

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione

Tesina di Laurea Triennale

I LED nel panorama odierno delle sorgenti luminose

Relatore:

prof. Paolo Tenti

Candidato:

Enrico SCARABOTTOLO

Settembre 2010

Sommario

Nei prossimi mesi non saranno più disponibili nei negozi le inefficienti lampade a incandescenza, che saranno sostituite da altri tipi di sorgenti come le lampade fluorescenti. Nel mercato illuminotecnico sono presenti anche lampade costituite da LED, che probabilmente in futuro saranno le più utilizzate in diversi ambiti applicativi, viste le efficienze energetiche e le durate più alte rispetto alle lampade comunemente utilizzate. La tecnologia dei LED risale alla metà del 1900 e nei decenni scorsi questo tipo di sorgente luminosa è stata ampiamente sfruttata per tutte le luci di segnalazione. Solo recentemente, con lo sviluppo di nuovi semiconduttori e il miglioramento delle prestazioni, si è pensato di utilizzare queste sorgenti per l'illuminazione.

Tuttavia alcune peculiarità dei LED, come l'emissione in una banda molto stretta e la dipendenza di molte caratteristiche elettriche e illuminotecniche dalla temperatura, non facilitano la loro applicazione nel settore illuminotecnico, ma rendono necessari degli artifici per rendere bianca la luce emessa e per tenere controllata la temperatura della giunzione P-N. Vedremo come sono state superate queste difficoltà, fino ad ottenere delle lampade che, nonostante il costo ancora molto alto, hanno tutte le qualità per poter prendere il posto delle altre sorgenti in varie applicazioni, garantendo un notevole risparmio energetico.

Indice

1	Introduzione	1
	Grandezze fotometriche e colorimetriche	2
2	Sorgenti luminose	7
	2.1 Sorgenti a incandescenza	7
	2.2 Sorgenti a scarica	10
	2.3 Sorgenti a induzione	13
3	LED	15
	3.1 Principi di funzionamento: modello a bande e ricombinazione . .	15
	3.2 Alimentazione	17
	3.3 Colore	19
	3.4 Regime termico: temperatura di giunzione e dissipatori	23
	3.5 Ottiche	24
4	Caratteristiche dei LED e confronto con le altre sorgenti	27
	4.1 Efficienza luminosa	27
	4.2 Vita utile	30
	4.3 Sostanze utilizzate nella produzione	32
	4.4 Costi	33
	4.5 Attuali campi di ricerca	35
5	Conclusioni	37
	Bibliografia	39

1

Introduzione

Si stima che in Europa, Stati Uniti d'America e in tutti i paesi industrializzati circa il 20% dell'energia elettrica venga impiegata per produrre luce e che molto probabilmente la domanda globale di energia destinata all'illuminazione crescerà considerevolmente, soprattutto per la richiesta sempre maggiore proveniente dai paesi in via di sviluppo.

Tra i molteplici usi che vengono fatti dell'energia elettrica, dalla conversione in energia meccanica attraverso i motori elettrici, alla produzione di calore in forni e stufe, quello dell'illuminazione è probabilmente il settore di utilizzo nel quale l'efficienza della conversione è più bassa. Questo fa capire che gli studi e i miglioramenti in questo settore potrebbero essere molto importanti per avere un notevole risparmio energetico (con conseguente riduzione di emissioni di gas-serra).

Nel corso degli anni, proprio con lo scopo di diminuire i consumi di energia elettrica, sono state pensate e create nuove sorgenti luminose basate su principi di funzionamento diversi. Una panoramica delle diverse tipologie di lampade e delle loro caratteristiche è presentata nel capitolo 2.

Inoltre in molti paesi le stesse autorità stanno "forzando" il passaggio a tecnologie più efficienti rispetto alle lampadine tradizionali: in questo senso anche la Commissione Europea ha adottato dei regolamenti che prevedono (vedi tabella 1.1) la graduale eliminazione dagli scaffali dei negozi delle lampade a incandescenza (e il divieto di utilizzarle anche per l'illuminazione stradale).

Molto probabilmente la tecnologia che rimpiazzerà le vecchie lampade sarà quella delle fluorescenti compatte, già comunque utilizzate in qualche casa, ma in futuro la sorgente più comune potrebbe diventare quella basata sui dispositivi a semiconduttori *LED* (*Light Emitting Diode*). Questi, all'inizio utilizzati solo come luci di segnalazione, ma ora anche per la retroilluminazione di display, come

Tipo sorgente a incandescenza	Data di cessazione delle forniture
100 W e filamento in gas inerti	settembre 2009
75 W e filamento in gas inerti	settembre 2010
60 W e filamento in gas inerti	settembre 2011
qualsiasi potenza ma non alogene	settembre 2012
alcuni tipi di alogene poco efficienti	settembre 2016

Tabella 1.1: Tabella riassuntiva delle date di cessazione delle forniture per i tipi di sorgenti poco efficienti come previsto dai regolamenti della Commissione Europea.

luci ornamentali e come luci interne su veicoli e velivoli, sembrano infatti poter sostituire le vecchie lampade anche nei proiettori delle automobili e nell'ambito dell'illuminazione d'interni. Un'analisi sul funzionamento dei LED e sugli accorgimenti necessari per poterli utilizzare come sorgenti luminose con scopi illuminotecnici è presente nel capitolo 3.

In effetti la ricerca su questo tipo di sorgenti ha portato delle importanti novità e ormai le lampade a LED hanno caratteristiche paragonabili o migliori rispetto alle altre lampade (almeno per quanto riguarda l'utilizzo in ambito privato o l'illuminazione di vetrine e negozi). Nel capitolo 4 è riportato un confronto tra le lampade oggi più utilizzate e i LED.

Grandezze fotometriche e colorimetriche

Spieghiamo adesso il significato di alcune grandezze tipiche dell'illuminotecnica che verranno utilizzate nei capitoli successivi.

L'occhio umano è sensibile solo alle radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda λ compresa tra i 380 nm (corrispondenti a luce di colore violetto) fino ai 780 nm (luce rossa). Tuttavia la sensibilità dei nostri occhi non è costante in questa banda (chiamata banda visibile), ma varia in funzione di λ come riportato nella figura 1.1: il massimo della sensibilità si ha per $\lambda = 555$ nm in corrispondenza al colore giallo-verde.

Proprio per questo motivo è utile conoscere il concetto di *flusso luminoso* che esprime la potenza delle radiazioni emesse da una sorgente pesata secondo la sensibilità spettrale dell'occhio umano. Il flusso luminoso si misura in *lumen* (*lm*) e si assume che radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda pari a 555 nm e potenza di 1 W abbiano un flusso di 683 lm.

Introduciamo la definizione di *efficienza luminosa* di una sorgente, più spesso detta semplicemente efficienza in questa tesina, che si misura in lm/W e si calcola

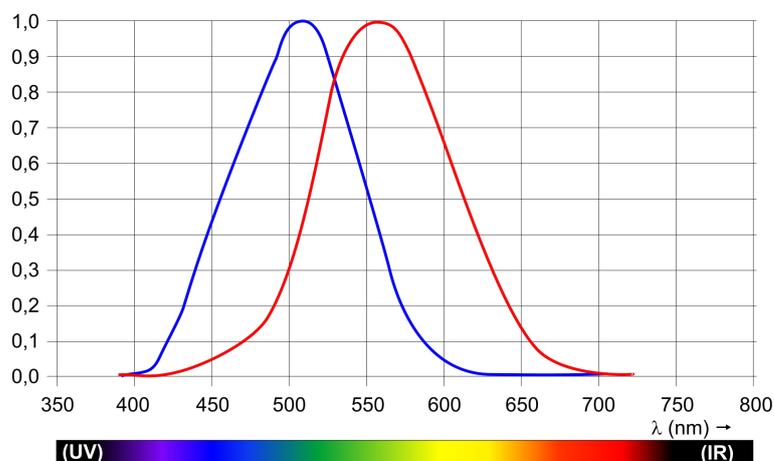


Figura 1.1: Curve del coefficiente di visibilità relativa in funzione della lunghezza d'onda: la curva rossa si riferisce alla visione fotopica (in condizioni diurne), quella blu alla visione scotopica (in condizioni notturne). Naturalmente per l'illuminazione d'interni ci si riferisce alla curva rossa.

semplicemente facendo il rapporto tra flusso luminoso emesso dalla sorgente e potenza elettrica da questa assorbita. È evidente da quanto appena spiegato che questo valore dipende da due fattori: naturalmente dalla frazione di energia elettrica che è realmente convertita in radiazioni visibili, ma anche dalla distribuzione spettrale delle radiazioni all'interno della banda visibile (proprio a causa della diversa sensibilità dell'occhio ai vari colori). Importante specificare che il calcolo dell'efficienza luminosa può essere riferito alla sola lampada o, per le tipologie di sorgenti che lo richiedono, al sistema alimentatore-lampada: questo secondo dato è sicuramente più significativo perché nella pratica alimentatore e lampada sono sempre accoppiati.

Un'altra caratteristica della luce emessa da una sorgente è la sua *temperatura di colore*, che si misura in kelvin, che dà informazioni sul colore della luce: la temperatura è quella che dovrebbe avere il corpo nero per avere la stessa tonalità della luce presa in esame. Nel diagramma riportato in figura 1.2, il "triangolo dei colori CIE", è riportata una linea curva (detta curva di Planck) che mostra i diversi colori della luce emessa dal corpo nero a varie temperature. Per le sorgenti con distribuzione spettrale continua e assimilabile a quella del corpo nero, i colori possibili si trovano sempre su questa curva, mentre per altre sorgenti con emissioni a righe o a bande, il cui punto di colore giace fuori dalla curva di Planck, si ricorre alla *temperatura correlata di colore*, che viene individuata sul diagramma

con l'ausilio delle rette isoprossimali del colore (quelle rette che incrociano la curva di Planck sulle quali sono specificati i kelvin).

Rimane da esaminare in che grado la luce prodotta da una qualsiasi sorgente permette all'occhio di riconoscere i colori degli oggetti illuminati: questi colori infatti non dipendono solo dagli oggetti stessi, ma anche dalla composizione spettrale della luce che li investe. Per una resa perfetta dei colori la luce deve essere composta da tutte le radiazioni dello spettro visibile; in caso contrario alcuni colori vengono alterati o addirittura non percepiti. Per misurare l'attitudine di una sorgente a riprodurre fedelmente i colori si ricorre all'*indice di resa cromatica*, indicato anche con *Ra* oppure *CRI*. Si tratta di un numero adimensionale compreso tra 0 e 100 (con 100 si indica una resa perfetta) per calcolare il quale si valuta lo spostamento del punto di colore di alcune piastine di colori standard illuminati con la sorgente in esame rispetto a quello ottenuto con l'illuminazione di sorgenti standard.

Quindi risulta evidente l'inconciliabilità tra efficienza luminosa (che aumenterebbe concentrando le radiazioni emesse attorno al giallo-verde) e la resa dei colori (che invece presuppone che la potenza sia distribuita su tutto lo spettro visibile). Proprio per questo si considera come massimo teorico per l'efficienza di una sorgente di luce bianca (imponendo un indice di resa cromatica di almeno 90) il valore di 408 lm/W.

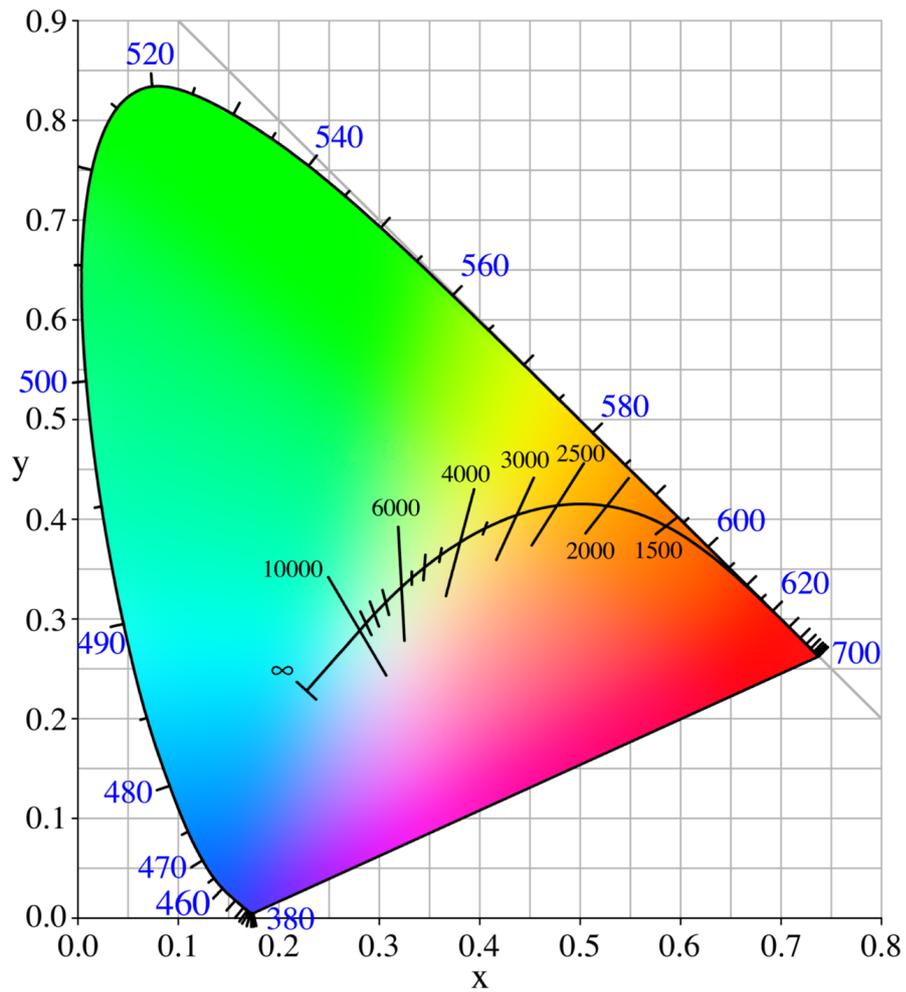


Figura 1.2: Il “triangolo dei colori CIE”: lungo il perimetro ci sono i colori spettrali con le rispettive lunghezze d’onda in nm e al centro è riportata la curva di Planck con le rette isoprossimali del colore e le temperature associate espresse in kelvin.

2

Sorgenti luminose

Richiameremo ora i principi di funzionamento delle sorgenti luminose oggi più diffuse, in modo da poter successivamente confrontare le caratteristiche delle diverse lampade comunemente usate con le potenzialità che può offrire la tecnologia LED (vedi il capitolo 4).

Una classificazione, sintetica ma completa, delle lampade attualmente disponibili, basata sui diversi principi di funzionamento, è quella di figura 2.1.

Esamineremo ora più in dettaglio le *sorgenti a incandescenza*, *a scarica* e quelle *a induzione*, mentre i *LED* saranno trattati a parte nel capitolo 3.

2.1 Sorgenti a incandescenza

Le sorgenti a incandescenza sono state le prime sorgenti luminose funzionanti grazie all'energia elettrica; inventate nel 1860 dall'inglese Swan, sono state, circa vent'anni più tardi, migliorate da Edison, rimanendo quasi inalterate fino ai giorni nostri.

Queste lampade sfruttano l'effetto Joule per portare il filamento di cui sono costituite all'incandescenza. Il filamento incandescente, comportandosi come un corpo nero, raggiungerebbe la massima efficienza a circa 5200K, quando il picco di emissione è centrato nella banda del visibile (vedi figura 2.2). Tale temperatura non è sopportabile da alcun elemento, inizialmente perciò veniva utilizzato il carbonio che è quello che più vi si può avvicinare. Si è presto passati all'utilizzo del tungsteno che, con la sua temperatura di fusione di 3653K e il suo più basso tasso di sublimazione rispetto al carbonio, si è rivelato il materiale più idoneo per garantire sia efficienza che durata.

Le lampade a incandescenza si possono suddividere in base al contenuto dell'ampolla.

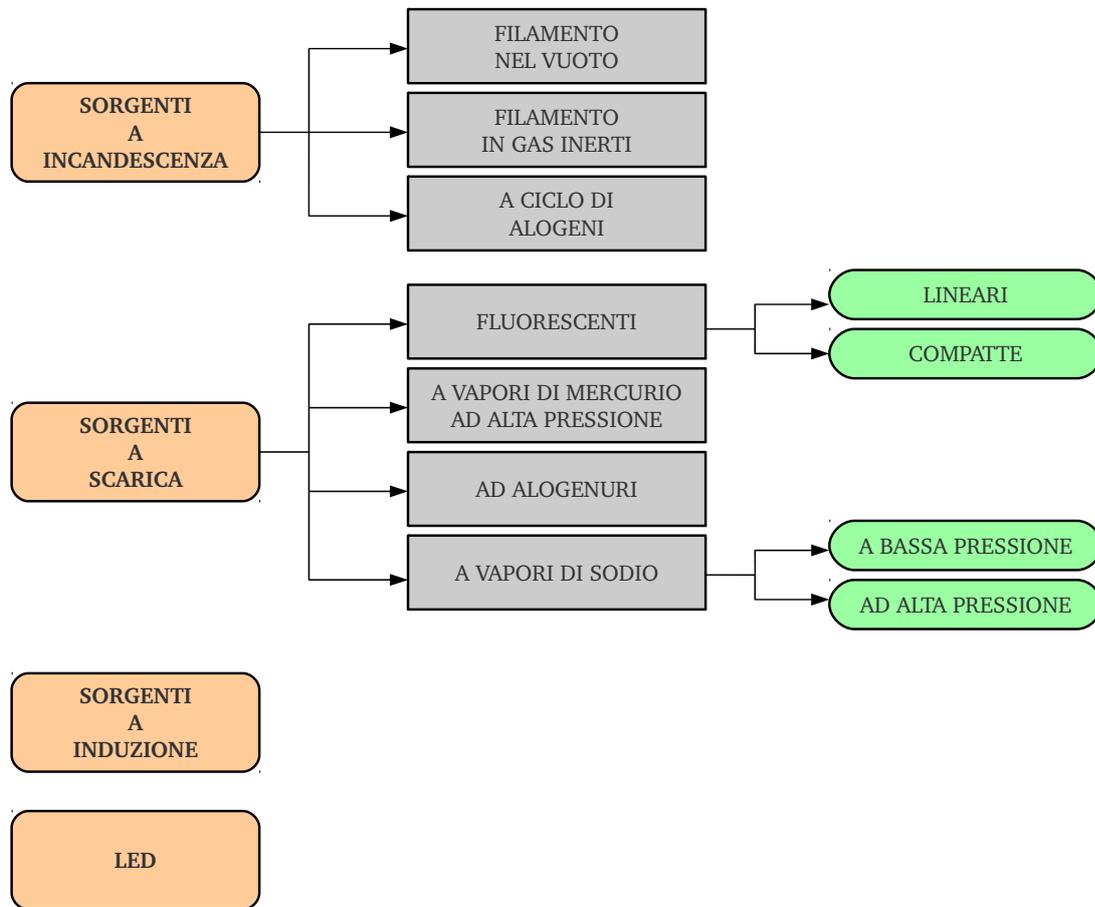


Figura 2.1: Schema generale delle diverse tipologie di lampade.

Esistono quelle a *filamento nel vuoto* che sono quelle a minor potenza (fino a 15W) all'interno delle quali si realizza il vuoto spinto.

In quelle di potenza maggiore invece il *filamento* si trova *in gas inerti*. Questi hanno lo scopo di ridurre la sublimazione del tungsteno, ma la loro presenza facilita la dispersione del calore dal filamento al vetro. Viene quindi utilizzato l'argon che ha ridotta conduttività termica, a cui viene aggiunto azoto per le sue proprietà di isolante elettrico. In lampade a incandescenza per impieghi speciali l'argon è sostituito da gas con conduttività ancora più bassa come cripton e xenon che però sono più costosi. In entrambe queste varianti la temperatura del filamento si aggira intorno ai 2800 K, con un'efficienza attorno ai 14lm/W e una durata media di 1000 ore.

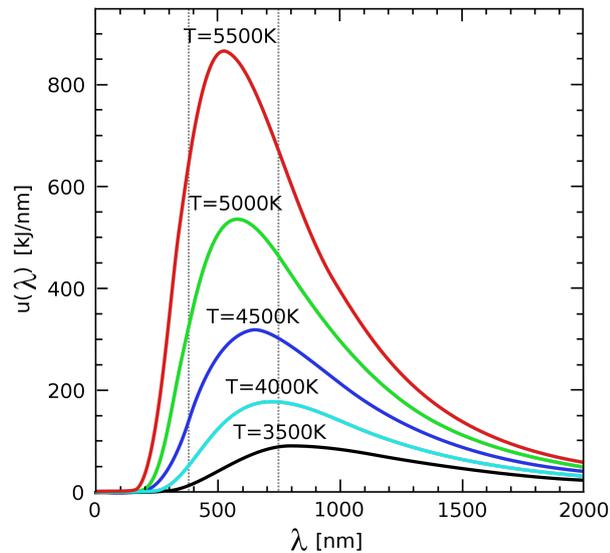


Figura 2.2: Distribuzione spettrale delle radiazioni emesse dal corpo nero a diverse temperature.

Infine l'ampolla può essere riempita, oltre che con il gas di riempimento (argon), con *gas alogeni* come iodio e bromo. Questi si combinano con il tungsteno vaporizzato nelle zone più fredde della lampada (cioè vicino al vetro) e quando, a causa dei moti convettivi, si ritrovano vicini al filamento, si dissociano dal tungsteno ridepositandolo sul filamento stesso. Questi cicli avvengono in modo caotico quindi il filamento non viene ricostruito come era in precedenza, ma si vengono a formare delle zone assottigliate e altre ingrossate. Tuttavia il fatto che il tungsteno non si depositi sul vetro dell'ampolla (che nelle lampade a incandescenza senza alogeni deve essere grande abbastanza per far sì che la polvere di tungsteno sia distribuita su una superficie adeguata a non farla "annerire") permette di ridurre le dimensioni e questo consente di aumentare la pressione dei gas al suo interno. Questa maggior pressione riduce ulteriormente la sublimazione del tungsteno e quindi fa aumentare la vita della lampada, oppure rende possibile innalzare la temperatura del filamento (e dunque l'efficienza della lampada). In pratica il filamento raggiunge temperature che superano i 3000 K con efficienza attorno ai 20 lm/W e durata almeno raddoppiata o anche triplicata rispetto alle lampade ad incandescenza tradizionali. Prestazioni ancora migliori sono state raggiunte nei formati a bassissima tensione (perché si può aumentare la sezione del filamento e quindi ridurre ulteriormente la sua sublimazione) o rivestendo le ampolle di una pellicola (quarzo additivato di cerio) che riflette una frazione del calore emesso dal filamento permettendone il recupero.



Figura 2.3: Foto di una lampada a incandescenza con filamento in gas inerti (a sinistra) e di una lampada a incandescenza con filamento in gas alogeni (a destra).

2.2 Sorgenti a scarica

In queste sorgenti l'emissione di luce non è più dovuta a un filamento solido, ma al passaggio di elettroni portati a sufficiente velocità attraverso un gas.

Il motivo per cui un gas attraversato da una corrente, in particolari condizioni, emette luce può essere spiegato attraverso un semplice modello atomico per cui un atomo a riposo è costituito da un nucleo a carica positiva attorno al quale ruotano, su orbite fisse e caratteristiche di ogni gas, gli elettroni. Se uno di questi elettroni viene colpito da un altro elettrone dotato di sufficiente energia cinetica, esso può passare a un'orbita più esterna, caratterizzata da una maggiore energia potenziale. Tuttavia subito dopo l'urto l'elettrone torna al suo livello originario, cedendo l'energia acquistata nell'urto sotto forma di radiazione elettromagnetica a potenza e lunghezza d'onda caratteristiche della sostanza gassosa.

Il diagramma spettrale del flusso emesso da una sorgente di questo tipo risulta quindi ben diverso da quello che caratterizza le sorgenti a incandescenza: lo spettro infatti non è continuo, ma costituito da diverse righe a lunghezze d'onda ben definite (questo vale per i gas rarefatti, mentre per quelli compressi lo spettro si arricchisce di nuove righe che possono portare, con l'aumento della pressione, ad uno spettro continuo). Naturalmente solo le righe che cadono all'interno della banda del visibile provocano emissione luminosa, ma vedremo che possono essere sfruttate per produrre luce anche quelle a lunghezza d'onda minore, cioè quelle nell'ultravioletto.

Analizziamo ora diversi tipi di lampade che sfruttano questo principio per ottenere luce.

Nelle lampade *fluorescenti* il vapore che emette radiazione elettromagnetica è quello di mercurio. La gran parte delle radiazioni emesse però non appartengono alla banda visibile ma a quella ultravioletta: per “spostare” le righe di emissione nel visibile il tubo che costituisce la lampada è rivestito internamente da polveri fluorescenti che se colpite da radiazione ultravioletta emettono radiazione visibile (vedi figura 2.4). La scarica che eccita i vapori di mercurio avviene tra due elettrodi di tungsteno avvolto a spirale collocati alle due estremità del tubo (che non contiene solo i vapori di mercurio, ma anche altri gas come neon, argon, cripton o xenon che facilitano l’innesco della scarica).

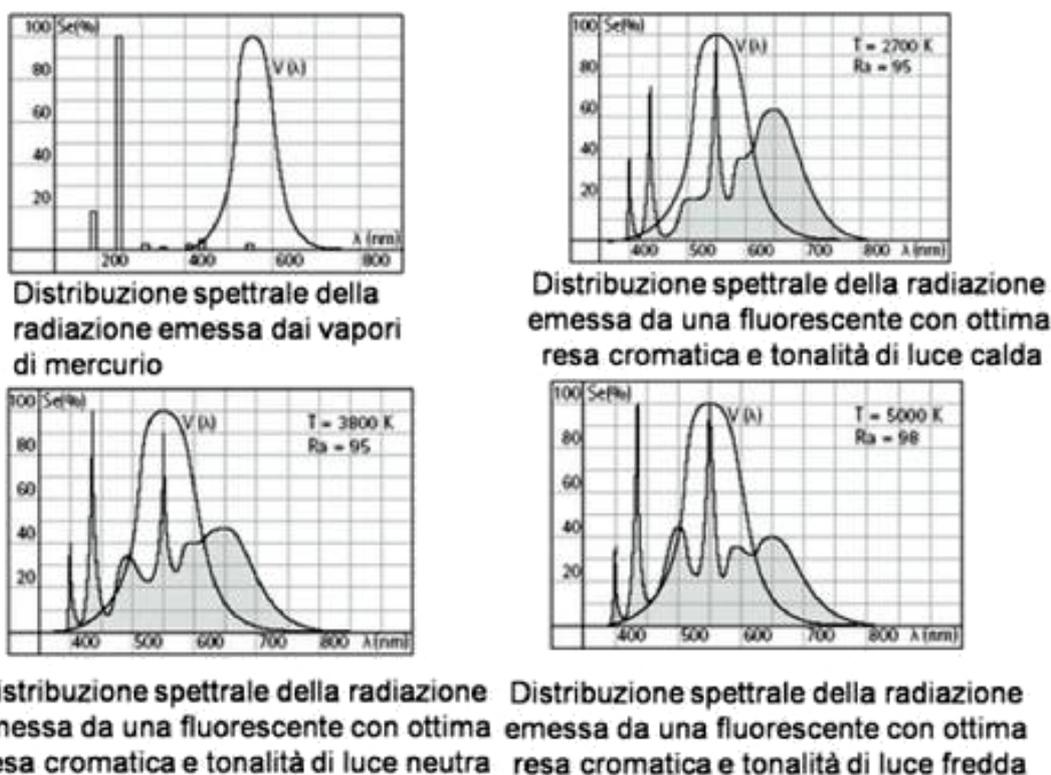


Figura 2.4: Distribuzione spettrale della radiazione emessa dal vapore di mercurio e da fluorescenti con diverse polveri fluorescenti.

È inoltre importante sottolineare che questo tipo di lampade necessitano di apparecchiature aggiuntive per poter funzionare. Fino a qualche tempo fa erano costituite da uno starter (per fornire una extratensione capace di innescare la scarica), una reattanza induttiva (per limitare la corrente nella lampada) e un condensatore (per il rifasamento della corrente). Più recentemente si è passati ad apparecchiature di tipo elettronico che consentono di aumentare la durata, l’efficienza e la silenziosità della sorgente, oltre che eliminare completamente lo

sfarfallio grazie al fatto che fanno lavorare la lampada a frequenze più elevate di quella di rete.

Le lampade fluorescenti si dividono in fluorescenti *lineari* e *compatte*.

Le *fluorescenti lineari*, i cui primi esemplari risalgono agli anni Trenta e che in passato venivano usate con scopi decorativi, sono costituite da un tubo rettilineo o circolare, hanno un'efficienza tra i 60lm/W e i 100lm/W e durate che possono arrivare fino a 30 000 ore.

Le *fluorescenti compatte* o più brevemente *CFL*, commercializzate a partire dagli anni Ottanta, sono costituite da 2, 4 o 6 piccoli tubi fluorescenti ripiegati più volte con lo scopo di miniaturizzare la sorgente e renderla compatibile con i lampadari tradizionalmente utilizzati negli ambienti domestici. Sempre per questo motivo molti modelli hanno anche l'apparecchiatura elettronica ausiliaria integrata alla base della lampada stessa. L'efficienza delle CFL è tipicamente tra i 40lm/W e gli 80lm/W mentre le durate oscillano tra le 6000 e le 15 000 ore. Importante notare che la vita di queste lampade dipende molto dalla modalità del loro uso: si accorcia notevolmente in caso di brevi periodi di accensione fino a diventare, nei casi peggiori, di durata paragonabile a quella delle lampade a incandescenza.



Figura 2.5: Foto di una lampada fluorescente lineare (a sinistra) e di una lampada fluorescente compatta o CFL (a destra).

Un'altra categoria di sorgenti a scarica è quella *a vapori di mercurio ad alta pressione*, esse sono costituite da un'ampolla di vetro all'interno della quale c'è un tubo di quarzo riempito di argon e vapori di mercurio ad alta pressione. Le radiazioni emesse sono distribuite nella banda visibile (grazie all'elevata pressione dei gas) e nell'ultravioletto: queste ultime vengono riportate nel visibile grazie alla polveratura che ricopre l'interno dell'ampolla in modo simile a quanto avviene

nelle lampade fluorescenti. L'efficienza è piuttosto scarsa rispetto alle fluorescenti (attorno ai 40 lm/W), infatti questa tecnologia è ormai obsoleta e usata soltanto per la manutenzione degli impianti esistenti.

Le lampade *ad alogenuri* sono costruttivamente simili alle precedenti, ma all'interno del tubo di scarica sono presenti, oltre al mercurio, anche degli ioduri di sodio, di tallio e di indio. Questi emettono radiazioni nella banda del visibile e riempiono le lacune dello spettro del mercurio anche senza ricorrere al rivestimento fluorescente dell'ampolla esterna (che è comunque presente in alcuni modelli di queste lampade).

Ci sono infine le lampade *al sodio* nelle quali il tubo di scarica è composto da allumina sinterizzata ed è riempito da gas (xenon o argon) e amalgama di sodio (sodio e mercurio). La distribuzione spettrale delle radiazioni emesse dipende dalla pressione del sodio all'interno del tubo: variando questa cambiano sia l'efficienza luminosa che la temperatura di colore e la resa cromatica. Si hanno infatti le lampade *al sodio ad alta pressione* (pressione del sodio che raggiunge i 95 kPa) che hanno resa dei colori abbastanza buona ma scarsa efficienza (attorno ai 40 lm/W), fino a quelle *al sodio a bassa pressione* (pressione di 0,5 Pa) nelle quali il tubo di scarica è contenuto in un altro tubo rivestito internamente di ossido di indio con lo scopo di far passare le radiazioni visibili e riflettere quelle infrarosse. Queste hanno efficienza molto alta, raggiungono anche i 200 lm/W con durata fino a 30 000 ore, ma hanno resa dei colori piuttosto bassa e sono solitamente utilizzate per l'illuminazione stradale (producono una luce di caratteristico colore giallo).



Figura 2.6: Foto di una lampada al sodio a bassa pressione.

2.3 Sorgenti a induzione

Questa tipologia di sorgenti ha una storia piuttosto recente, infatti i primi esemplari di lampade a induzione risalgono agli anni Novanta, e il loro funzionamento è basato sulla sintesi dei principi dell'elettromagnetismo e la scarica elettrica nei gas. Praticamente si tratta di una lampada fluorescente senza elettrodi e la corrente che attraversa il gas non è altro che una corrente indotta dovuta a un campo magnetico generato da una bobina alimentata ad alta frequenza (vedi figura 2.7).

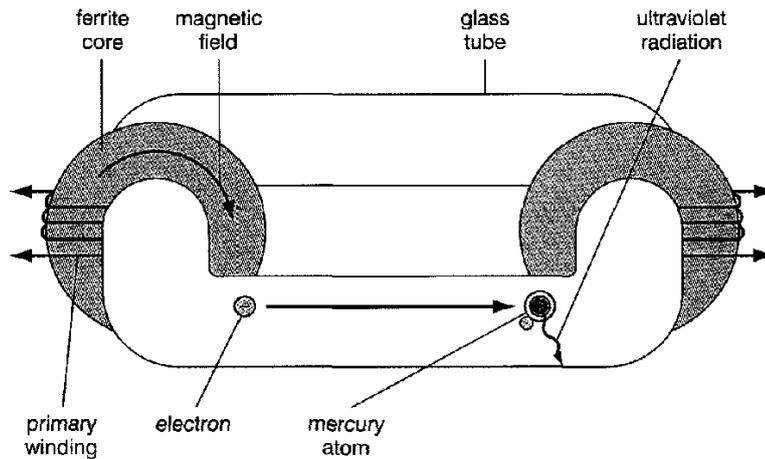


Figura 2.7: Principio di funzionamento delle lampade a induzione.

L'assenza degli elettrodi, che consumandosi sono il punto debole delle lampade fluorescenti, garantisce durate molto elevate (anche vicine alle 60 000 ore) ed efficienze attorno ai 70lm/W. A seconda dei diversi sistemi di alimentazione la frequenza alla quale viene alimentata la bobina può essere di 2,65 MHz oppure di 250kHz.

3

LED

In questo capitolo si analizza il funzionamento dei *LED* (*Light Emitting Diode*) mettendo in evidenza le peculiarità di questa tecnologia che sembra promettere ulteriori sviluppi nei prossimi anni.

Le prime osservazioni sulle emissioni di radiazioni da materiali semiconduttori risalgono al 1920 da parte di uno scienziato russo, ma solo nel 1962 nacque il primo LED ad opera di Nick Holonyak Jr. Gli studi continuarono e solo agli inizi degli anni Novanta fu possibile al ricercatore giapponese Shuji Nakamura aumentare considerevolmente il flusso luminoso dei LED a luce blu e verde aprendo nuovi orizzonti a questo tipo di sorgente luminosa.

3.1 Principi di funzionamento: modello a bande e ricombinazione

Il modello atomico sviluppato nell'ambito della fisica quantistica può essere utilizzato per spiegare il funzionamento dei LED. Secondo questo modello intorno al nucleo di ogni atomo ci sono delle zone chiamate orbitali in cui la probabilità di avere presenza di elettroni è massima. Ogni atomo ha un numero finito di orbitali e ad ognuno di questi sono associati uno o più livelli energetici, con energia che aumenta con la distanza dell'orbitale dal nucleo. I livelli energetici sono discreti (o quantizzati) e quando un elettrone passa da un livello ad un altro si ha emissione o assorbimento di energia. Quando però atomi uguali vengono avvicinati per formare un solido, a causa delle forti interazioni interatomiche, i livelli di energia possibili sono raggruppati in bande.

Le proprietà elettriche dei materiali dipendono dalla disposizione degli elettroni che occupano la banda più esterna (di valenza). A un livello energetico ancora

maggiore è presente la banda di conduzione e la differenza della minima energia della banda di conduzione con la massima energia della banda di valenza è chiamata *bandgap*. Nei materiali isolanti il bandgap è troppo elevato per permettere agli elettroni di migrare verso la banda di conduzione; in quelli conduttori le due bande sono parzialmente sovrapposte e tali da avere sempre degli elettroni in banda di conduzione. Nei semiconduttori il bandgap è abbastanza limitato quindi, se l'atomo riceve l'opportuna energia, alcuni elettroni possono arrivare alla banda di conduzione, lasciando nella banda di valenza dei vuoti chiamati *lacune* paragonabili a cariche positive.

Sono proprio i semiconduttori le materie prime utilizzate per la realizzazione dei LED; per aumentare la loro attitudine a perdere o acquisire elettroni essi vengono *drogati* aggiungendovi piccole quantità di altre sostanze. La drogatura può essere di due tipi: di tipo N se l'aggiunta della sostanza drogante serve ad aumentare gli elettroni in banda di conduzione e di tipo P se invece aumenta il numero di lacune.

Il LED non è altro che un diodo che emette luce: è quindi costituito da una *giunzione P-N* il cui funzionamento non sarà approfondito in questo lavoro. Si ritiene utile ricordare però che nel diodo si ha passaggio di corrente solo se la giunzione è polarizzata direttamente (cioè se la tensione applicata tra la zona drogata P e quella drogata N è positiva), mentre passa solo una debole e trascurabile corrente se la polarizzazione è inversa. Quando il LED viene polarizzato direttamente, nella zona di svuotamento della giunzione P-N avviene la *ricombinazione* tra elettroni e lacune (provenienti rispettivamente dalla zona N e P) che consiste nel passaggio di elettroni dalla banda di conduzione a quella di valenza (vedi figura 3.1). È proprio il processo di ricombinazione che può dare origine all'emissione di luce: in alcuni casi la transizione di un elettrone genera un fotone, in altri no. Il rapporto tra il numero di fotoni generati e le ricombinazioni totali viene detto *efficienza quantica interna*.

Chiamando E_c l'energia dell'elettrone quando si trova in banda di conduzione ed E_v l'energia dell'elettrone in banda di valenza (cioè a ricombinazione avvenuta) vale la relazione

$$E_c - E_v = h\nu$$

dove h è la costante di Planck pari a $6,63 \times 10^{-34}$ Js e ν è la frequenza (in hertz) della radiazione emessa.

Ricordando inoltre che la lunghezza d'onda λ è legata alla frequenza secondo la relazione $\lambda = c/\nu$ con c velocità della luce nel mezzo considerato vale

$$\lambda = \frac{hc}{E_c - E_v}.$$

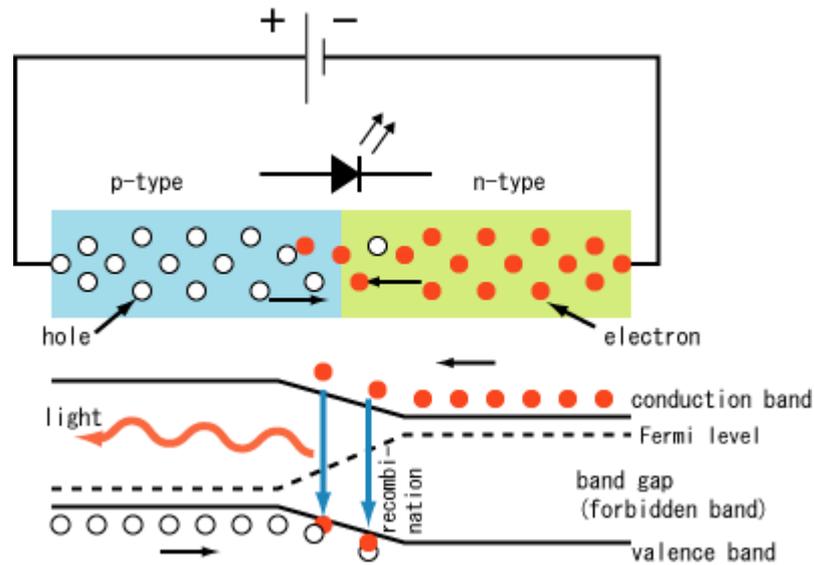


Figura 3.1: Principio di funzionamento dei LED.

La differenza di energia tra i due livelli, che dipende dalla composizione chimica dei materiali che costituiscono la giunzione P-N, determina quindi la visibilità e il colore della radiazione emessa dal LED.

3.2 Alimentazione

La caratteristica corrente-tensione dei LED risponde all'equazione

$$I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$$

tipica della giunzione P-N, dove I è la corrente che fluisce attraverso il LED, V la tensione applicata ad esso, k la costante di Boltzmann, q la carica elementare, T la temperatura della giunzione e I_s è la *corrente di saturazione* che dipende da caratteristiche costruttive della giunzione come dimensioni e drogatura. Come si può vedere dalla figura 3.2 basta una piccola variazione di tensione ai capi del LED per variare molto consistentemente la corrente che attraversa la giunzione.

Inoltre il valore che assume questa corrente, anche detta *corrente di pilotaggio*, influisce direttamente sia sulla temperatura di colore che sulla luminosità del LED. Infatti si può vedere nella figura 3.3 che il flusso luminoso emesso dal LED è praticamente proporzionale alla corrente di pilotaggio. Tuttavia, per aumentare la luminosità della sorgente, non è mai opportuno aumentare la corrente di pilotaggio oltre le caratteristiche nominali perchè si ha una perdita di efficienza

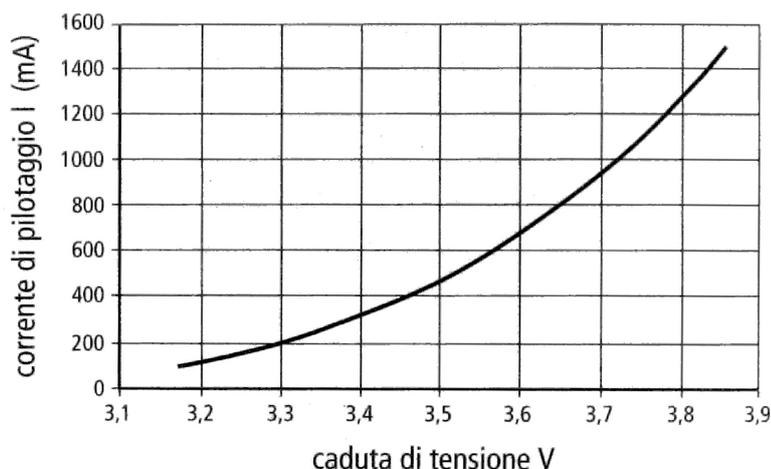


Figura 3.2: Caratteristica corrente-tensione di un LED ad alta potenza (da [3]).

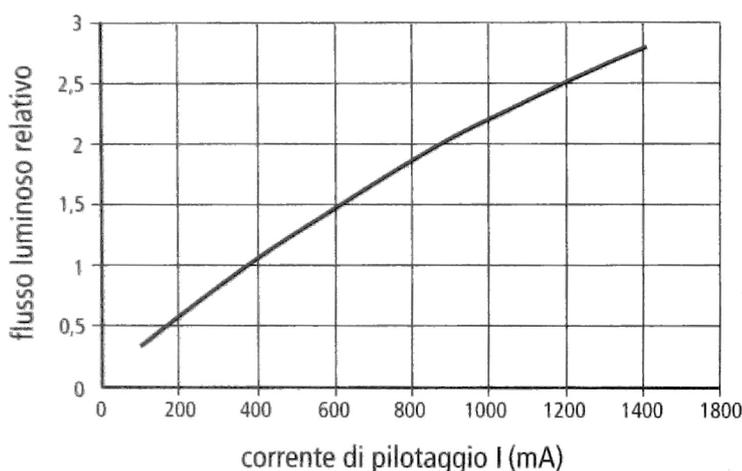


Figura 3.3: Andamento del flusso luminoso in funzione della corrente di pilotaggio (da [3]).

della sorgente stessa (cioè aumenta il flusso luminoso emesso, ma l'efficienza espressa in lm/W scende anche notevolmente) e perchè si diminuisce la vita utile del LED.

È quindi essenziale riuscire a garantire sempre una corrente di pilotaggio adeguata ed è proprio per questo che i LED usati per l'illuminazione vengono pilotati in corrente con alimentatori/converteri elettronici. Questi, oltre ad abbassare e raddrizzare la tensione di rete, riescono a controllare la corrente che alimenta il processo di ricombinazione elettroni-lacune (passaggio essenziale anche perchè

si ricorda come i componenti elettronici discreti hanno caratteristiche elettriche leggermenti differenti tra loro).

Per i LED destinati all'illuminazione risulta assolutamente inadeguato il sistema di alimentazione tradizionalmente usato per i piccoli LED con funzione di luci di segnalazione che sfruttano un generatore di tensione costante al quale si collegano in serie una resistenza (che ha funzione di limitare la corrente) e il LED stesso. Infatti i LED ad alta potenza hanno correnti nominali che superano i 350 mA e quindi la potenza dissipata nella resistenza non sarebbe più trascurabile e abbasserebbe drasticamente l'efficienza dell'insieme alimentatore-LED.

I componenti elettronici usati con lo scopo di pilotare i LED vengono chiamati anche *driver* e possono essere di diversi tipi, ma tutti sono progettati cercando di usare il numero più limitato possibile di componenti e di avere un tempo di vita molto lungo. La prima caratteristica è dovuta all'esigenza di minimizzare il consumo energetico e il costo in previsione di un'espansione nel mercato dell'illuminazione della tecnologia LED; la seconda al fatto che uno dei pregi dei LED è la loro durata elevata, ma esso sarebbe annullato in caso di guasto dei driver (proprio per questo per realizzare i filtri non vengono utilizzati condensatori elettrolitici ma altri tipi di capacità).

È importante sottolineare che comunque, vista l'estrema rapidità di risposta del flusso luminoso emesso dal LED rispetto alla corrente di pilotaggio, è possibile alimentare i LED con impulsi di corrente piuttosto che correnti costanti, rendendo possibile tra l'altro il controllo della luminosità dei LED (*dimming*) attraverso la tecnica *PWM* (*Pulse Width Modulation*).

Attualmente i LED ad alta potenza, cioè quelli per illuminazione, hanno potenze da 1 a 5 W.

3.3 Colore

Da quanto spiegato alla fine del paragrafo 3.1 e dagli spettri di emissione dei LED visibili in figura 3.4 si nota chiaramente che le radiazioni emesse da un LED sono raccolte attorno a un picco (la cui lunghezza d'onda determina il colore della luce prodotta) e che la potenza è praticamente tutta contenuta in un intervallo di lunghezze d'onda di circa 40 nm: si può quindi affermare che il LED è una sorgente di luce a banda stretta.

Questa caratteristica può essere sfruttata al meglio in tutte quelle applicazioni che richiedono luce monocromatica, come ad esempio le luci posteriori delle automobili o le lampade dei semafori (nei quali invece che usare lampade a incandescenza da 140 W e filtrare i colori necessari, spreco di tutta la potenza nella

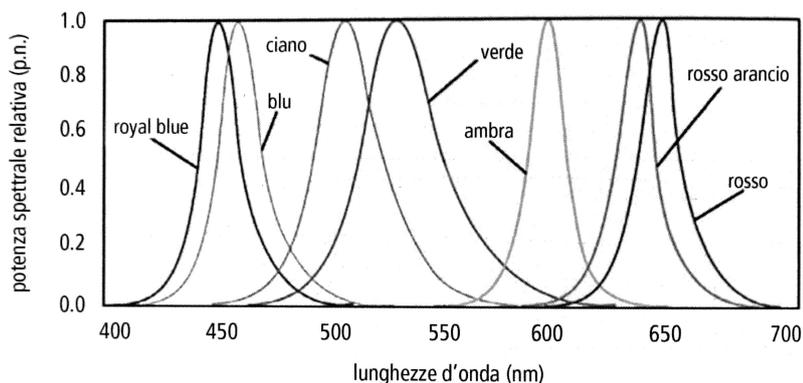


Figura 3.4: Diagrammi di emissione di LED di diversi colori (da [3]).

parte restante dello spettro emesso, si possono usare LED di colore appropriato che hanno consumi dell'ordine della decina di watt).

Tuttavia abbiamo visto come per l'illuminazione sia necessaria una luce bianca, cioè con potenze distribuite in tutta la banda del visibile, per garantire una elevata resa dei colori. Per arrivare a produrre luce eterocromatica bianca partendo dalla radiazione emessa dai LED esistono varie strategie, ognuna con pregi e difetti.

LED blu e fosfori gialli

Si utilizza un LED con emissione attorno al blu con un rivestimento semitrasparente su cui sono depositati dei fosfori (simili a quelli utilizzati nelle lampade a scarica). Una parte della radiazione blu supera i fosfori e viene emessa dal LED stesso, mentre la parte restante eccita i fosfori, i quali emettono luce nella banda tra il verde e l'arancio (sommando quindi una radiazione di tonalità gialla) come illustrato in figura 3.5. Graduando opportunamente la componente blu e quella gialla (variando quindi la quantità di fosfori presenti sul rivestimento) si riescono a ottenere LED bianchi con temperature correlate di colore differenti (vedi figura 3.6). Il punto debole di questa tecnologia è la ridotta emissione nella regione del rosso e questo compromette la resa dei colori.

LED-UV e fosfori rossi, verdi e blu

Si utilizza un LED che emette nella regione degli ultravioletti e grazie a differenti tipi di fosfori depositati sul rivestimento della giunzione P-N si riescono a "traslare" queste radiazioni sui tre colori primari (rosso, verde e blu), i quali sommandosi producono luce bianca. Importante notare che questo tipo di tecnica è lo stesso usato nelle lampade fluorescenti: è stato quindi possibile avvantaggiarsi di una tecnologia ormai già ben sperimentata

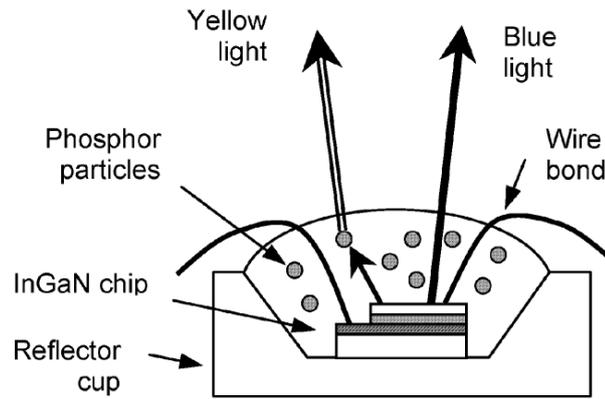


Figura 3.5: Principio di funzionamento di un LED blu con fosfori gialli (da [11]).

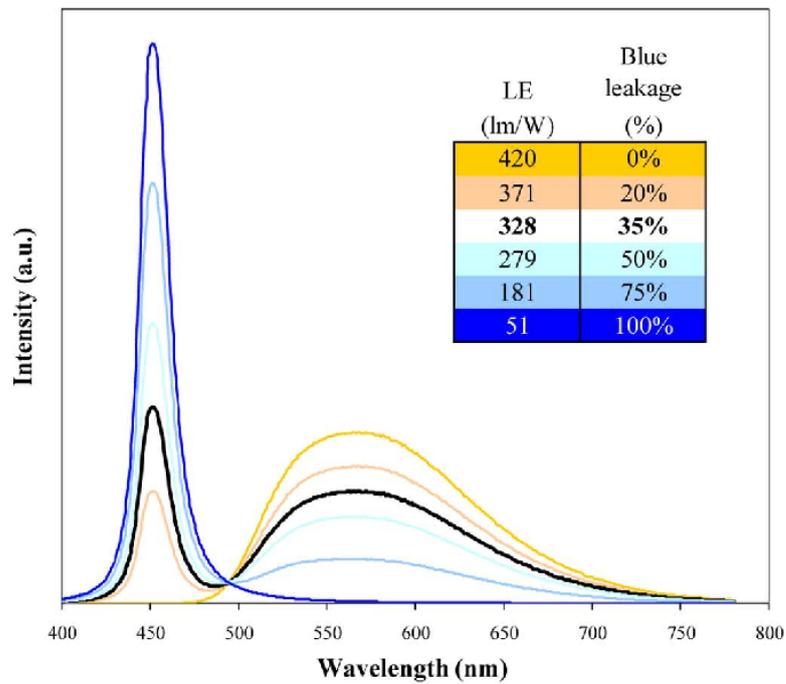


Figura 3.6: Spettri di emissione di un LED blu con diverse quantità di fosfori gialli (da [10]).

per la produzione delle fluorescenti stesse. Tuttavia, il ricorso ad addirittura tre tipi diversi di fosfori abbassa l'efficienza della sorgente in quanto il processo di emissione di luce da parte dei fosfori non ha efficienza energetica unitaria e quindi una parte di potenza emessa nell'ultravioletto viene persa.

LED rossi, verdi e blu

Questa tecnica, detta anche *sintesi additiva RGB (Red, Green, Blue)*, si basa sempre sulla somma dei tre colori primari, ma la luce dei tre diversi colori è proveniente direttamente da tre diversi LED, oppure da una stessa lampada LED con al suo interno le tre diverse giunzioni, senza l'ausilio di fosfori. Nonostante l'apparente semplicità e funzionalità di questo metodo per ottenere luce bianca, essa ha dei limiti dovuti a diversi fattori. Il primo è la mancanza di LED di colore verde efficienti (problema noto come *green gap*) e questo limita l'efficienza globale; il secondo è che l'efficienza dei LED verdi, rossi e blu si modifica nel tempo con andamenti diversi e quindi la qualità della luce bianca prodotta inizialmente si degrada; il terzo è che comunque alcune parti della banda visibile non vengono coperte sufficientemente dallo spettro di emissione (vedi figura 3.7) e quindi la resa dei colori non è ottima: per superare questo problema si possono usare quattro LED aggiungendone uno di colore giallo.

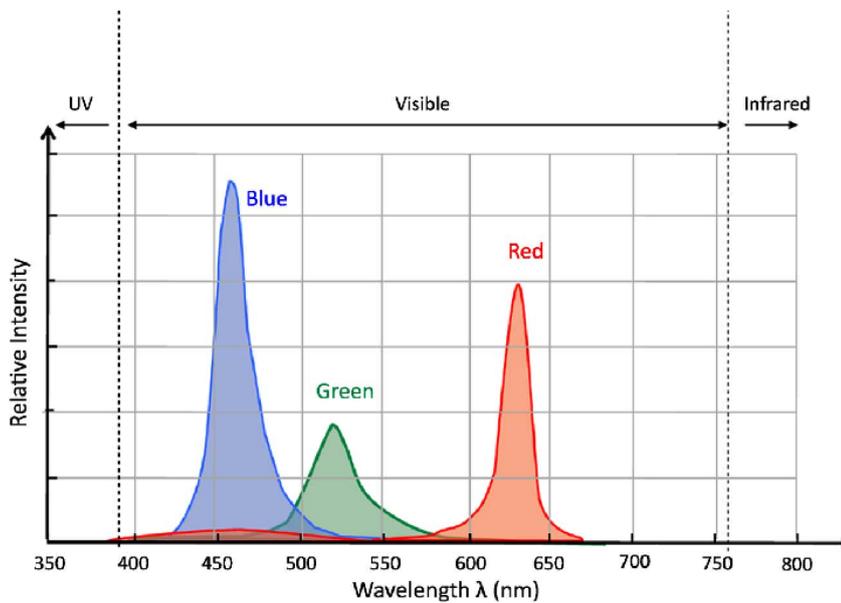


Figura 3.7: Spettro della luce “bianca” creata per sintesi additiva RGB (da [5]).

Abbiamo accennato al problema del *green gap*, cioè dell'attuale mancanza di LED ad alta efficienza nella regione del verde. Invece per le zone dello spettro elettromagnetico che limitano la banda visibile questo problema è già stato superato: per le lunghezze d'onda più alte, attorno al rosso e all'arancio, i LED sono costituiti solitamente da AlGaInP, mentre per le lunghezze d'onda più basse, attorno al blu, da InGaN.

3.4 Regime termico: temperatura di giunzione e dissipatori

Abbiamo già detto che nei LED ad alta potenza le correnti di pilotaggio sono solitamente maggiori di 350 mA. Quando questa corrente attraversa la giunzione P-N una parte della potenza elettrica viene convertita in luce, ma un'altra parte diventa calore a causa dell'effetto Joule e quindi la temperatura della giunzione aumenta.

Visto che le caratteristiche elettriche, fotometriche e colorimetriche dei LED dipendono fortemente dalla temperatura alla quale si trovano i semiconduttori che li costituiscono, è utile introdurre come parametro la *temperatura di giunzione*, spesso indicata come T_j , che risulta essenziale per determinare il buon funzionamento di un LED. Questa temperatura non è direttamente misurabile, ma è possibile stimarla a partire dalla temperatura della piastra che costituisce la base del LED stesso.

Se la temperatura di giunzione cresce troppo (il produttore dei dispositivi dà solitamente una soglia massima) si compromette la durata del LED e comunque, come si può vedere in figura 3.8, all'aumentare della temperatura di giunzione diminuisce il flusso luminoso prodotto, facendo calare quindi anche l'efficienza della sorgente.

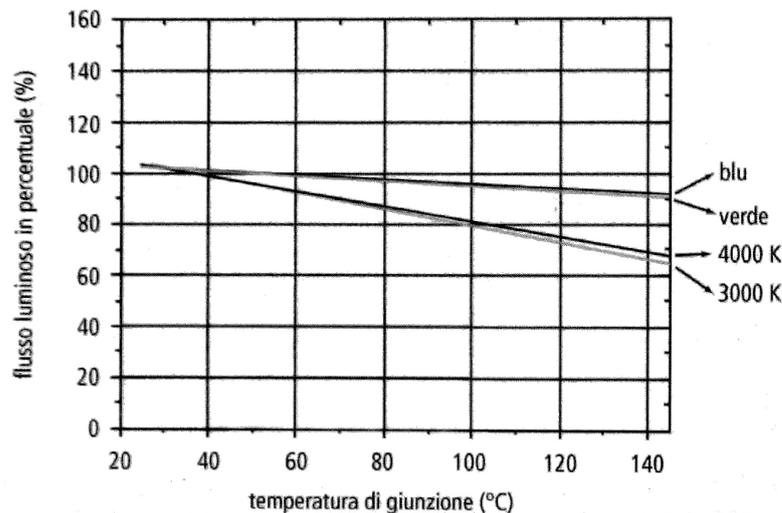


Figura 3.8: Andamento del flusso luminoso in funzione della temperatura di giunzione per LED ad alta potenza di diversi colori e tonalità di bianco (da [3]).

Le efficienze luminose riportate solitamente nei datasheet si riferiscono a temperature di giunzione di 25°C (oppure 40°C), ma praticamente le lampade a LED lavorano con temperature di giunzione che oscillano tra gli 80 e i 100°C. Queste temperature vengono raggiunte nonostante l'ausilio di dissipatori termici (che hanno la funzione di assorbire il calore generato nella giunzione e disperderlo nell'ambiente) solitamente costituiti da supporti alettati montati dietro il LED stesso. Le lampade costituite da LED ad alta potenza sono generalmente già corredate da dissipatori adeguatamente dimensionati visto che questi sono essenziali per un corretto funzionamento della lampada stessa.

3.5 Ottiche

A seconda dei materiali, del tipo di cristalli formati dagli atomi dei semiconduttori che costituiscono la giunzione P-N e della struttura e forma stessa della giunzione, i fotoni prodotti dalle ricombinazioni elettroni-lacune possono avere o non avere direzioni preferenziali di emissione.

In molti casi è utile collocare un substrato di materiale riflettente sotto la giunzione stessa, in modo da ottenere un solido fotometrico (cioè una distribuzione del flusso luminoso generato) che occupi solo un emisfero dello spazio attorno al LED. Spesso inoltre si ricorre a una copertura trasparente posizionata sopra il chip contenente la giunzione che, opportunamente sagomata e lavorata, funziona come elemento proiettivo della lampada stessa. Substrato riflettente e copertura sagomata costituiscono l'*ottica primaria* e consentono di ottenere solidi fotometrici differenti.

Per concentrare ulteriormente il flusso luminoso o comunque per migliorare il solido fotometrico ottenuto da più LED affiancati si ricorre poi alle cosiddette *ottiche secondarie*.

Concludiamo questo capitolo dedicato ai LED riportando un disegno e una foto di un LED ad alta potenza.

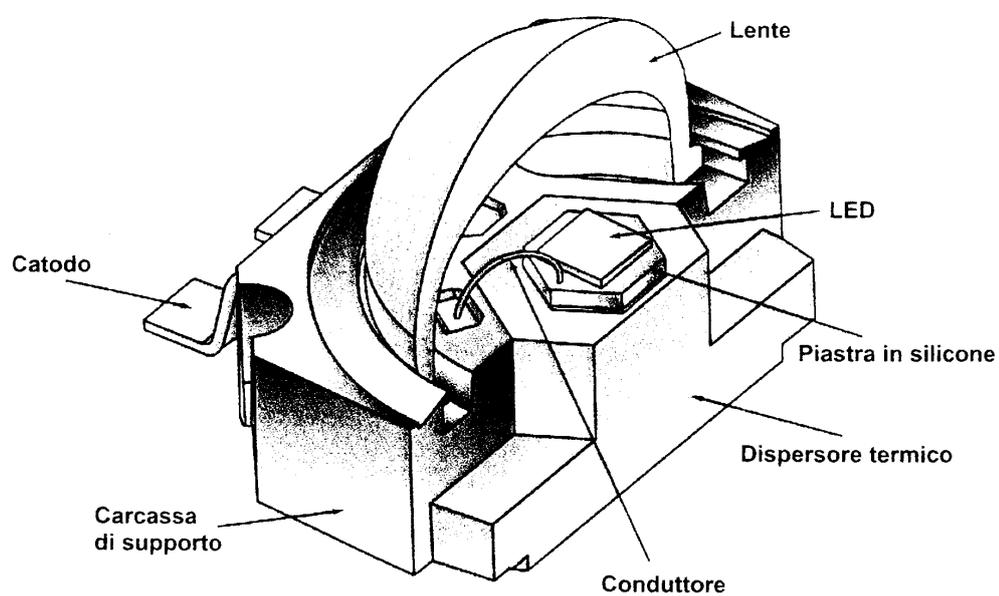


Figura 3.9: Vista sezionata del LED ad alta potenza “Philips K2” (da [2]).

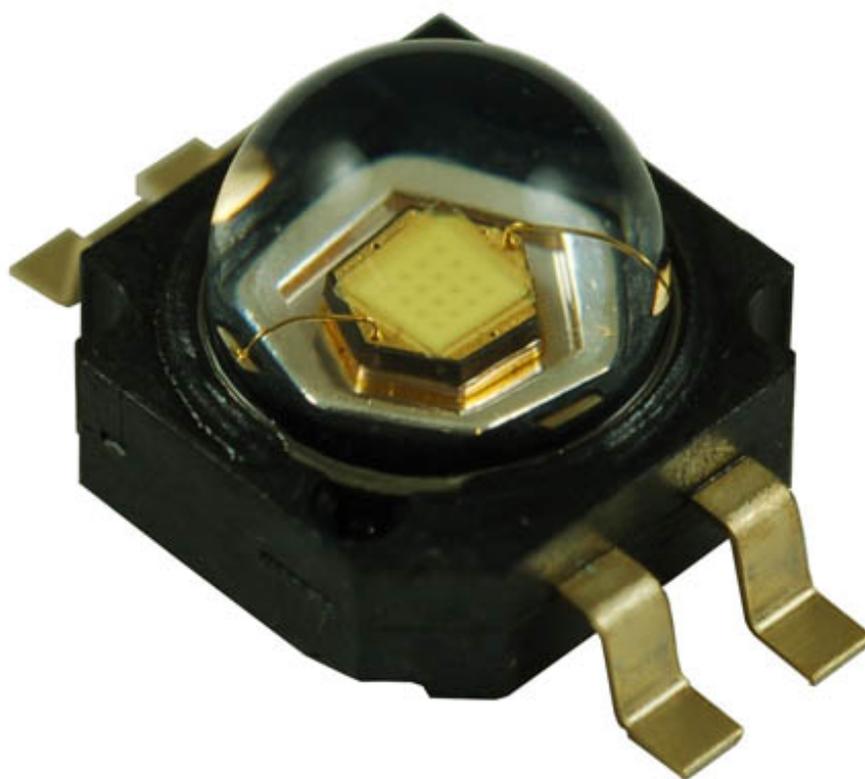


Figura 3.10: Foto del LED ad alta potenza “Philips K2” (da [2]).

4

Caratteristiche dei LED e confronto con le altre sorgenti

In questo capitolo vengono esposte alcune caratteristiche dei LED ad alta potenza e cercheremo di fare un confronto tra questi e altri tipi di lampade, oggi sicuramente più utilizzate per l'illuminazione. Nell'ultimo paragrafo invece faremo qualche cenno ai settori della ricerca che saranno essenziali per l'affermazione dei LED in campo illuminotecnico.

Prima di iniziare è bene sottolineare che la ricerca nel campo dell'illuminazione allo stato solido (cioè dei LED) è piuttosto attiva e quindi le caratteristiche dei LED sono in evoluzione e continuo miglioramento mentre tutte le altre tecnologie sono ormai mature e difficilmente potranno essere ulteriormente sviluppate.

Alcune peculiarità dei LED, che possono sembrare di poco conto ma che potrebbero favorirli in alcuni ambiti applicativi, sono le dimensioni e i pesi nettamente ridotti, oltre che l'assenza di emissioni nell'infrarosso e nell'ultravioletto. Inoltre lo sviluppo che sta avendo la sintesi additiva RGB potrebbe facilitare notevolmente la cosiddetta *regia della luce*, cioè la gestione dinamica (sia d'intensità che di colore) dei flussi luminosi.

4.1 Efficienza luminosa

L'efficienza luminosa della sola lampada (escludendo cioè le potenze assorbite dai sistemi di alimentazione e le potenze luminose perse nelle riflessioni e rifrazioni dovute all'uso di ottiche per migliorare la distribuzione del flusso luminoso) è, per quanto riguarda i LED, aumentata molto negli ultimi anni (vedi figura 4.1).

Questo miglioramento segue la *legge di Haitz*, in modo simile a quanto accade per il numero di transistor in un chip con la legge di Moore: ogni dieci anni si

ha un miglioramento di un fattore 20 dell'efficienza e un abbassamento di un fattore 10 del costo per lumen. Per i LED ad alta potenza a luce bianca si è arrivati attualmente ai 160lm/W in laboratorio, mentre in applicazioni pratiche i valori si attestano attorno ai 90lm/W. Da notare che efficienze sempre più alte significano non solo risparmio di energia elettrica, ma anche meno calore prodotto e quindi meno problemi di surriscaldamento della giunzione P-N.

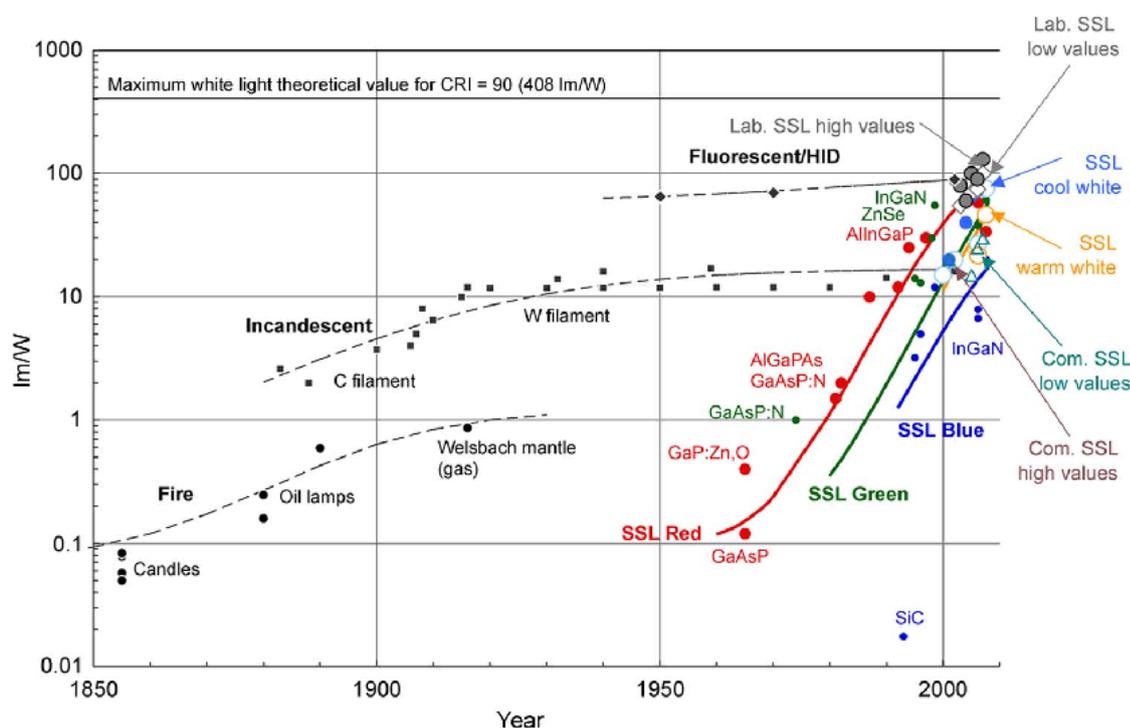


Figura 4.1: Andamento dell'efficienza luminosa di diverse sorgenti nel tempo (da [5]).

Inoltre per le lampade tradizionali l'aumento della potenza elettrica assorbita migliora l'efficienza della lampada stessa (per esempio l'efficienza di una lampada a incandescenza da 60W è di circa 10lm/W, mentre quella di una lampada da 100W si aggira sui 14lm/W), invece per i LED vale il contrario.

Nonostante l'efficienza della sola sorgente (η_s) dia già delle buone indicazioni sulla qualità delle diverse lampade, è sempre bene riferirsi all'*efficienza globale* (η_g), molto più utile per un'analisi di tutte le perdite energetiche del sistema di illuminazione. Quest'ultima si può ricavare con la formula

$$\eta_g = \frac{\eta_s P_s}{P_s + P_a}$$

dove:

- ρ è il rendimento luminoso dell'ottica;
- P_s è la potenza elettrica assorbita dalla sola sorgente;
- P_a è la potenza elettrica assorbita dal sistema di alimentazione e controllo.

Proprio usando questa formula è stata compilata la tabella 4.1 che riassume quanto detto finora e permette un rapido confronto tra le efficienze delle lampade oggi più comuni nelle abitazioni e un modulo costituito da 10 LED ad alta potenza.

Tipo sorgente	P_s (W)	P_a (W)	Flusso emesso (lm)	η_s (lm/W)	ρ (%)	η_g (lm/W)
a incandescenza	100	–	1400	14	90	13
ad alogeni a bassissima tensione	50	8	880	18	70	11
CFL (fluorescente compatta)	26	2	1800	69	50	32
modulo con 10 LED ad alta potenza	30	6	2700	90	85	64

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva delle efficienze luminose delle sorgenti più utilizzate per l'illuminazione privata e un modulo di 10 LED (adattata da [3]).

Il confronto è stato fatto solo con le lampade di uso domestico e in questo ambito l'efficienza luminosa raggiunta è senza dubbio migliore di quella delle lampade oggi più usate. Attualmente infatti i LED non sembrano poter sostituire le sorgenti utilizzate per l'illuminazione stradale o di grandi ambienti pubblici: questo non tanto per problemi di efficienza (visto che in un prossimo futuro i LED raggiungeranno efficienze paragonabili a quelle delle lampade al sodio), ma per altre caratteristiche di seguito elencate tipiche dei LED.

Il LED è una sorgente “direzionale” (cioè la luce prodotta è molto concentrata) e questo ne limita le applicazioni nell'ambito dell'illuminazione stradale, che deve essere il più possibile uniforme e dove si deve garantire un basso rischio di abbagliamento. Invece lampade a LED sono già utilizzate con successo in percorsi ciclopedonali e parchi, dove la qualità dell'illuminazione non deve essere così spinta.

Inoltre, anche se l'efficienza dei LED è molto buona, il flusso emesso da un singolo LED ad alta potenza è molto più basso di quello emesso dalle altre sorgenti ed è quindi necessario utilizzare più LED affiancati per raggiungere i flussi desiderati: i singoli LED hanno potenze che possono variare tra 1 e 5W, ma ci sono delle lampade di potenza compresa tra i 10 e i 100W ottenute raggruppando più LED su un singolo circuito stampato. Queste possono essere utilizzate in

ambito domestico e non solo, ma è comunque da escludere, allo stato attuale della tecnologia, l'utilizzo dei LED in quegli ambiti dove sono necessari altissimi valori di flusso su vaste aree, come per esempio grandi saloni, campi sportivi o palchi teatrali.

4.2 Vita utile

La lunga durata dei LED sembra il maggior punto di forza dell'illuminazione allo stato solido rispetto a quella che sfrutta le sorgenti tradizionali.

Il flusso luminoso generato da tutte le sorgenti cala con il passare del tempo a causa di diversi fattori. Nelle lampade a incandescenza ciò è dovuto all'evaporazione del tungsteno che da una parte annerisce il bulbo di vetro e dall'altra causa la diminuzione della sezione del filamento, aumentandone la resistenza con conseguente diminuzione della corrente che lo attraversa. Nella maggior parte delle lampade a scarica invece l'abbassamento del flusso luminoso emesso è dovuto principalmente al degrado delle polveri fluorescenti.

Tuttavia queste variazioni di flusso sono generalmente trascurabili e la "morte" delle lampade avviene solitamente il modo istantaneo per la rottura degli elettrodi, oppure per alcune lampade a scarica può verificarsi un funzionamento irregolare dovuto a guasti del sistema di alimentazione. Invece nei LED, a meno di rotture accidentali, il flusso emesso cala lentamente senza una brusca interruzione (vedi figura 4.2).

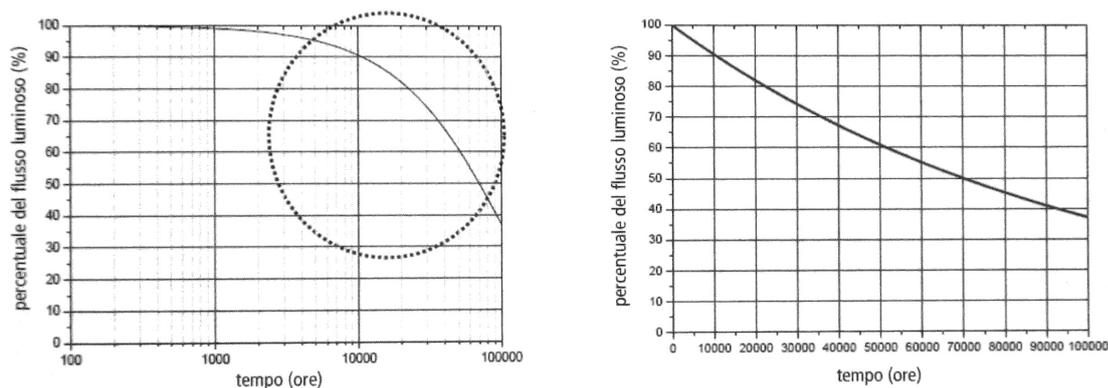


Figura 4.2: Andamento (su scala temporale logaritmica e lineare) del decadimento del flusso di un LED ad alta potenza con corrente di pilotaggio di 350mA e temperatura di giunzione di 90°C (da [3]).

Questo rende necessario l'uso di criteri per valutare la durata delle lampade del tutto diversi da quelli tradizionali (che prevedono di misurare il tempo intercorso tra l'accensione di più lampade e l'istante in cui una certa percentuale di esse smette di funzionare). Il metodo più usato prevede di definire la vita utile dei LED come il tempo trascorso dall'accensione del LED stesso al momento in cui il flusso emesso raggiunge il 70% del flusso iniziale.

Comunque misurare questi tempi in laboratorio è piuttosto difficile (visto che le durate così definite possono superare le 50 000 ore, cioè circa 6 anni di funzionamento ininterrotto) e quindi molto spesso le misure sperimentali vengono limitate a circa 6000 ore e le curve complete vengono poi costruite mediante estrapolazione dei dati raccolti. Questa metodologia di lavoro lascia qualche dubbio sull'esattezza delle stime delle durate dei LED, ma è comunque evidente (anche nei casi peggiori) la durata nettamente maggiore dei LED rispetto alle altre sorgenti (vedi tabella 4.2).

Tipo sorgente	Vita utile (10³ ore)
a incandescenza	1
ad alogeni	3
fluorescente lineare	30
CFL (fluorescente compatta)	15
a vapori di sodio a bassa pressione	30
a induzione	60
LED bianchi ad alta potenza	50

Tabella 4.2: Tabella riassuntiva delle durate di alcune sorgenti.

Come si vede, le uniche lampade con durate paragonabili a quelle dei LED sono quelle a induzione che, nonostante la buona efficienza e resa dei colori, non sono mai state competitive sul mercato. Questo per il loro alto costo, per la scarsa offerta di potenze disponibili e, a parere di alcuni, anche per la troppo debole spinta dei produttori di lampade e apparecchi verso una tecnologia che avrebbe portato loro modesti ritorni economici proprio per la lunghissima durata di vita che caratterizza le lampade a induzione.

Inoltre i LED hanno il grande vantaggio di non risentire, come invece accade per molte lampade a scarica, di frequenti cicli di accensione e spegnimento: la durata delle lampade fluorescenti compatte può addirittura passare da 15 000 ore a circa 1000 ore in caso di accensioni limitate a brevi periodi.

È importante ricordare come l'effettiva durata dei LED sia ampiamente variabile in funzione della temperatura della giunzione: il diagramma di figura 4.3 fa

capire ancora una volta l'importanza dei sistemi per dissipare il calore prodotto nella giunzione P-N.

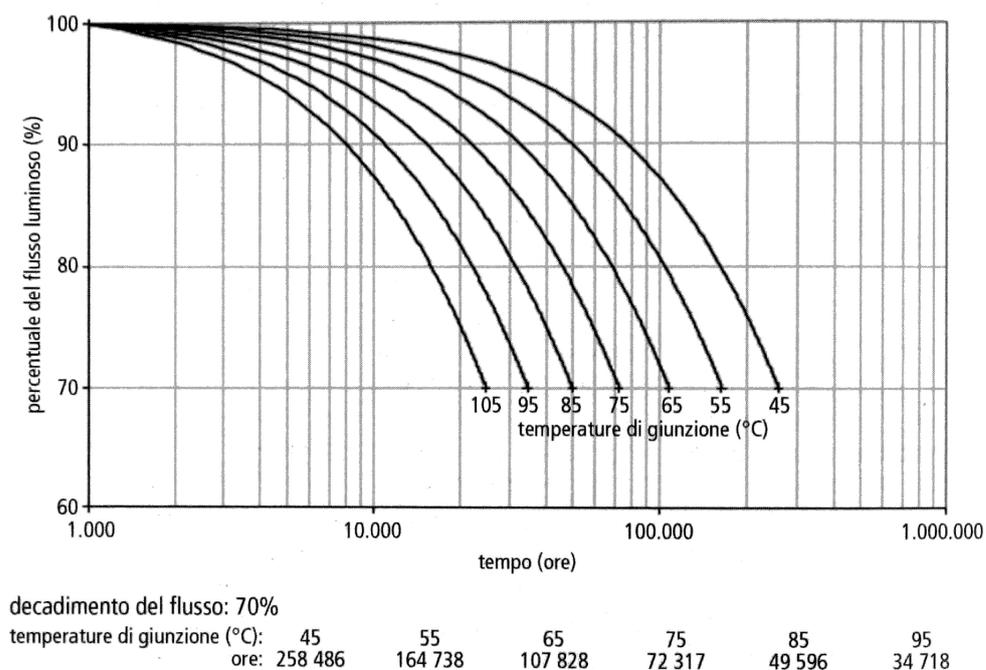


Figura 4.3: Andamento, per diversi valori della temperatura di giunzione, del decadimento del flusso di un LED ad alta potenza con corrente di pilotaggio di 350mA (da [3]).

Infine, a differenza di tutte le altre lampade, i LED non sono costituiti da materiali fragili come filamenti sottili e ampole di vetro riempite di sostanze gassose a pressioni diverse da quella esterna, quindi anche la resistenza a sollecitazioni meccaniche e vibrazioni è nettamente maggiore rispetto alle sorgenti tradizionali.

4.3 Sostanze utilizzate nella produzione

Come già spiegato nel capitolo 1, nei prossimi mesi non saranno più disponibili molte lampade a incandescenza (sicuramente tutte quelle tradizionali, ma anche i modelli meno efficienti delle lampade ad alogeni). Questa decisione, imponendo sorgenti luminose a più alta efficienza, garantirà un notevole risparmio energetico e quindi anche un beneficio per l'ambiente dovuto alla riduzione di emissioni di anidride carbonica e altri gas-serra.

Tuttavia un altro tipo di inquinamento potrebbe aumentare. In effetti le candidate principali alla sostituzione delle vecchie sorgenti a incandescenza sono le fluorescenti (in particolar modo le CFL, per la compatibilità dei loro attacchi con i tradizionali lampadari) che, come abbiamo visto nel paragrafo 2.2, funzionano grazie ai vapori di mercurio.

Ogni lampada fluorescente compatta contiene circa 5 mg di mercurio, che è un metallo altamente tossico: questo non sarebbe un problema se le CFL venissero correttamente smaltite, prevedendo il recupero del mercurio. Il problema è che, nonostante le fluorescenti vengano utilizzate in alcuni ambiti già da parecchio tempo, e a breve invaderanno il mercato dell'illuminazione casalinga, in molte zone non è ancora presente una raccolta specifica per questo tipo di lampade (e comunque poche persone sono informate che queste non vanno gettate insieme ai normali rifiuti).

Al contrario nella produzione dei LED non vengono usate sostanze inquinanti per l'ambiente o nocive per piante e animali, quindi anche il loro smaltimento è sicuramente più semplice.

4.4 Costi

Quello dei costi è un punto critico (almeno per il momento) per i LED perchè, nonostante la costante riduzione dei prezzi delle lampade che sfruttano questa tecnologia, i costi iniziali sono ancora troppo alti per renderli appetibili sul mercato delle sorgenti luminose. Il diagramma che mostra l'andamento del costo di diversi tipi di lampade (a parità di flusso luminoso emesso) è quello di figura 4.4.

In realtà, facendo un'analisi più approfondita, spalmando il costo iniziale delle lampade su tutto il periodo della loro vita e tenendo conto anche del risparmio di energia elettrica dovuto alla loro alta efficienza, i LED sono già più convenienti delle lampade a incandescenza e supereranno a breve anche le fluorescenti compatte (vedi figura 4.5). Anche in questo caso il confronto è stato limitato alle sorgenti usate in ambito domestico.

È tuttavia utile ricordare che il consumatore è solitamente restio a passare a una tecnologia completamente nuova e con costi iniziali molto più alti di quella tradizionale, anche sapendo che nel corso del tempo potrà recuperare la somma spesa inizialmente.

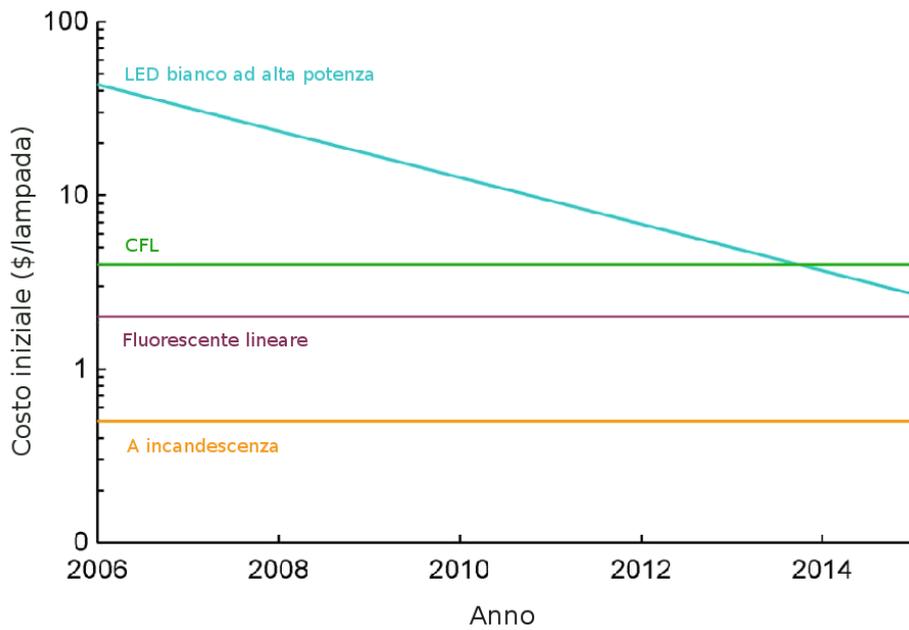


Figura 4.4: Andamento, a parità di flusso emesso, dei costi iniziali di diversi tipi di lampade (adattata da [5]).

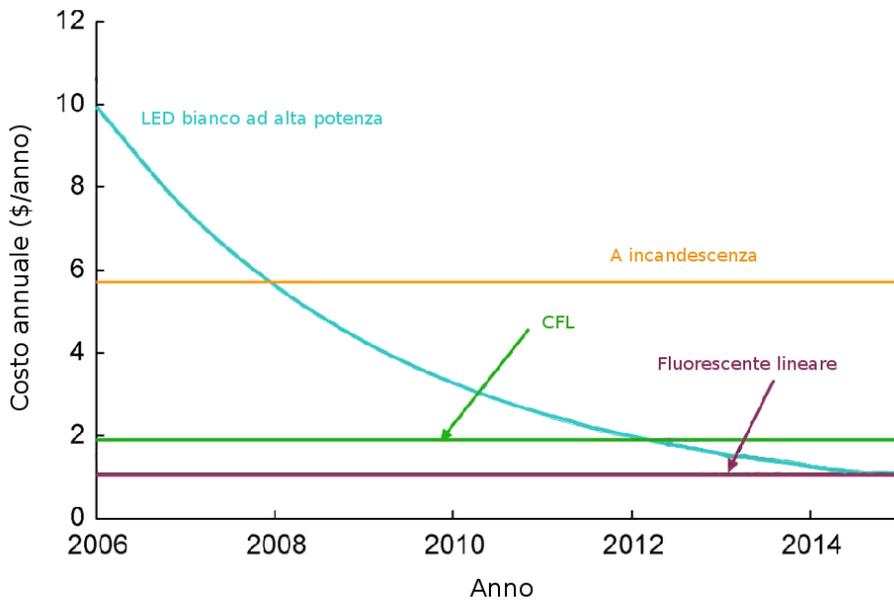


Figura 4.5: Andamento, a parità di flusso emesso, dei costi annuali di diversi tipi di lampade. È stato assunto un utilizzo delle sorgenti di 2 ore/giorno (adattata da [5]).

4.5 Attuali campi di ricerca

In questi anni, per cercare di migliorare ulteriormente le prestazioni dei LED ad alta potenza per scopi illuminotecnici, i ricercatori si stanno impegnando soprattutto nei settori riportati di seguito.

Aumento dell'efficienza dei LED verdi

Aumentare l'efficienza quantica esterna dei LED che emettono attorno al giallo-verde è essenziale per riuscire a colmare il green gap e poter sfruttare al meglio la sintesi additiva RGB (o addirittura RYGB utilizzando anche LED di colore giallo) per ottenere lampade a luce bianca.

Aumento dell'efficienza dei LED blu e UV

Aumentare l'efficienza quantica esterna dei LED blu è essenziale per migliorare le caratteristiche delle lampade a LED a luce bianca più utilizzate attualmente (che sfruttano i LED blu con fosfori che emettono luce gialla). Invece i LED che irradiano nell'ultravioletto sono utili perchè i fosfori attualmente a disposizione (e soprattutto quelli per produrre luce rossa) funzionano al meglio solo se colpiti da radiazioni a lunghezza d'onda minore rispetto a quella delle radiazioni visibili.

Ricerca di nuovi fosfori

Come appena detto la maggior parte dei fosfori è stata finora pensata per funzionare grazie alle radiazioni ultraviolette emesse dalle lampade fluorescenti. Trovare nuovi fosfori che funzionino bene anche se eccitati da radiazioni nello spettro visibile sarebbe più funzionale alla tecnologia dei LED.

L'aumento dell'efficienza dei LED può essere ottenuto in due modi: aumentando l'efficienza quantica interna delle giunzioni oppure aumentando l'*efficienza di estrazione*, cioè il rapporto tra il numero di fotoni che riescono a uscire dalla giunzione stessa e il numero totale di fotoni generati. Questi miglioramenti possono essere raggiunti studiando e utilizzando dei nuovi materiali semiconduttori per la produzione dei LED.

5

Conclusioni

Da quanto emerso nel capitolo 4 è possibile concludere che molto probabilmente la cosiddetta “illuminazione allo stato solido”, cioè quella che sfrutta i LED, avrà nei prossimi anni il sopravvento sull’illuminazione tradizionale in molti ambiti applicativi.

Attualmente le prestazioni sono già paragonabili, e anche migliori, rispetto a quelle delle lampade oggi utilizzate per l’uso domestico, per l’illuminazione di vetrine e negozi, nella costruzione di luci e proiettori destinati al montaggio su veicoli, oltre che per l’illuminazione d’esterni dove non sono richiesti flussi luminosi molto elevati e un’alta qualità dell’illuminazione stessa.

Come già detto il problema principale è quello del costo ancora elevato di queste nuove lampade, ma con il passare di qualche anno i prezzi dei LED ad alta potenza scenderanno ulteriormente, spingendo i consumatori verso questa tecnologia. Potrebbe essere comunque utile agevolare i cittadini nell’acquisto e utilizzo di lampade a LED mediante degli incentivi da parte delle istituzioni. Il passaggio ai LED invece che alle CFL potrebbe portare dei risparmi notevoli per la collettività: infatti le lampade fluorescenti hanno elevati costi di smaltimento e possono essere causa di inquinamento ambientale se non trattate adeguatamente. Oltretutto la maggior richiesta di lampade a LED potrebbe spingere l’industria a investire ulteriormente nella ricerca e nello sviluppo di questa tecnologia.

Per quanto riguarda invece l’illuminazione stradale e di grandi ambienti i LED non hanno ancora le caratteristiche necessarie per poter rimpiazzare in brevi periodi le lampade attualmente usate. Tuttavia la ricerca nel campo dei semiconduttori è sempre viva e porta continuamente grandi miglioramenti, e quindi nuovi sviluppi per il futuro non sono assolutamente da escludere.

Per il successo dei LED in campo illuminotecnico diventa essenziale non forzare il loro uso in qualsiasi campo applicativo, ma limitarne l'utilizzo alle applicazioni nelle quali le loro caratteristiche possano essere apprezzate. Infatti un approccio generalista sarebbe deludente in molti casi, provocando una successiva sfiducia del mercato rispetto ai LED stessi.

Bibliografia

- [1] A. Cutolo, *Optoelettronica: ottica fotonica e laser*, McGraw-Hill, Milano, 1997.
- [2] M. Bonomo, *Illuminazione d'interni: teoria, tecniche, apparecchi, progettazione di impianti, applicazioni*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2009.
- [3] G. Forcolini, *Illuminazione LED: funzionamento, caratteristiche, prestazioni, applicazioni*, Hoepli, Milano, 2008.
- [4] B. Cook, "New developments and future trends in high-efficiency lighting", *Engineering science and education journal*, vol. 9, no. 5, pp. 207–217, 2000.
- [5] I. Azevedo et al., "The transition to solid-state lighting", *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 3, pp. 481–510, 2009.
- [6] D. Steigerwald et al., "Illumination with solid state lighting technology", *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 310–320, 2002.
- [7] A. Bergh et al., "The promise and challenge of solid-state lighting", *Physics today*, vol. 54, no. 12, pp. 42–47, 2001.
- [8] C. Humphreys, "Solid-state lighting", *MRS bulletin*, vol. 33, pp. 459–470, 2008.
- [9] M. Saraceni, *Illuminazione stradale a LED - 1° parte*, 2010.
- [10] M. Krames et al., "Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting", *Journal of display technology*, vol. 3, no. 2, pp. 160–175, 2007.
- [11] M. Shur et al., "Solid-state lighting: toward superior illumination", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 10, pp. 1691–1703, 2005.
- [12] H. van der Broeck et al., "Power driver topologies and control schemes for LEDs", *Applied power electronics conference, APEC 2007 - twenty second annual IEEE*, pp. 1319–1325, 2007.
- [13] L. Yu et al., "The topologies of white LED lamps' power drivers", *3rd international conference on power electronics systems and applications*, pp. 1–6, 2009.

- [14] J. Freyssinier et al., “Considerations for successful LED applications”, *Proceedings of ChinaSSL2009, 6th China international forum on solid state lighting*, pp. 206–209, 2009.
- [15] F. Martin, “Lampade ad induzione: sorgenti neglette”, *Elettrificazione*, pp. 2–4, 2008.