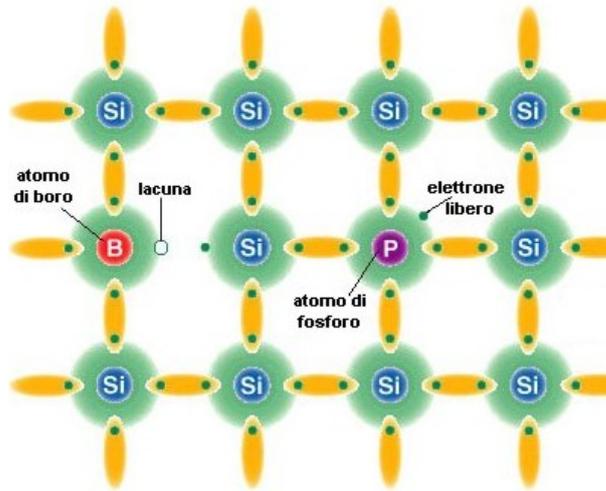


Figura 4.3: Modello a bande di energia per semiconduttore estrinseco

– GIUNZIONE *p-n*

Una giunzione *p-n* si costruisce mettendo a contatto due parti di semiconduttore drogate in modo opposto, una di tipo *p* e l'altra di tipo *n*.

Il LED (Light Emitting Diode) è un dispositivo costituito da una giunzione *p-n* polarizzata direttamente (questo significa che al blocchetto di tipo *p* è applicato un potenziale V_p positivo e a quello di tipo *n* V_n negativo) : lo scopo del dispositivo è emettere luce.

Nel punto di contatto tra le due parti, a causa degli elevati gradienti di concentrazione, gli elettroni tendono a diffondere dalla zona *n* alla zona *p*, mentre le lacune si spostano dalla zona *p* alla zona *n*.

La diffusione delle lacune lascia nella regione *p* degli atomi accettori immobili carichi negativamente (ioni fissi negativi) e allo stesso modo, gli elettroni, diffondendo nella regione *p*, lasciano degli ioni fissi positivi nella regione *n*.

Questo fa in modo che si formi un campo elettrico che ha origine negli ioni fissi positivi e termini in quelli negativi; accade quindi che il campo elettrico si oppone alla *corrente di diffusione* con una *corrente*

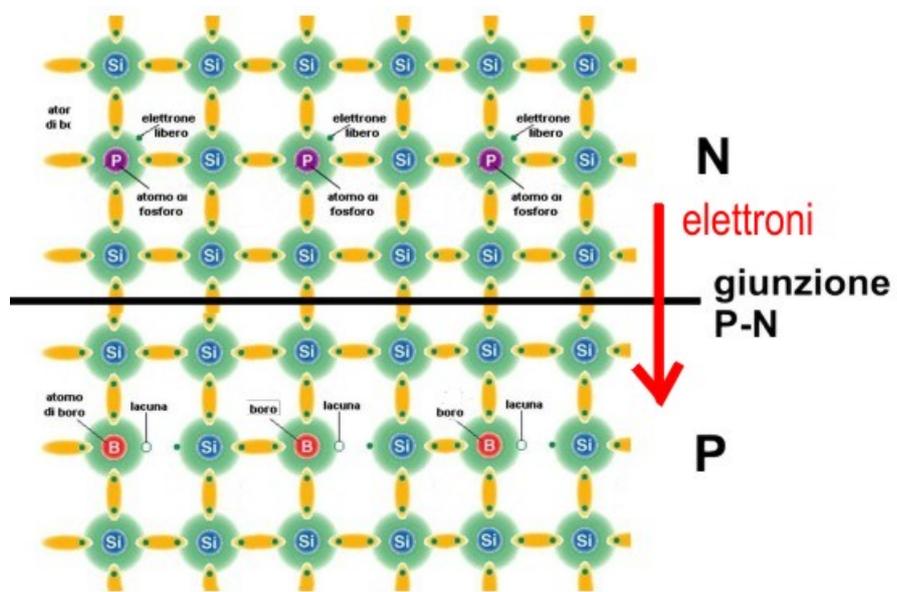


Figura 4.4: Giunzione p-n.

che viene detta *di deriva* e si giunge così a una condizione di equilibrio (in assenza di alimentazione) in cui corrente di diffusione e di deriva si equivalgono ($I_{diffusione} = I_{deriva}$). Le densità di corrente di diffusione e deriva sono rispettivamente:

$$\begin{cases} J_{diffusione} = q(-D_p \frac{dp}{dx} + D_n \frac{dn}{dx}) \\ J_{deriva} = q(p\mu_p + n\mu_n)E \end{cases}$$

Oppure in altro modo:

$$\begin{cases} J_{elettroni} = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \\ J_{lacune} = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \end{cases}$$

dove q è la carica elementare, D_p la diffusività delle lacune, D_n degli elettroni, $\frac{dp}{dx}$ e $\frac{dn}{dx}$ i gradienti di concentrazione di lacune ed elettroni, p e n le concentrazioni, E il campo elettrico e μ_p e μ_n le mobilità e dalla *relazione di Einstein*: $\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_B T}{q} = V_T \cong 25mV$ (k_B è la costante di Boltzmann e T la temperatura in kelvin).

La porzione di semiconduttore in cui sono rimasti gli ioni fissi viene detta regione di carica spaziale (RCS) o di svuotamento e funziona come un isolante perché tale zona è quasi totalmente priva di cariche libere; la sua larghezza è data da $W_{dep} = W_1 + W_2$ (vedi figura 4.5).

Le regioni lontane dalla giunzione, invece, non sono interessate da fenomeni di diffusione, perciò vengono dette regioni quasi neutre (RQN) e lì le cariche possono muoversi liberamente.

Quando una giunzione viene polarizzata direttamente (con una tensione $V_A = V_p - V_n > 0$) gli elettroni della regione n e le lacune della regione p vengono respinti per cui la regione di svuotamento si restringe e il campo elettrico e il potenziale che si erano creati alla giunzione diminuiscono facendo decrescere anche la resistenza che si oppone al moto delle cariche nella RCS; in questo modo il moto di diffusione è molto più forte rispetto a quello di deriva e molti elettroni vengono iniettati nella regione p come molte lacune nella regione n .

A questo punto in prossimità della RCS si sono creati degli accumuli di portatori minoritari (lacune nel silicio di tipo n ed elettroni dall'altro lato) e questi si ricombinano con i portatori di segno opposto che si trovano lì perché il silicio è stato precedentemente drogato: questo comportamento continua finché la polarizzazione diretta è attiva.

In figura 4.5 vengono mostrati tutti gli aspetti descritti:

poiché la carica netta del materiale è nulla ($qN_A W_1 = qN_D W_2$, con N_A e N_D concentrazioni di accettori e donatori) e integrando l'equazione che descrive il *Teorema di Gauss* ($\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s}$) (dove $\rho(x) = qN_A$

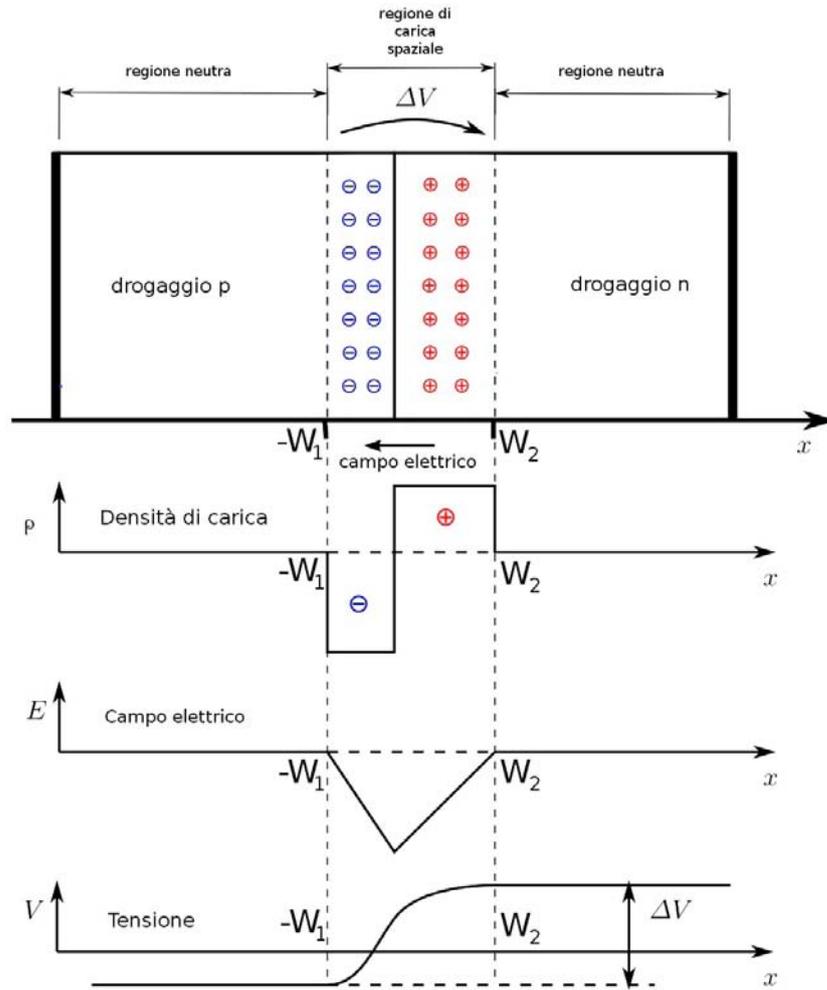


Figura 4.5: Giunzione p-n.

oppure qN_D nelle regioni p e n rispettivamente; ϵ_s è la costante dielettrica del mezzo) si ottiene:

$$\int_{E(0)}^{E(x)} dE = \int_0^x \frac{\rho}{\epsilon_s} dx$$

$$E(x) - E(0) = \frac{q}{\epsilon_s} N_D (x - 0)$$

da cui, considerando $x = W_2$ o $x = -W_1$ e poiché $E(-W_1) = E(W_2) \cong 0$, si ha:

$$E(0) = \frac{qN_A W_1}{\epsilon_s} = \frac{qN_D W_2}{\epsilon_s}$$

è il valore del campo elettrico nel punto $x=0$.

Quindi:

$$\begin{cases} -W_1 < x < 0 : E(x) = E(0) + \frac{qN_A}{\epsilon_s} x \\ 0 < x < W_2 : E(x) = E(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s} x \end{cases}$$

Per trovare quanto vale la barriera di potenziale $\Delta V = V(W_2) - V(-W_1)$ si tenga presente che $\frac{dV}{dx} = -E(x)$ perciò, in modulo:

$$\begin{aligned} |\Delta V| &= \left| \int_{V(-W_1)}^{V(W_2)} dV \right| = \left| \int_0^V dV \right| = \left| \int_{-W_1}^0 [E(0) + \frac{qN_A}{\epsilon_s} x] dx + \int_0^{W_2} [E(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s} x] dx \right| = \\ &= \left| [E(0)x + \frac{qN_A}{\epsilon_s} \frac{x^2}{2}]_{-W_1}^0 + [E(0)x + \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{x^2}{2}]_0^{W_2} \right| = \\ &= \left| E(0)W_1 - \frac{qN_A}{\epsilon_s} \frac{(W_1)^2}{2} + E(0)W_2 + \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{(W_2)^2}{2} \right| = \\ &= \left| E(0)(W_1 + W_2) - \frac{E(0)}{2} W_1 - \frac{E(0)}{2} W_2 \right| = \\ &= |E(0)| \frac{W_1 + W_2}{2}. \end{aligned}$$

Inoltre, ricordando che le correnti di elettroni e di lacune sono nulle all'equilibrio, si ottiene la formula per il potenziale di contatto in funzione di N_A e N_D :

$$J_{elettroni} = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} = 0$$

Da cui:

$$n(x) \frac{dV(x)}{dx} = \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn(x)}{dx}$$

E usando la relazione di Einstein:

$$dV = V_T \frac{1}{n} dn$$

integrando i due membri (i pedici n e p fanno riferimento a un punto nella regione n e uno nella regione p):

$$\int_{V_p}^{V_n} dV = \int_{n_p}^{n_n} V_T \frac{1}{n} dn$$

si ottiene:

$$V_n - V_p = V_T \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = V_T \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

dove la seconda uguaglianza si ricava facendo lo stesso ragionamento per le lacune.

Dalle formule ricavate e dalla *Legge dell'azione di massa* $np = n_i^2$ (n_i è la concentrazione di elettroni in un semiconduttore non drogato a temperatura ambiente):

$$\Delta V = V_T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right).$$

A questo punto si può fornire la legge per $W_{dep} = W_1 + W_2$, ricordando che $N_D W_2 = N_A W_1$ (quindi $W_1 = \frac{N_D W_2}{N_A}$) e le leggi che forniscono il valore di $E(0)$ e ΔV :

$$\begin{cases} \Delta V = \frac{|E(0)|(W_1+W_2)}{2} = \frac{|E(0)|W_{dep}}{2} = \frac{qN_D W_2}{\epsilon_s} \frac{W_{dep}}{2} \\ W_{dep} = W_1 + W_2 = \frac{N_D W_2}{N_A} + W_2 = W_2 \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta V = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{W_{dep}}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \frac{W_{dep}}{2} = \frac{q}{2\epsilon_s} \frac{W_{dep}^2}{\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A}} \\ W_2 = \frac{W_{dep}}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \end{cases}$$

Si arriva così alla formula finale:

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \Delta V}$$

Quando si applica una polarizzazione positiva $V_A > 0$ si creano degli accumuli di carica ai bordi della RCS e la formula per W_{dep} non cambia eccetto per la sostituzione di ΔV con $\Delta V - V_A$.

Si studia ora lo spostamento e la ricombinazione di elettroni e lacune quando $V_A > 0$. Innanzitutto sono ancora valide le relazioni che forniscono il potenziale di contatto perché il caso in esame è sotto ipotesi di *bassa iniezione* per cui si hanno cadute di tensione trascurabili sui contatti e RQN. Si ha allora che

$$\Delta V - V_A = V_n - V_p = V_T \ln\left(\frac{N_A}{p_n}\right)$$

con $p_p = N_A$ la concentrazione di lacune nella regione p che coincide con quella degli accettori di drogaggio ($p_p \cong N_A$ poiché $N_A \gg n_i$), mentre p_n è la concentrazione di lacune (portatori minoritari) in $x = W_2$ (lo stesso ragionamento si può fare per la regione p con gli elettroni).

$$\text{Dalla formula si ricava } p_n = N_A e^{\frac{V_A - \Delta V}{V_T}} = p_{n0} e^{\frac{V_A}{V_T}}$$

dove si è utilizzato p_{n0} per indicare la concentrazione di lacune nella regione n quando $V_A = 0$ (cioè all'equilibrio).

Allo stesso modo si trova la concentrazione di elettroni nella regione p in $x = -W_1$:

$$n_p = N_D e^{\frac{V_A - \Delta V}{V_T}} = n_{p0} e^{\frac{V_A}{V_T}}$$

Si definisca ora la variabile $p'_n(x) = p_n(x) - p_{n0}$ quindi sarà $p'_n(W_2) = p_{n0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right)$;

ora si ricava la distribuzione dei portatori minoritari (lacune) nella zona n per $x > W_2$ utilizzando l'*equazione di continuità* nel caso di $E = 0$ (poiché ci si trova nella RQN) e di indipendenza dal tempo di p (e n): $\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p}$ (con τ_p *costante di tempo* di vita delle lacune nella regione n).

Il risultato è $p'_n(x) = p'_n(W_2) e^{-\frac{x - W_2}{L_p}} = p_{n0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{x - W_2}{L_p}}$ per $x > W_2$ ($L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ è la *lunghezza di diffusione*).

Infine di seguito sono riportati i calcoli che portano alla formula della corrente che scorre nella giunzione nei vari casi di polarizzazione (la seconda uguaglianza è data dalla definizione di p'_n).

$$J_p^{diff}(x) = -q D_p \frac{dp}{dx} = -q D_p \frac{\partial p'_n(x)}{\partial x} = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{x - W_2}{L_p}}$$

per $x > W_2$.

La densità di corrente di diffusione appena trovata ha valore massimo in $x = W_2$ e poi decade esponenzialmente fino a una lunghezza di L_p .

Allo stesso modo $J_n^{diff}(x) = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right)$.

Si può ora calcolare il valore della corrente della giunzione usando le formule per J_n , J_p , $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$ e $n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$:

$$\begin{aligned} I &= A[J_p(W_2) + J_n(-W_1)] = Aqn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) = \\ &= I_s \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right). \end{aligned}$$

– TIPI DI RICOMBINAZIONE

La ricombinazione tra un elettrone e una lacuna può avvenire in modo radiativo e non: il primo caso si verifica quando un elettrone della banda di conduzione si ricombina con una lacuna della banda di valenza e l'energia in eccesso viene trasformata in un fotone, contribuendo all'intensità della radiazione prodotta; si ha invece ricombinazione non radiativa se l'energia in eccesso viene emessa sotto forma di calore nel reticolo cristallino del semiconduttore.

L'intensità della radiazione emessa dipende pertanto dalla probabilità che si verifichino, all'interno del semiconduttore, delle ricombinazioni non radiative; il silicio presenta una elevata probabilità di ricombinazione non radiativa, per cui negli anni '60 il materiale che permise la costruzione dei primi dispositivi optoelettronici fu l'arseniuro di gallio (GaAs) che presenta una bassa probabilità di questo tipo.

Durante una transizione radiativa l'energia e il momento devono essere conservati: la prima condizione si spiega nell'equivalenza tra l'energia del fotone e la distanza tra i due livelli che ospitano le due particelle che poi si ricombinano. Per quanto riguarda il momento si richiede che venga conservata la quantità di moto tra la banda di conduzione (stato eccitato) e quella di valenza (stato base). La quantità di moto di un fotone è molto inferiore rispetto a quest'ultima perciò quella dei portatori di carica non viene alterata dalla sua emissione e si ha quindi la conservazione.

In base a quanto esposto si distingue tra semiconduttori a gap diretto (GaAs) ed a gap indiretto (Ge, Si). Nel GaAs la transizione può avvenire in accordo ai due principi di conservazione poiché la banda di valenza e quella di conduzione sono direttamente affacciate (gap diretto). Nel Si, invece, la transizione non può avvenire direttamente infatti il fotone non consente il salto di impulso ed è necessario l'intervento di un'altra particella con energia piccola ma grande quantità

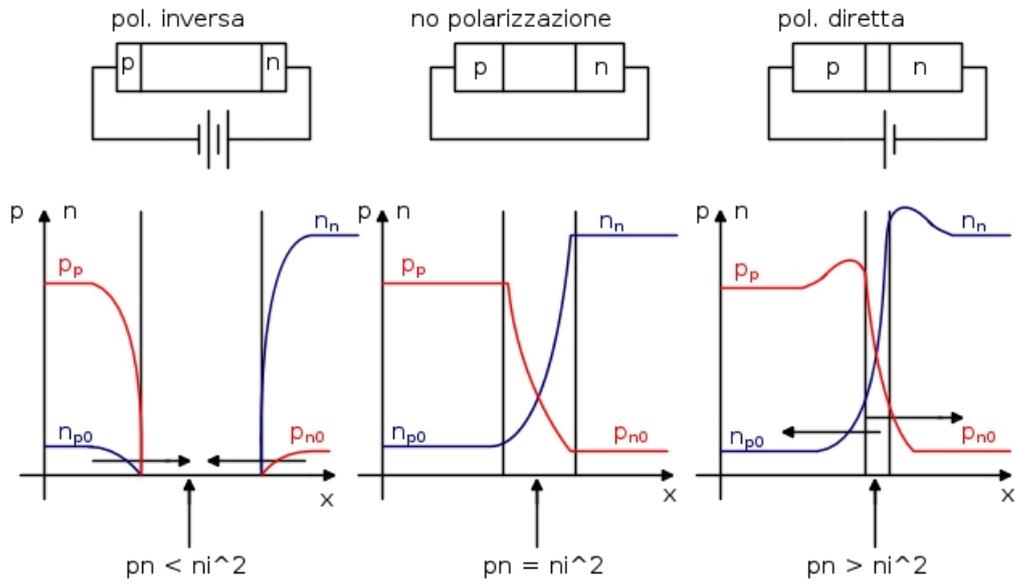


Figura 4.6: Distribuzione dei portatori maggioritari e minoritari.



Figura 4.7: Corrente di un diodo.

di moto (fonone) e si tratta in questo caso di gap indiretto.

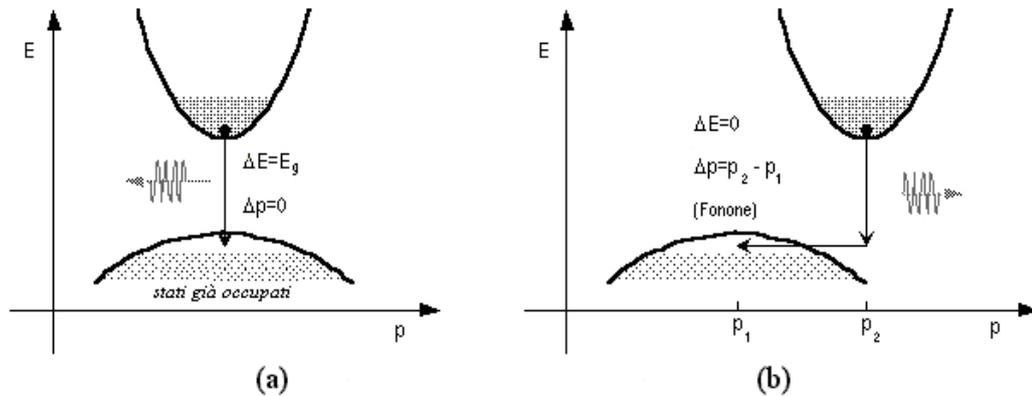


Figura 4.8: Diagrammi di stato di semiconduttori a gap diretto (a) ed indiretto (b).

4.3 LED AD ALTA LUMINOSITÀ

– ETEROSTRUTTURE

I diodi a giunzione p-n convenzionali utilizzano il drogaggio per controllare l'iniezione di portatori. Le barriere di potenziale per elettroni e lacune sono create dalle cariche ionizzate di donatori e accettori della RCS.

I LED basati su omogiunzioni (stesso materiale per i due blocchetti della giunzione) hanno delle carenze che limitano la loro applicazione nell'illuminazione allo stato solido: innanzitutto la luce generata nella regione attiva viene riassorbita in gran parte nelle regioni conduttive di tipo p e n. In secondo luogo un'efficienza quantica interna elevata è raggiungibile solo in una regione conduttiva, tipicamente quella di tipo p, e per questo è necessario che ci sia un basso livello di iniezione di lacune nella regione n ($I_n \gg I_p$). Poiché $I_n \propto \frac{1}{N_A}$ e $I_p \propto \frac{1}{N_D}$, con N_A e N_D rispettivamente le concentrazioni di accettori e donatori nel semiconduttore, si può raggiungere lo scopo illustrato drogando in questo modo: $N_D \gg N_A$.

Al tempo stesso livelli di drogaggio alti equivalgono a maggiori probabilità di assorbimento dei fotoni emessi; non solo, infatti potrebbero crearsi impurità che favorirebbero ricombinazioni non radiative.

Un modo per avere il controllo sui fenomeni presentati è l'utilizzo di una giunzione tra materiali aventi gap energetici diversi, ossia una eterogiunzione, che presenta differenti barriere di potenziale per gli

elettroni e per le lacune, diversamente dalle omogiunzioni. I LED ad alta luminosità sono ottenuti proprio utilizzando eterostrutture che migliorano l'iniezione di portatori e l'efficienza interna.

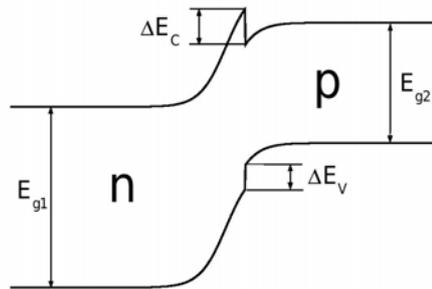


Figura 4.9: Potenziale di una eterogiunzione p-n

La figura 4.9 mostra come $E_{g2} < E_{g1}$ perciò gli elettroni vedono una barriera di potenziale minore e possono diffondere con facilità, mentre per le lacune avviene l'opposto.

– SEMICONDUCTORI USATI

Il requisito più importante per un LED è quello di emettere radiazione nel visibile o vicino all'UV; è però doveroso tener presente la necessità che le ricombinazioni, oltre ad avere un tasso elevato, dovrebbero avvenire a gap diretto e questo è possibile solo per alcuni tipi di semiconduttore.

Un altro requisito per la scelta del materiale da utilizzare è la robustezza del reticolo e la presenza del minor numero possibile di ricombinazioni non radiative.

I materiali più utilizzati sono: AlGaAs, AlGaInP e AlInGaN. In base al semiconduttore utilizzato, e quindi all'ampiezza della "band gap", la radiazione emessa è caratterizzata da diverse lunghezze d'onda e di conseguenza da diversi colori: ad ogni fotone, infatti, è associata un'energia espressa dalla relazione $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, con $h = 6.63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ la costante di Planck, ν la frequenza e λ la lunghezza d'onda del fotone di luce; $c \cong 3 \cdot 10^8 m/s$ invece è la velocità della luce.

In figura 4.10 viene illustrato quanto appena spiegato.

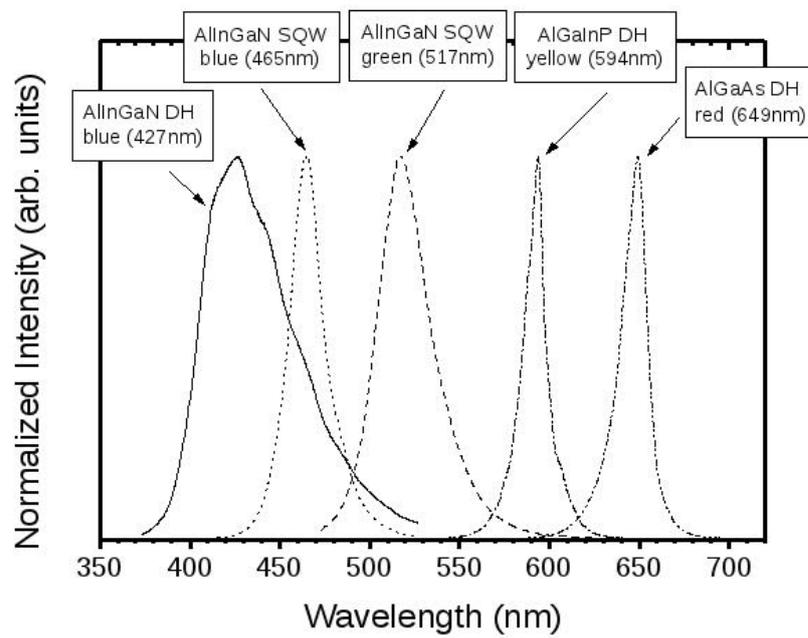


Figura 4.10: Spettro di elettroluminescenza in un LED ad alta luminosità attraversato da una corrente di 20 mA.

Composto chimico	Formula chimica	Colore di luce emessa
Arsenurio di alluminio-gallio	AlGaAs	Rosso e infrarosso
Fosfuro di alluminio-gallio	AlGaP	Verde
GaAsP	GaAsP	Rosso, rosso-arancione, arancione e giallo
GaN	GaN	Verde e blu
Fosfuro di gallio	GaP	Rosso giallo e verde
ZnSe	ZnSe	Blu
Nitrito di gallio-indio	InGaN	Blu-verde e blu
InGaAlP	InGaAlP	Rosso, arancione, giallo e verde
Carburo di silicio	SiC	Blu

Tabella 4.1: Principali colori della luce emessa dai diodi LED

COLORI EMESSI DA UN LED Una caratteristica peculiare dei LED rispetto alle sorgenti di illuminazione tradizionali è la possibilità di creare tonalità di colore di qualsiasi tipo: basta scegliere il tipo di materiale che costituisce il diodo e il tipo di drogaggio. In tabella 4.1 riportiamo i principali materiali e colori tipici di un LED.

4.4 ESTRAZIONE DI LUCE DAI LED

La ragione fisica per cui l'estrazione di luce da un LED risulta difficile è il rapporto molto grande tra gli indici di rifrazione del semiconduttore e del mezzo che lo circonda: per questa ragione gran parte della radiazione emessa dal dispositivo viene rispedita indietro.

Sulla base di tali osservazioni si sono sviluppati diversi studi con il fine di ottimizzare il processo di rifrazione della luce in modo da accrescere la quantità di radiazione visibile che lascia il LED.

I fotoni emessi nella zona attiva di un LED si muovono nell'ambiente circostante solo dopo un percorso complicato nel chip. Molti di questi fotoni, prima di poter "fuggire", subiscono l'assorbimento da parte del substrato, dei vari strati di semiconduttore, dei contatti o della cupola epossidica (epossidico = gruppo contenente un atomo di ossigeno legato a due atomi di carbonio adiacenti a formare un anello triatomico).

Si consideri una struttura che emette luce cresciuta su un substrato assorbente (AS LED) ed incapsulata in una cupola epossidica.

Gli indici di rifrazione degli strati del semiconduttore sono solitamente molto simili quindi si considera un valore medio per essi n_s ; l'indice di

rifrazione della cupola è n_e . Secondo la *Legge di Snell* esiste un angolo critico θ_c oltre il quale si ha riflessione interna totale, cioè non viene rifratta luce; i fotoni generati isotropicamente nella regione attiva possono quindi essere emessi solo per direzioni contenute in un cono di ampiezza $2\theta_c$:

$$\theta_c(n_e, n_s) = \sin^{-1}\left(\frac{n_e}{n_s}\right).$$

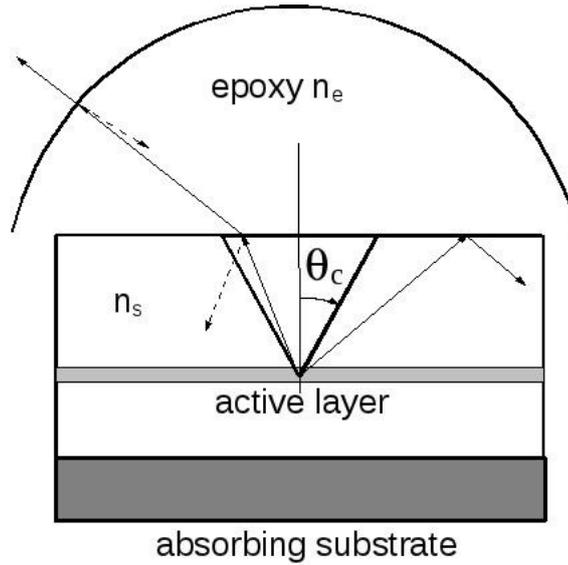


Figura 4.11: Cono di fuga di un LED incapsulato in una cupola epossidica.

Per le direzioni che sono contenute nell'angolo critico, tuttavia, non è detto che ci sia rifrazione perché parte della luce emessa può essere assorbita dall'aria epossidica circostante.

Uno degli approcci più comuni utilizzati nei LED ad alta luminosità è quello di accrescere il numero di coni di fuga: per fare questo si rimuove il substrato assorbente o se ne introduce uno trasparente (TS LED). Utilizzando uno spessore adeguato per lo strato superiore, spesso chiamato strato finestra (WL), si ottengono tre coni interi per le direzioni di emissione di luce e un numero ancora maggiore si può avere sfruttando diversi strati trasparenti posizionati a livelli strategici e con spessori adeguati (vedi figura 4.12, d), e) e f)).

L'efficienza di estrazione di un LED, in cui si ha un numero N dei coni descritti sopra, è:

$$\eta_{opt} = \frac{4n_e}{(n_e+1)^2} * \frac{1-\sqrt{1-(n_e/n_s)^2}}{2} * \sum_{i=1}^N T_i.$$

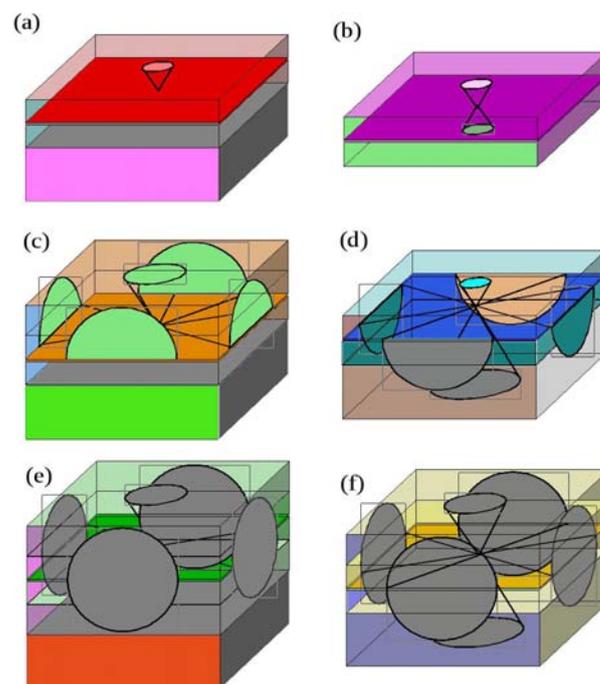


Figura 4.12: Coni di fuga nei LED. a) LED a bassa luminosità con substrato assorbente. b) TS LED. c) Utilizzo del WL.

dove il primo fattore indica i fotoni persi a causa delle riflessioni di Fresnel avvenute nell'aria epossidica; il secondo termine è una frazione dell'angolo solido per un singolo cono di fuga $[(1 - \cos\theta_c)/2]$ e il terzo è la somma delle trasmittanze per ognuno degli N coni ($0 \leq T_i \leq 1$) all'interfaccia tra semiconduttore e aria epossidica (la trasmittanza indica concettualmente il rapporto tra radiazione incidente e quella emessa).

Alcuni coni di fuga, solitamente, vengono mascherati dai contatti che assorbono la luce; altri vengono troncati a causa degli spessori troppo piccoli di alcuni strati. Tuttavia quando le basi di due coni opposti sono separate da una struttura che assorbe solo una piccola parte della radiazione incidente (piccola assorbanza, che è il logaritmo del reciproco della trasmittanza), questi due coni risultano accoppiati e se un fotone viene riflesso alla base di uno dei due, può essere emesso dall'altro. Poiché il substrato del dispositivo contribuisce all'assorbimento dei fotoni si sceglie talvolta di farlo trasparente, ma siccome la realizzazione non è facile si preferisce utilizzare una struttura DBR (distributed Bragg reflectors): si tratta di strati di materiale alternati con indici di rifrazione bassi e alti (n_H e n_L) tali che nel complesso il DBR funzioni da specchio e quindi la radiazione che altrimenti sarebbe assorbita viene invece riutilizzata. Gli spessori degli strati sono dati da:

$$h_H = (\lambda_0/4)/(n_H \cos\theta_H)$$

$$h_L = (\lambda_0/4)/(n_L \cos\theta_L)$$

con λ_0 la lunghezza d'onda nell'aria e θ_H e θ_L gli angoli di incidenza per ogni strato; più sono diversi gli indici di rifrazione, più luce viene riflessa. Un esempio di struttura DBR si può vedere in figura 4.13.

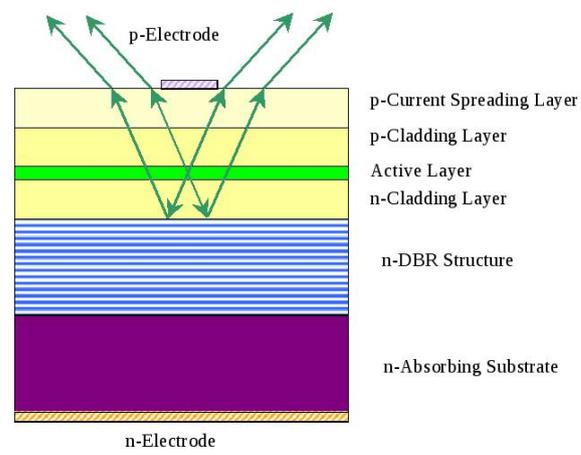


Figura 4.13: Schema di un LED DBR.

4.5 LAMPADE BIANCHE ALLO STATO SOLIDO

L'obiettivo finale dell'illuminazione allo stato solido è quello di produrre luce bianca in modo da poter eliminare l'utilizzo delle lampadine a incandescenza e fluorescenti. Lo sviluppo del LED che produce luce bianca è iniziato con lo studio degli emettitori AlInGaN blu ad alta luminosità: poi, a partire dai LED che producono radiazione con lunghezza d'onda corta, sono stati sviluppati quelli bianchi grazie a mix di LED colorati (dicromatici e tricromatici). Ci sono essenzialmente tre modi per generare luce bianca a partire dai LED, illustrati di seguito:

A) il primo metodo mescola la luce proveniente da tre, o più, sorgenti monocromatiche: rossa, verde e blu (RGB) è quella che garantisce la massima efficienza.

B) La seconda tecnica usa un LED blu la cui radiazione investe uno o più fosfori che emettono luce, integrati in un pc-LED (phosphor-converted LED). In realtà una parte della radiazione nel blu viene lasciata passare in modo da avere la componente di quel colore per creare il colore bianco, mentre la radiazione che attraversa il fosforo viene convertita in rosso e verde.

C) Una lampada UV viene utilizzata per implementare la terza tipologia: tutta la radiazione emessa investe i fosfori rosso, verde e blu.

Il caso A) rappresenta i *multichip* LED (MC), mentre gli altri due fanno parte della classe dei *phosphor conversion* LED (PC).

Analizziamo innanzitutto quali sono gli spettri ottimali per generare luce bianca: come per i LED colorati si prevede di ottenere l'efficienza radiante massima massimizzando allo stesso tempo l'efficienza quantica interna e quella di estrazione. In secondo luogo è importante l'ottimizzazione della SPD (vedi capitolo 2) per raggiungere efficacia luminosa e CRI elevati.

Si concentri ora l'attenzione sulla SPD e per avere un punto di riferimento si considerino l'efficacia e il CRI di uno spettro continuo in tabella 4.2.

Nella tabella sono stati considerati spettri metameric con le tre sorgenti CIE standard A (tungsteno a 2856 K), B (luce diretta da sole, circa 4870 K) e D_{65} (luce diurna, circa 6504 K).

Il primo spettro, quello intero di Planck, ha R_a pari a 100 ma efficacia bassa perché viene emessa radiazione anche nei range che non appartengono al visibile.

Se invece si considera solo il range del visibile nello spettro di Planck viene

Spectral Range	Temperature (K)	Efficacy (lm/W)	General CRI
Full (Planckian)	2856	17	100
	4870	79	100
	6504	95	100
380 nm-780 nm (trimmed-Planckian)	2856	154	100
	4870	196	100
	6504	193	100
430 nm-660 nm (trimmed-Planckian)	2856	334	95
	4870	320	95
	6504	305	95

Tabella 4.2: Tre spettri metamericici con le sorgenti CIE standard.

mantenuto lo stesso R_a mentre l'efficacia è maggiore.

Infine eliminando le lunghezze d'onda del visibile alle quali l'occhio umano è meno sensibile si ottiene un'efficacia ancora migliore, a scapito di cinque punti persi nel CRI, ma è un peggioramento sostenibile.

Si nota così come ci sia un trade-off tra l'efficacia luminosa e il CRI.

Poiché produrre luce bianca significa utilizzare un certo numero di sorgenti monocromatiche diverse che mantengano lo spettro di uscita vicino al luogo di Planck si introduce una funzione che permette di trovare, attraverso il calcolo del suo massimo globale, l'ottimo compromesso tra l'efficacia e la resa del colore:

$$F_\sigma(S_1, \dots, S_n, I_1, \dots, I_n) = \sigma K + (1 - \sigma)R_a$$

dove n è il numero di sorgenti primarie e S_i e I_i , ($i = 1, \dots, n$) sono rispettivamente le SPD normalizzate e le relative intensità delle sorgenti. Qui σ è il peso che controlla il trade-off tra l'efficacia e la resa del colore (CRI) ($0 \leq \sigma \leq 1$). Il trade-off nominato può essere facilmente analizzato per una SPD composta di due sole righe (sistema dicromatico), ma si ha in tal caso una sorgente luminosa di scarsa qualità. Se, invece, si utilizzano più sorgenti primarie, il risultato è un'illuminazione accettabile che può essere applicata nella maggior parte delle situazioni: l'ottimizzazione della funzione sopra presentata risulta però complicata.

LED a conversione di fosfori (casi B e C) Uno dei modi illustrati brevemente per produrre luce bianca è quello di utilizzare un chip in AlInGaN che emette luce blu e un fosforo che emette poi nel giallo: In figura 4.14 si vede il chip blu montato su una superficie riflettente e coperto con un misto di resina epossidica e particelle di fosforo. L'intera struttura è coperta da una resina trasparente. Una parte della luce blu è assorbita dalle particelle di fosforo e convertita in luce gialla. Il resto fuoriesce nella resina trasparente.

Il diagramma CIE del 1931 di figura 4.15 mostra l'emissione da un LED in AlInGaN nel blu a 465 nm e quella di un fosforo con picchi a 560, 570 e 580 nm: le intersezioni con il luogo di Planck mostrano che la luce bianca a temperature di colore sopra i 4000 K è realizzabile.

Relativamente alla realizzabilità e utilità dei PC-LED bisogna sottolineare come essi abbiano una vita molto ridotta rispetto ai LED blu (da 5000 a 6000 ore). La causa principale è la degradazione del fosforo e un cambiamento nella trasmittanza della capsula. Per ovviare a tali problemi i PC-LED sono stati dotati di un dissipatore termico e di materiali più resistenti per la capsula. Vengono utilizzati, però, anche dei PC-LED policromatici perché permettono di avere un'efficienza e una resa del colore

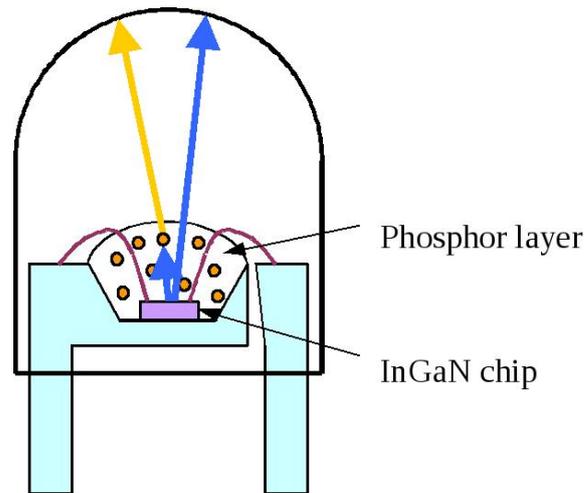


Figura 4.14: AlInGaN white LED.

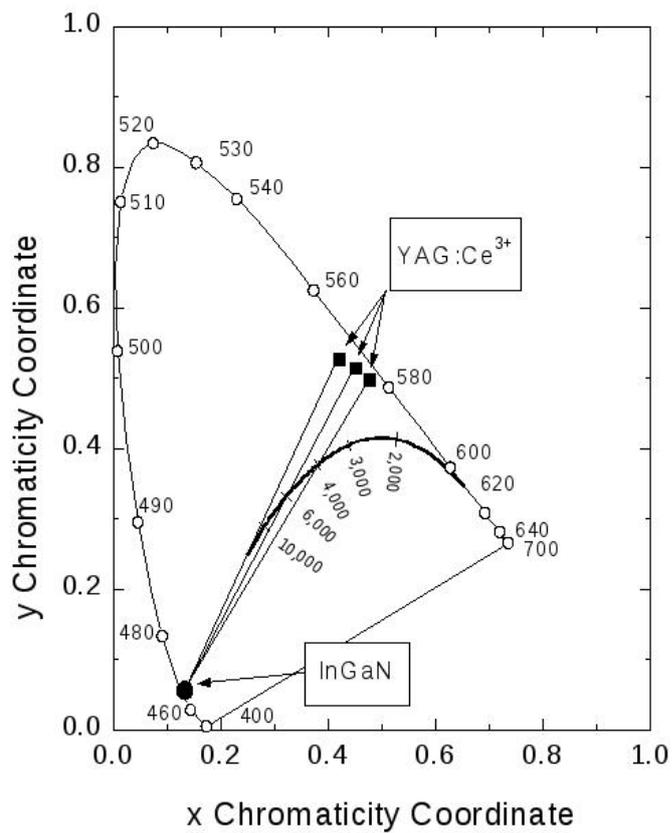


Figura 4.15: Diagramma CIE, 1931.

Color Temperature (K)	Wavelength (nm)/Intensity		K (lm/W)	R_a
	I_1	I_2		
2856	450/0.157	580/0.843	492	-13
4870	450/0.325	572/0.675	430	3.0
6504	450/0.399	569/0.601	393	9.5

Tabella 4.3: Dati relativi a un two-chip LED (con larghezza spettrale di 30 nm) ottimizzato per avere la più alta efficienza.

migliori.

La combinazione ottima di sorgenti monocromatiche (450/540/610 nm) può essere realizzata usando una luce blu parzialmente assorbita da un chip in AlInGaN e da due fosfori per le regioni del verde e dell' arancio-rosso.

Per i LED UV la parte visibile dello spettro è totalmente generata dai fosfori: utilizzando tre di questi LED con larghezza spettrale compresa tra 70 e 120 nm si possono ottenere uno spettro quasi continuo e un CRI maggiore di 90; tuttavia secondo la *legge di Stokes* parte della radiazione emessa viene persa sottoforma di calore, mentre per la restante varia la lunghezza d'onda che si sposta nel range del visibile in base alla scelta dei fosfori.

LED Multichip (caso A) A confronto con un PC-LED, un MC-LED dovrebbe avere efficienza maggiore dato che non sfrutta i fosfori e quindi non c'è lo *Stokes shift* nel quale viene persa energia; vengono poi evitati i problemi relativi all'uso dei fosfori.

È però vero che il costo di questi LED è maggiore a causa della complessità della loro costruzione. Inoltre si ha l'emissione di righe spettrali strette (diversamente da uno spettro quasi continuo del caso precedente).

I LED dicromatici (tabella 4.3) di questo tipo sono quelli aventi efficienza maggiore di tutte le sorgenti che producono luce bianca: si può stimare che le due righe abbiano una larghezza pari a 30 nm (caratteristica dei LED colorati); le SPD sono ottimizzate grazie all'elevata efficienza a determinate temperature di colore, ma i valori del CRI sono prossimi a zero. L'unica sorgente luminosa a cui sono comparabili sono le lampade al sodio a bassa pressione, che appunto vengono utilizzate dove non è richiesta una resa del colore ottima.

Utilizzando tre o più chip differenti non solo si ottiene una resa del colore della luce bianca migliore, ma diventa anche più ampia la gamma di

colori riproducibili. Si può avere il controllo del funzionamento variando la corrente media di ogni chip o scegliendo opportunamente il numero dei differenti chip colorati. In figura 4.16 si ha il modello spettrale di una lampadina allo stato solido (4780 K) composta da due, tre, quattro e cinque LED fondamentali con larghezze spettrali di 30 nm. Gli spettri fanno riferimento ai maggiori CRI raggiungibili per ogni LED.

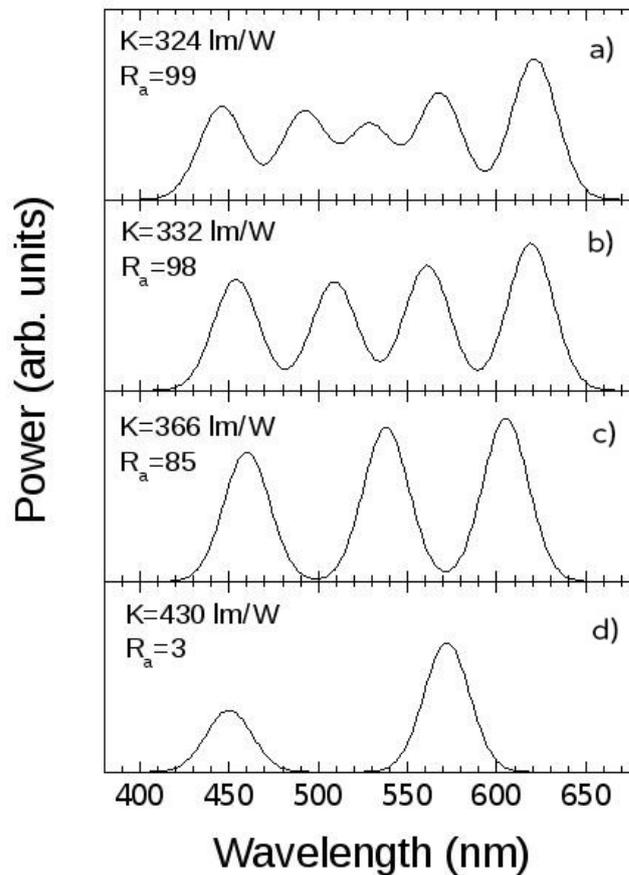


Figura 4.16: Modello di spettro di un MC-LED: a) LED pentacromatico; b) LED quadricromatico; c) LED tricromatico e d) LED dicromatico .

4.6 APPLICAZIONI DELL' ILLUMINAZIONE ALLO STATO SOLIDO

Grazie all'aumento dell'efficienza luminosa che caratterizza i LED rispetto alle altre sorgenti di illuminazione, il numero di applicazioni in cui vengono utilizzati è sempre crescente; ecco alcuni esempi:

- Semafori: in questo campo i LED hanno ormai superato di gran lunga le lampade a incandescenza per la maggior durata che aumenta la sicurezza stradale; l'eliminazione della parabola riflettente evita che sembrino accesi tutti e tre i colori in presenza del sole. Si risparmiano infine circa due terzi dell'energia.
- Illuminazione stradale: questo fu il primo campo in cui si ebbe una vasta e ampia espansione dell'utilizzo dei LED ad alta luminosità e avvenne all'inizio degli anni '90; si poterono sostituire le lampade a incandescenza, che richiedevano anche più di 100 W di potenza, con i LED per i quali erano sufficienti 10 W o anche meno. Da non tralasciare, poi, il grande vantaggio dei LED che duravano molto di più e richiedevano di conseguenza meno manutenzione. Infine è molto importante il fatto che, a differenza delle lampade a incandescenza, per i LED è quasi impossibile una rottura brusca, accade al più che producano meno luce.
- Segnalatori di frenata delle automobili: oltre a questo utilizzo è previsto l'inserimento dei LED anche per gli indicatori di direzione, per i fari abbaglianti e anabbaglianti.
- Cartelloni a messaggio variabile: anche le piccole e medie imprese possono farsi pubblicità con uno strumento che ha un alto impatto visivo.
- Medicina: l'itterizia (colorazione giallastra della pelle, delle sclere e delle mucose) è causata da elevati livelli di bilirubina nel sangue. Normalmente nei neonati scompare entro la prima settimana di vita, ma se persiste oltre la seconda, oltre al fatto che può danneggiare il cervello, può anche indicare la presenza di una patologia. La *fototerapia* è largamente utilizzata per controllare l'itterizia neonatale. La luce con lunghezze d'onda comprese tra i 420 e i 480 nm è assorbita dalla pelle e trasforma la bilirubina in isomeri solubili nell'acqua, facilmente espulsi dal fegato e dai reni. Le sorgenti luminose più comunemente utilizzate per questo scopo (fluorescenti, alogene e altre ancora) hanno diversi aspetti negativi: per esempio lo spettro a banda larga causa la dissipazione di calore, radiazione UV e generazione di ozono. Inoltre producono luce tremolante, richiedono voltaggi elevati per essere alimentate, durano poco

e non sono molto resistenti.

Un altro caso di utilizzo della fototerapia è la cura della SAD (Seasonal Affective Disorder), un malessere che si presenta soprattutto in donne e bambini che vivono alle alte latitudini, dove la poca luce favorisce la depressione, la stanchezza, l'appetito eccessivo e la sonnolenza. Ebbene l'esposizione alla luce artificiale può aiutare a guarire questa malattia.

La *terapia fotodinamica* viene utilizzata, invece, nei casi di cancro: viene iniettato nel sangue un agente fotosensibilizzante che va ad inserirsi nei mitocondri delle cellule tumorali; in seguito viene attivato con luce rossa (630 nm).

Tra gli aspetti che favoriscono l'uso dei LED in queste applicazioni vi sono la bassa produzione di calore, la cromaticità e la temperatura di colore sono molto controllabili, le radiazioni non sono dannose per la salute e l'efficienza è elevata.

- Nell'ambito della crescita delle piante sono stati condotti diversi studi ed esperimenti che hanno mostrato come la luce rossa (prodotta dai LED) con una certa percentuale di radiazione nel blu favorisca l'avvenire della fotosintesi clorofilliana.

Una grande varietà di applicazioni biotecnologiche legate alla fotosintesi si affida all'illuminazione prodotta dai LED: in particolare la coltura di alghe per quanto riguarda i trattamenti di depurazione delle acque, le applicazioni in agricoltura e la rigenerazione di ossigeno nei sistemi di supporto alla vita.

Per sfruttare al meglio le proprietà delle alghe Lee e Palson nel 1994 costruirono un fotobioreattore (PBR) ad alta densità basato sui LED. Per esempio fu molto utile la sua applicazione in ambito spaziale, dove è necessaria la rigenerazione dell'atmosfera in assenza di gravità e per lunghi periodi (bassa perdita di fotoni, poco calore disperso, peso e dimensioni piccoli, vita molto lunga).

- Fluorimetri compatti e poco costosi sono utilizzati per analizzare fenomeni di fluorescenza in fisica, chimica, biochimica, bioingegneria e altre sfere. In questo tipo di esperimenti viene irradiato un campione con radiazione di piccola lunghezza d'onda (ultravioletto) e dalla misura qualitativa e quantitativa della radiazione emessa dal campione quando rilascia l'energia prima assorbita si traggono i risultati. Se l'emissione, che consiste di radiazioni di minore o uguale energia (quindi di maggiore o uguale lunghezza d'onda), avviene in un tempo

dell'ordine del milionesimo di secondo dall'assorbimento, il fenomeno prende il nome di fluorescenza. Si tratta invece di fosforescenza se questo tempo è circa mille volte più lungo (milionesimi di secondo). Uno strumento per l'analisi fluorimetrica (fluorimetro) è costituito da una sorgente irradiante, da una cella che contiene la soluzione campione e da un rivelatore per misurare l'intensità della luce di fluorescenza o di fosforescenza.

Le misure sul tempo di rilascio dell'energia assorbita da parte di un corpo sono informazioni utili relativamente alla struttura dei composti chimici. Gli HB-LED (high-brightness) rappresentano un'attrazione molto forte in questo campo perché per loro "natura" operano a regime pulsato ad alta frequenza dove altre sorgenti avrebbero bisogno di uno strumento esterno che ne regoli l'accensione a intermittenza. Inoltre, sebbene l'energia prodotta in ogni pulsazione non sia elevatissima, i LED guadagnano in stabilità e facilità di polarizzazione, quindi di controllo.

- TL e OSL (luminescenza termicamente e otticamente stimolata) sono un tipo particolare di fosforescenza osservata in materiali isolanti e semiconduttori, nei quali l'emissione luminosa successiva all'esposizione a radiazioni è ritardata per la presenza di livelli trappola associati a difetti.

Attraverso queste tecniche, in cui possono essere utilizzati i LED per produrre le radiazioni, è possibile misurare le cariche intrappolate usando come sorgente di stimolazione il calore (TL) o luce di lunghezza d'onda e intensità opportune (OSL).

Grazie alle osservazioni dei risultati ottenuti, se si tratta per esempio di sedimenti, si può stabilire l'era archeologica di appartenenza del materiale.

- Alimentazione dei LED per retroilluminazione di schermi LCD: il funzionamento dell'LCD si basa sulle proprietà ottiche dei cristalli liquidi. Questi vengono inseriti fra due superfici di vetro provviste di tanti contatti elettrici con i quali si può applicare al liquido contenuto un campo elettrico. Ogni contatto controlla una piccola porzione del pannello identificabile come un pixel, che però non è fisicamente separato da quelli adiacenti.

Sulle facce esterne dei pannelli ci sono due filtri polarizzatori disposti su assi perpendicolari tra loro. I cristalli liquidi ruotano di 90° la polarizzazione della luce che arriva da uno dei polarizzatori e la fanno passare attraverso l'altro.

Quando il campo elettrico non viene applicato la luce può passare attraverso l'intera struttura e, salvo la porzione di luce assorbita dai polarizzatori, l'apparecchio risulta trasparente.

Quando il campo elettrico è attivo le molecole del liquido si allineano

parallelamente al campo, limitando così la rotazione della luce entrante. Se i cristalli sono del tutto allineati al campo, la luce che li attraversa è polarizzata perpendicolarmente al secondo polarizzatore e di conseguenza viene bloccata facendo apparire il pixel non illuminato.

L'applicazione di una determinata tensione ai cristalli determina sia la quantità di luce bianca filtrata sia la variazione della quantità di luce che attraversa il dispositivo ottenendo la scala dei grigi. I colori si ottengono semplicemente filtrando la luce bianca.

In un LCD la maggior parte della potenza consumata è dovuta al sistema di retroilluminazione, che viene realizzata in due modi:

- *direct backlight*: le sorgenti luminose vengono incorporate in un contenitore riflettente che diffonde la luce in tutte le direzioni e la rende omogenea; con questa tecnica si ottengono schermi ad alta luminosità.

- *indirect backlight*: le sorgenti di luce vengono applicate ai lati dello schermo dove la luce prodotta viene diffusa uniformemente su tutta la superficie e si usa una lamina microprismatica che omogeneizza la luce e ne aumenta la luminosità.

Infine si parla di illuminazione monocromatica se è realizzata con sorgenti di luce di un solo colore, altrimenti si tratta di retroilluminazione RGB (si usano una sorgente rossa, una verde e una blu).

Ovviamente l'obiettivo in questo campo è quello di utilizzare i LED come sorgenti per la retroilluminazione ma, essendo essi sorgenti puntiformi, è necessario progettare una retroilluminazione ben distribuita.

Si possono suddividere i LED in due categorie: quelli a bassa corrente che assorbono da 10 a 40 mA e quelli ad alta corrente che assorbono corrente maggiore di 350 mA.

Se si utilizza la prima categoria, dato che il flusso luminoso è basso in quel caso, è necessario inserire un gran numero di dispositivi che comunque sono a basso consumo. D'altro canto i LED ad alta corrente possiedono un'elevata luminosità, infatti sono chiamati HB LED; ne basta un numero inferiore per retroilluminare uno schermo, ma bisogna collocarli in modo da dissipare nel modo più adeguato il calore e per ottenere una luce più uniforme su tutta la superficie.

Solitamente i LED a bassa corrente sono alimentati in continua con una resistenza R_s in serie che limita il valore della corrente. Il valore di R_s viene scelto in base al valore di lavoro che si desidera per la corrente ed esso dipende a sua volta dalla luminosità che si vuole ottenere e dalla lunghezza d'onda della luce emessa; inoltre la resistenza è necessaria perché il dispositivo non si rompa.

Solitamente si dispone di una tensione di alimentazione nettamente superiore a quella del LED. Collegando direttamente il LED all'ali-

mentazione si avrebbe perciò un eccesso di corrente che lo romperebbe. D'altra parte se la corrente I che circola è troppo bassa, e insieme la tensione (V) dato che per Ohm si ha $V \propto I$, il LED o non si accende o emette luminosità molto ridotta rispetto a quella che si potrebbe raggiungere.

Ora, se per usare un normale LED colorato come semplice spia si può approssimare il calcolo della *resistenza di limitazione* (che garantisce la giusta caduta di tensione ai capi del LED) rischiando al più di avere meno luce, non è consigliabile fare altrettanto con i LED ad alta luminosità o con gli UV: questo perché si utilizzerebbero solo in parte le peculiarità di un LED potenzialmente molto luminoso e costoso. Inoltre c'è la possibilità che si bruci o che abbia una vita molto breve.

In un LED, sempre secondo la Legge di Ohm, la resistenza è inversamente proporzionale alla corrente di lavoro dunque un piccolo aumento di quest'ultima la farebbe diminuire. La tensione di alimentazione è costante perciò la corrente aumenta progressivamente fino alla rottura del LED. Si può sfruttare la legge di cui sopra per calcolare il valore da attribuire a R_s :

$$R_s = \frac{V_d - V_f}{I_f}$$

dove V_d è la tensione ai capi della serie LED- R_s , V_f quella ai capi del LED e I_f la corrente diretta che attraversa il LED.

La tecnica di pilotaggio tramite R_s viene detta *controllo passivo*: essa è poco costosa, ma dissipa molto calore perciò è preferibile quando si usano tanti dispositivi, in modo che la potenza persa per effetto Joule sia piccola rispetto a quella di uscita (dato che si usano molti LED). Inoltre la serie di LED presenta una resistenza equivalente dell'ordine del centinaio di Ohm quindi non è necessario che R_s sia grande; invece per i LED ad alta corrente la resistenza serie è di pochi Ohm e per poter utilizzare il controllo passivo occorrerebbe una R_s elevata che, a causa del valore elevato della corrente, comporterebbe una notevole caduta di tensione ai suoi capi. Si avrebbero di conseguenza dissipazione del calore e potenza persa che limiterebbero il rendimento e l'affidabilità del sistema.

In questi casi si utilizza il *controllo attivo* che usa dei regolatori lineari per limitare la corrente accompagnati a dei *convertitori a commutazione*. Da quello che è scritto sopra si può concludere che la retroilluminazione a LED presenta diversi vantaggi come il continuo miglioramento dell'efficienza luminosa e il numero esiguo di convertitori e componenti; lo spettro ristretto e l'elevata gamma dei colori della luce prodotta dai LED rende possibile l'ottenimento di immagini di elevata qualità.

4.7 CONCLUSIONI

In generale si è visto quindi che, nonostante lo svantaggio di natura economica (i costi sono ancora elevati), i LED sono fonte di grande speranza nella direzione del risparmio energetico, soprattutto perché il loro campo d'azione si sta ampliando velocemente.

Essi presentano una lunga durata di vita e robustezza, che abbassa la sensibilità alle sollecitazioni, all'umidità e alle vibrazioni meccaniche, rendendoli ideali anche per applicazioni automobilistiche. L'assenza di mercurio va incontro a esigenze di rispetto dell'ambiente; inoltre la luce è priva di componenti infrarosse e ultraviolette ed evita così il degradamento dei materiali a causa di questi raggi. Erano già stati descritti, infine, gli aspetti positivi legati alla facilità di installazione e ai bassi costi di manutenzione, aspetto quest'ultimo di fondamentale importanza.

Bibliografia

- [1] S. D. Mauro, C. Lazzarotti, and D.-A. U. d. C. Angelo Raciti, “Lampade compatte fluorescenti e lampade a led,” *AEIT*, March 2012.
- [2] L. Ribellino, S. Pioppo, and S. Karel Blaha, “Circuiti di pilotaggio ad alto rendimento per lampade a led,” *AEIT*, April 2010.
- [3] A. Bovo and I. S. Fulvio Giorgi, “Risparmio energetico e qualità: sorgenti luminose a confronto,” *AEIT*, April 2010.
- [4] M. di Guardo, F. C. Silvestro Antonio Russo, STMicroelectronics, G. Laudani, S. Musumeci, and U. d. C. Angelo Raciti, DIEES-ARIEL, “Alimentazione dei led per retroilluminazione di schermi lcd,” *AEIT*, April 2010.
- [5] J. A.G., M. Vrenken L.E., Physical Science, M. Instrumentation, and I. P. A. Education Reviews, “Fluorescent lamps and low pressure sodium lamps,” *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A*, vol. 127, pp. 149–157, 1980. Date of Current Version : 11 novembre 2008.
- [6] J. D. Hooker, “The low-pressure sodium lamp,” in *Plasma Science*, 1997.
- [7] R. C. Arturas Zukauskas, Michael S. Shur, *INTRODUCTION TO SOLID-STATE LIGHTING*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 2002. ISBN: 0-471-21574-0.
- [8] R. C. Jaeger and T. N. Blalock, *Microelettronica*. McGraw-Hill, 1 ed., 2009. ISBN: 978-88-386-6504-2.
- [9] A. T. g. Valitutti and A. Gentile, *Le idee della chimica*. Zanichelli, 3 ed., 2008. ISBN: 978-88-08-25636-2.
- [10] Online available http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/high-pressure-discharge-lamps/professional-knowledge/operating-principle-high-pressure-discharge/index.jsp. Ultima consultazione luglio 2013.
- [11] Online available http://www.osram.it/osram_it/strumenti-e-servizi/servizi/faq/lampade-fluorescenti/index.jsp. Ultima consultazione luglio 2013.

- [12] Online available <http://ledsmagazine.com/features/1/1/10>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [13] “Light emitting diodes (leds).” Online available <http://www.ele.uri.edu/courses/ele432/spring08/LEDs.pdf>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [14] Online available ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/lighting. Ultima consultazione luglio 2013.
- [15] Online available http://www.iet.unipi.it/m.luise/com_ottiche/cap2.html. Ultima consultazione luglio 2013.
- [16] “Il diodo ad emissione di luce (led): principio di funzionamento e applicazioni.” Online available <http://it.emcelettronica.com/diodo-ad-emissione-di-luce-led-principio-di-funzionamento-e-applicazioni>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [17] Online available <http://ledsmagazine.com/features/1/1/7>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [18] Online available <https://moodle.dei.unipd.it/course/view.php?id=2149&page=info>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [19] “Radiative and nonradiative recombination.” Online available http://lyle.smu.edu/ee/smuphotonics/Gain/CoursePresentationFall03/Aug29_ywan.pdf. Ultima consultazione luglio 2013.
- [20] Online available <http://www.grandidizionari.it>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [21] “Spectral power distribution.” Online available <https://www.sylvania.com>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [22] “Teoria del colore.” <http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CE4QFjAE&url=http://paborazione.Quhhga3yLPCH-0A&bvm=bv.49784469,d.bGE>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [23] Online available www.treccani.it. Ultima consultazione luglio 2013.
- [24] Online available <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/cie.html>. Ultima consultazione luglio 2013.
- [25] “Light and color methods of achieving high cri with leds.” Online available http://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2012/02/OSRAM-OS_WEBINAR_HighCRI_06-26-12.pdf. Ultima consultazione luglio 2013.
- [26] “Calcolatore resistenze di limitazione led.” Online available <http://www.pclaboratorio.com/myprojects/ledcalc.htm>. Ultima consultazione luglio 2013.

- [27] “Comparazione delle sorgenti luminose tradizionali.” Online available <http://www.iecc-online.com/COMPARAZIONE> Ultima consultazione luglio 2013.
- [28] Online available <https://agenda.infn.it/getFile.py/access?contribId=3&resId=0&materialId=slides&confId=1962>. Ultima consultazione agosto 2013.
- [29] Online available <http://crf.uniroma2.it/wp-content/uploads/2010/04/SpazioColori.pdf>. Ultima consultazione settembre 2013.
- [30] “Fig. 3.1.” Online available <http://www.architettodileo.it/illuminazione.html>. Ultima consultazione agosto 2013.
- [31] “Fig. 3.3.” Online available http://www.elektro.it/dati_tabelle/illumi_notecnica.html. Ultima consultazione agosto 2013.
- [32] “Fig. 3.7.” Online available http://www.osram.it/osram_it/notizie-e-conoscenza/lampade-a-scarica-ad-alta-pressione/conoscenza-professionale/principio-di-funzionamento-della-scarica-ad-alta-pressione/index.jsp. Ultima consultazione agosto 2013.
- [33] “Fig. 4.1, 4.3, 4.4.” Online available http://www.istitutosangiovannibosco.net/cennini_donbosco/e-learning/percorsi%20di%20scienze/ecosistemi/cella_fotovoltaica.htm. Ultima consultazione agosto 2013.
- [34] “Fig. 4.2.” Online available http://utenti.quipo.it/itislanciano/bande/-livelli_en.htm. Ultima consultazione agosto 2013.
- [35] “Fig. 4.8.” Online available http://www.iet.unipi.it/m.luise/com_optiche/cap2.html. Ultima consultazione agosto 2013.
- [36] “Fig. 2.1, 2.3, 2.5, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16.” Online available ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/lighting. Ultima consultazione agosto 2013.
- [37] “Fig. 2.4.” Online available <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/colchar.html#c2>. Ultima consultazione agosto 2013.
- [38] “Fig. 2.6, 2.7, 2.8.” Online available <http://www.ecse.rpi.edu/schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/chap17.htm>. Ultima consultazione agosto 2013.
- [39] “Fig. 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12.” Online available <http://www.iecc->

- online.com/COMPARAZIONE%20SORGENTI%20LUMINOSE.pdf.
Ultima consultazione agosto 2013.
- [40] “Fig. 4.5.” Online available [http://it.wikipedia.org/wiki/File:Giunzi
one_p-n.png](http://it.wikipedia.org/wiki/File:Giunzi_one_p-n.png). Ultima consultazione agosto 2013.
- [41] “Fig. 4.6.” Online available www.electroyou.it. Ultima consultazione agosto 2013.
- [42] “Fig. 4.7.” Online available <http://appuntialvolo.it/189/>. Ultima consultazione agosto 2013.
- [43] “Fig. 2.2.” Online available [http://blogs.isidavinci.it/valeria_alessan
dro/files/2012/04/spettro_2.gif](http://blogs.isidavinci.it/valeria_alessandro/files/2012/04/spettro_2.gif). Ultima consultazione agosto 2013.
- [44] “Tab. 2.1, 4.2, 4.3.” Online available ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/lighting. Ultima consultazione agosto 2013.
- [45] “Tab. 3.1.” Online available [http://www.iecc-
online.com/COMPARAZIONE%20SORGENTI%20LUMINOSE.pdf](http://www.iecc-online.com/COMPARAZIONE%20SORGENTI%20LUMINOSE.pdf). Ultima consultazione agosto 2013.
- [46] “Tab. 4.1.” AEIT n.3, March 2012,.

Elenco delle tabelle

2.1	Range di illuminamento consigliati per i diversi tipi di attività.	7
3.1	TABELLA COMPARATIVA (valori medi tipici)	29
4.1	Principali colori della luce emessa dai diodi LED	46
4.2	Tre spettri metamericici con le sorgenti CIE standard.	52
4.3	Dati relativi a un two-chip LED (con larghezza spettrale di 30 nm) ottimizzato per avere la più alta efficienza.	55

Elenco delle figure

2.1	Sensibilità spettrale normalizzata: $V(\lambda)$, vista fotopica (coni: rossi verdi o gialli), ambiente luminoso; $V'(\lambda)$, vista scotopica (bastoncelli), ambiente buio.	4
2.2	Spettro elettromagnetico.	7
2.3	1931 CIE color-matching functions: porpora \bar{x} ; verde \bar{y} ; blu \bar{z}	9
2.4	I tre attributi del colore: tinta, saturazione e luminosità. . .	9
2.5	Diagramma cromatico CIE, 1931.	11
2.6	Diagramma cromatico CIE, 1931. I colori monocromatici sono localizzati sul perimetro. La saturazione dei colori decresce all'avvicinarsi al centro del diagramma (dove è localizzata la luce bianca).	12
2.7	Punti del diagramma CIE in cui emettono luce i LED (Schubert e Miller, 1999).	13
2.8	Diagramma CIE di cromaticità uniforme, 1976.	15
3.1	Lampada a incandescenza	17
3.2	Lampada alogena	19
3.3	Lampada fluorescente	20
3.4	Lampada fluorescente tubolare	20
3.5	Lampada fluorescente compatta.	23
3.6	Lampada al sodio a bassa pressione.	24
3.7	Lampada a scarica ad alta pressione.	25
3.8	Lampada SAP.	25
3.9	Lampada a ioduri metallici	26
3.10	LED	27
3.11	LED	28

3.12	LED	28
4.1	Rappresentazione bidimensionale del reticolo cristallino del silicio e dei legami covalenti. Per temperature prossime a 0 K tutti i legami sono soddisfatti.	33
4.2	Modello a bande di energia	33
4.3	Modello a bande di energia per semiconduttore estrinseco	34
4.4	Giunzione p-n.	35
4.5	Giunzione p-n.	37
4.6	Distribuzione dei portatori maggioritari e minoritari.	42
4.7	Corrente di un diodo.	42
4.8	Diagrammi di stato di semiconduttori a gap diretto (a) ed indiretto (b).	43
4.9	Potenziale di una eterogiunzione p-n	44
4.10	Spettro di elettroluminescenza in un LED ad alta luminosità attraversato da una corrente di 20 mA.	45
4.11	Cono di fuga di un LED incapsulato in una cupola epossidica.	47
4.12	Coni di fuga nei LED. a) LED a bassa luminosità con substrato assorbente. b) TS LED. c) Utilizzo del WL.	48
4.13	Schema di un LED DBR.	50
4.14	AlInGaN white LED.	54
4.15	Diagramma CIE, 1931.	54
4.16	Modello di spettro di un MC-LED: a) LED pentacromatico; b) LED quadricromatico; c) LED tricromatico e d) LED dicromatico	56