

Università Degli Studi Di Padova
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione



**Analisi di efficienza e dimensionamento
di backlight a LED blu per display LCD
in tecnologia fosfori remoti**

Relatore: Prof. Gaudenzio Meneghesso

Correlatore: Ing. Luca Rodighiero

Laureando: Gian Matteo Siviero

Indice

Sommario.....	pag.1
Introduzione.....	pag.3
1. Dalla lampadina ai LED.....	pag.7
1.1 Thomas Alva Edison.....	pag.7
1.2 Storia dei LED.....	pag.8
2. I semiconduttori.....	pag.10
2.1.1 Emissione stimolata.....	pag.12
2.1.2 Emissione Spontanea.....	pag.14
2.1.3 Assorbimento.....	pag.15
2.2 Processi di generazione/ricombinazione nei semiconduttori a gap diretto.....	pag.16
2.2.1 Conservazione dell'energia.....	pag.16
2.2.2 Conservazione del momento.....	pag.16
2.3 Ricombinazione bimolecolare.....	pag.18
2.4 Ricombinazioni non radiative.....	pag.21
2.4.1 Ricombinazione SHR (Shockley Read Hall).....	pag.22
2.4.2 Ricombinazione superficiale.....	pag.24
2.4.3 Ricombinazione Auger.....	pag.25
2.5 Ricombinazioni radiative.....	pag.26
2.5.1 Densità congiunta degli stati.....	pag.27
2.5.2 Probabilità di occupazione degli stati.....	pag.28
2.5.3 Probabilità di transizione.....	pag.29
3. Light emitting diode (LED).....	pag.32

3.1 Principio di funzionamento della regione attiva.....	pag.33
3.2 Efficienza di un LED.....	pag.35
3.3 Effetti della temperatura sulle caratteristiche optoelettroniche di un LED.....	pag.39
3.4 Caratteristica I-V di un LED.....	pag.44
3.4.1 Generazione e ricombinazione all'interno della regione di svuotamento.....	pag.46
3.4.2 Fotocorrente.....	pag.47
3.4.3 Diodo parassita.....	pag.47
4.Il Nitruro di Gallio e le tecnologie di fabbricazione.....	pag.50
4.1 Struttura cristallina del GaN.....	pag.50
4.2 Proprietà elettriche dei nitruuri.....	pag.53
4.3 Substrati.....	pag.57
4.4 Principali tecniche epitassiali utilizzate in optoelettronica.....	pag.58
4.4.1 Molecular Beam Epitaxy (MBE).....	pag.58
4.4.2 Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD).....	pag.60
4.4.3 Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE).....	pag.62
4.5 Drogaggio del GaN.....	pag.67
5 LED a luce bianca.....	pag.68
5.1 L'occhio umano.....	pag.68
5.2 Radiometria e fotometria.....	pag.70
5.3 Colorimetria.....	pag.72
5.4 Temperatura di colore e indice di resa del colore.....	pag.75
5.4.1 Temperature del colore.....	pag.75
5.4.2 Indice di resa cromatica CRI.....	pag.78
5.5 Metodi di implementazione dei LED bianchi.....	pag.78

5.5.1 LED Multichip.....	pag.79
5.5.2 LED con fosfori.....	pag.82
5.6 Metodi di deposizione dei fosfori.....	pag.87
6. Struttura di un pannello LCD.....	pag.91
6.1 Introduzione.....	pag.91
6.2 Display a matrice attiva e passiva.....	pag.93
6.3 Struttura ottica di un pannello LCD.....	pag.96
6.4 Retroilluminazione nei pannelli LCD.....	pag.101
6.4.1 Retroilluminazione a CCFL.....	pag.101
6.4.2 Retroilluminazione a UFL con fosfori con fosfori tricromatici.....	pag.103
6.4.3 Retroilluminazione a LED.....	pag.104
7 Caratterizzazione LED blu e bianchi.....	pag.109
7.1 Introduzione alle misure.....	pag.109
7.2 Caratteristiche dei dispositivi.....	pag.111
7.3 Misure elettriche iniziali.....	pag.116
7.4 Misure ottiche iniziali.....	pag.121
7.5 Stress dei componenti.....	pag.129
7.5.1 Premessa.....	pag.129
7.5.2 Prove di stress e misure.....	pag.131
7.6 Risultati.....	pag.134
8 Caratterizzazione dei fogli di fosfori.....	pag.140
8.1 Processo di produzione dei fogli e loro caratteristiche generali..	pag.140
8.2 Caratteristiche dei campioni di fogli e introduzione alle misure.	pag.143
8.3 Misure ottiche iniziali.....	pag.145
8.4 Stress dei fogli.....	pag.150

8.5 Risultati.....	pag.153
9 Implementazione di un display a LED da 32''	pag.163
9.1 Smontaggio e modifica del display.....	pag.163
9.2 Misure sul display.....	pag.167
9.3 Risultati delle misure.....	pag.168
Bibliografia.....	pag.175

Alla mia famiglia, a Claudia e a me stesso per non aver mollato...

Sommario

Questo lavoro di tesi, che ha previsto uno stage aziendale della durata di 6 mesi circa, ha lo scopo di effettuare un'analisi di efficienza, principalmente dal punto di vista ottico, su una nuova tecnologia di retroilluminazione per i display.

Dapprima si sono eseguite misure sui quei componenti che permettono, con un nuovo approccio, l'ottenimento della luce bianca di retroilluminazione del display, successivamente si sono svolte delle misure sul sistema completo, cioè misure su un prototipo finito di display.

Le misure svolte durante la parte iniziale del tirocinio sono hanno riguardato la caratterizzazione di alcune tipologie di LED, sia a luce bianca che blu. Mentre i primi sono utilizzati da tempo per la retroilluminazione dei display, i LED blu sono tuttora oggetto di studio, assieme ad altri componenti, per ottenere sempre lo stesso risultato nel display, ossia la luce bianca.

Su questi dispositivi si sono eseguite delle misure di carattere elettrico ed ottico prima e durante lo stress di tipo termico ed elettrico, volte ad effettuare un confronto tra le due tipologie di LED condizioni di normale funzionamento all'interno di un display.

Altre misure di tipo ottico sono state eseguite su dei campioni di fogli di fosfori, oggetto aggiuntivo che abbinato ai LED blu, permette di ottenere la luce bianca di retroilluminazione. Anche questi campioni sono stati sottoposti a stress, ma solo di tipo termico, e si sono eseguite, prima e durante lo stress, misure di tipo ottico.

INTRODUZIONE

L'azienda

Con oltre 30 anni di esperienza, GDS continua ad essere un leader tecnologico e oggi il produttore leader a livello mondiale nel settore dei display.

La società, costituita nel 2001, nasce dalla fusione di un'azienda elettronica italiana e di una inglese.

Questa unione si è dimostrata subito efficiente a tal punto che ora l'azienda può vantare una squadra che lavora sinergicamente in 5 continenti. Mentre questa scala è essenziale per la competitività sui mercati globali, lo è anche la flessibilità, e il modo in cui le unità aziendali sono strutturate, permette a GDS di gestire un mix di prodotti e volumi non indifferente che riguarda monitor, display outdoor, stampanti, chioschi e ATM oltre alla produzione di prodotti elettronici in campi marittimo, medico, delle telecomunicazioni, dell'automotive e finanziario.

L'azienda è orgogliosa di aver sperimentato soluzioni e tecnologie come i display leggibile alla luce solare, inverter, grandi schermi con *bonding* ottico e sistemi di gestione termica per applicazioni outdoor. Oggi l'azienda procede in prima linea nel settore display, in continuo miglioramento e investe in nuove soluzioni e applicazioni come l'elevata luminosità retroilluminazione LED per mantenere la sua posizione di classe.

I fosfori

Il fosforo è il materiale luminescente utile in molte applicazioni di illuminazione e in particolar modo per i LED.

Il fosforo non si trova in natura allo stato elementare, ma sotto forma di fosfato (sale dell'acido fosforico) ed è abbondante in alcune rocce e nelle cellule degli esseri viventi, del cui metabolismo è un componente essenziale. Il fosforo elementare è estremamente reattivo e, combinandosi con l'ossigeno emette una tenue luminescenza. Esistono varie forme di fosfori e identificate dal loro colore: bianco (o giallo), rosso e nero (o violetto).

La sua proprietà di luminescenza fu scoperta subito e il suo utilizzo in campo elettronico/chimico non tardò ad arrivare come mostrato nella seguente figura.

Ai giorni nostri la maggior parte dei LED bianchi sono infatti LED blu con un rivestimento di fosforo sopra la regione attiva. Quest'ultimo assorbe la luce alla lunghezza d'onda blu ed emette i fotoni a lunghezze d'onda più lunghe fino al 95 per cento delle lunghezze d'onda visibili.

Con i continui passi in avanti della tecnologia soprattutto nel settore delle tv e dei display a LED, i LED bianchi si sono dimostrati essere migliori dal punto di vista della luminosità ma con alcuni svantaggi dal punto di vista ottico, fondamentale in questo settore.

Questi si possono così riassumere:

- **Colore non uniforme** a causa della deposizione imprecisa dello strato di fosforo sul LED
- **Vincolo al bin dei LED** (suddivisione del diagramma cromatico in base alle coordinate cromatiche della radiazione), per una data temperatura di colore della radiazione emessa che provoca un **aumento della gestione del magazzino**
- La radiazione blu emessa dal LED chip che non viene convertita dai fosfori, torna all'indietro e colpisce il LED chip incrementando il calore, con conseguente **perdite dell'efficienza e riduzione dell'affidabilità**
- La stessa radiazione riflessa all'indietro colpisce lo strato riflettente (o specchio) posto attorno al LED chip e ne provoca a lungo andare un annerimento con conseguente **shift della radiazione emessa** dal LED, cioè **cambio della temperatura di colore**, verso temperature più fredde
- Comporta quindi **perdita di efficienza** dell'ordine del 10%-15% o anche superiore

Preso atto di questi inconvenienti, i cui effetti si manifestano dopo tempo, si è cominciato a pensare a come ovviare a questo inconveniente.

La soluzione è data proprio dagli stessi fosfori che però ora vengono utilizzati in modo differente nel senso che non vengono depositi direttamente sopra al LED ma si utilizzano sottoforma di un foglio.

Questo modo di ottenere la luce bianca necessaria per la retroilluminazione del display, permette di:

- ***Diffusione della radiazione resa più naturale*** grazie alla morfologia dei fosfori e ***Temperatura di colore intrinseca del foglio*** di fosfori e non più al LED
- ***Flessibilità***: con lo stesso LED blu, cambio della caratteristica spettrale (si aggiusta la temperatura di colore) variando il foglio di fosfori in modo veloce
- ***Diminuzione delle riflessioni*** contro il LED blu con conseguente ***aumento dell'affidabilità***
- ***Riduzione della gestione del magazzino*** per i LED blu rispetto ai LED bianchi
- ***Aumento dell'efficienza***

Questo lavoro di tesi ha dunque lo scopo di presentare le prime misure eseguite dall'azienda che riguardano questo nuovo metodo di ottenere luce bianca necessaria per la retroilluminazione dei pannelli LCD all'interno di un display.

Il presente lavoro si divide nei seguenti capitoli:

- ***Capitolo 1***: viene fatta una breve presentazione della storia dei LED
- ***Capitolo 2***: si analizzano i principali processi di ricombinazione all'interno di semiconduttori a gap diretto;
- ***Capitolo 3***: viene descritto il principio di funzionamento di un diodo ad emissione di luce con relative caratteristiche ottiche, elettriche e fisiche ;
- ***Capitolo 4***: si elencano i principali metodi di produzione utilizzati per la crescita del GaN, materiale utilizzato come regione attiva nei LED bianchi con relative problematiche tecnologiche;
- ***Capitolo 5***: si presentano i metodi di implementazione per l'ottenimento della luce bianca utilizzando i LED accennando concetti di radiometria e fotometria
- ***Capitolo 6***: si spiega la struttura di un pannello LCD e i vari modi di retroilluminazione
- ***Capitolo 7***: si descrive la caratterizzazione dei LED bianchi e blu, anticipando le loro caratteristiche elettriche ed ottiche, descrivendo il setup di misura e le prove di stress in corrente e temperatura a cui sono stati sottoposti ed espone le caratteristiche dei dispositivi durante lo stress

- *Capitolo 8*: si parla della caratterizzazione dal punto di vista ottico dei campioni di fogli di fosfori, descrivendo il modo di produzione di tali fogli, il setup di misura, le prove di stress e presentando le caratteristiche dei fogli durante le prove di stress
- *Capitolo 9*: viene presentato un display LCD completo che presenta contemporaneamente le due tecnologie di retroilluminazione presentando le diverse caratteristiche dal punto di vista ottico.

1. Dalla lampadina ai LED

1.1 Thomas Alva Edison

Prima di iniziare la trattazione degli argomenti, sembra doveroso raccontare, seppur velocemente, la storia di una delle più grandi invenzioni di fine '800 da parte di uno dei più prolifici inventori dell'epoca: *La Lampada a filamento di Thomas Alva Edison*.

Questa invenzione, che ai giorni nostri sembra banale, ha svincolato, di fatto, l'uomo dai ritmi dettati dalla luce solare: da allora questo dispositivo è il più utilizzato per l'illuminazione artificiale.

Thomas Alva Edison, nato a Milan (Ohio) il giorno 11 febbraio 1847 (deceduto poi a West Orange, 18 ottobre 1931), fin da giovane aveva una certa propensione per le scoperte scientifiche. Perfezionò infatti il telefono, già diffuso da Bell, con l'invenzione del microfono a granuli di carbone; nel 1878 ottenne il brevetto per l'invenzione del fonografo e l'anno successivo portò a buon punto gli esperimenti inerenti l'illuminazione elettrica culminati il **21 ottobre** dello stesso anno con l'accensione della prima lampadina a filamento di carbone.

Il periodo riguardante lo studio della lampadina elettrica fu di circa due anni di duro lavoro. Il problema che lo fece impazzire era quello di trovare un filamento che divenisse incandescente nel globo senza bruciare.

Provò un'infinità di sostanze, compresi i peli di barba di un suo collaboratore; provò il platino, cotone, carta, fibre vegetali. Sperimentò moltissimi tipi di queste fibre; nell'ottobre del 1879, una lampadina nella quale aveva montato un filamento di cotone bruciato rimase accesa per 40 ore. Successivamente la perfezionò utilizzando un filamento di carbone racchiuso in un involucro di vetro contenente del gas inerte.



Figura 1 Prima Lampada a filamento inventata da Edison

Fu l'inizio di una svolta scientifica che portò Edison a fondare la *Edison Electric Light Company* a New York con adeguato sostegno finanziario (inclusi J.P. Morgan e Vanderbilt) illuminando nel 1882 un quartiere al centro di New York.

Con l'invenzione della lampada a filamento, Edison riuscì a sviluppare il primo sistema di distribuzione di energia elettrica al mondo in corrente continua a 110 volt a circa 59 utenti di un quartiere di Manhattan, sostituito in seguito, come tutti sappiamo, dal sistema a corrente alternata.

1.2 Storia dei LED

L'anno che segna l'inizio dell'illuminazione tramite semiconduttori è il 1907, quando H. J. Round notò che un campione di carburo emetteva una debole luce gialla se sottoposto ad una tensione di 10 V. Chiaramente questa prima esperienza si dimostrò del tutto casuale e si dovette attendere fino agli anni '50 perchè riprendesse la ricerca con una certa cognizione di causa. I primi risultati uscirono nel '62 quando venne costruito il primo LED rosso in AsGaP da N. Holonyak della General Electric con un'efficacia luminosa di 0.1 lm/W. Questi ebbe l'intuizione di prendere un diodo in GaAs e allargare il bandgap con del fosforo per avere emissione visibile.

La ricerca continuò sui semiconduttori composti del gruppo III-V e II-VI. Presto si riuscì a

coprire buona parte dello spettro del visibile, ma solo con LED indicatori (AlGaAs per il rosso e IR, GaP e GaP:N per il verde). Negli anni '80 si cominciò invece ad affinare le tecniche di costruzione per crescere LED ad alta efficienza per l'illuminazione (figura 1). Con l'introduzione di nuovi processi di crescita questa ricerca è approdata nel '95 alla costruzione del primo LED blu in InGaN/GaN funzionante grazie a S. Nakamura. Attualmente i primi LED di potenza a luce bianca hanno preso piede nelle case per sostituire le tradizionali fonti di illuminazione mentre nei campi delle tv e dei display sono in uso già da qualche anno.

2. I semiconduttori

Come noto dalla teoria quantistica, le caratteristiche elettriche e ottiche dei semiconduttori vengono analizzate mediante la teoria delle bande. E' noto infatti che la struttura cristallina di molti semiconduttori come silicio, GaAs, GaN ecc, implica che l'elettrone può assumere solo alcuni valori di energia che dipendono dalla costante cristallina del semiconduttore e dalla quantità di moto della particella. Queste "energie permesse" si trovano all'interno di vere e proprie bande (intervalli) energetiche. Le due bande più importanti dal punto di vista elettronico sono quelle a più alta energia e sono chiamate Banda di Conduzione e Banda di Valenza.

L'intervallo di energia proibito tra le due è definito come Energy gap e vale $E_G = E_C - E_V$.

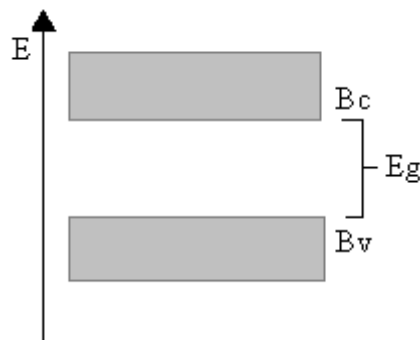


Figura 2.1 Banda di Conduzione, di Valenza e Energy Gap di un generico semiconduttore

Per un'analisi più dettagliata, possiamo dire che una particella in banda di conduzione e in moto all'interno di un reticolo cristallino con un certo passo reticolare, assume un'energia

pari a:
$$E = E_C + \frac{\hbar^2 K^2}{2m_C}$$

In cui:

- k è il momento dell'elettrone in banda di conduzione
- m_C è la massa efficace dell'elettrone in banda di conduzione
- E_C è il livello più basso della banda di conduzione

$$E = E_V - \frac{\hbar^2 K^2}{2m_C}$$

Per quanto riguarda la banda di valenza invece, la relazione diventa:

Le due equazioni appena descritte sono un'approssimazione del vero legame tra energia e quantità di moto. Questo è possibile grazie alla forma paraboloidale delle funzioni energia quantità di moto negli intorno dei punti di minimo e massimo. Il tutto è evidenziato in *Figura 2.2* in cui vengono rappresentati i punti minimi (in rosso) e massimi (in blu) delle curve:

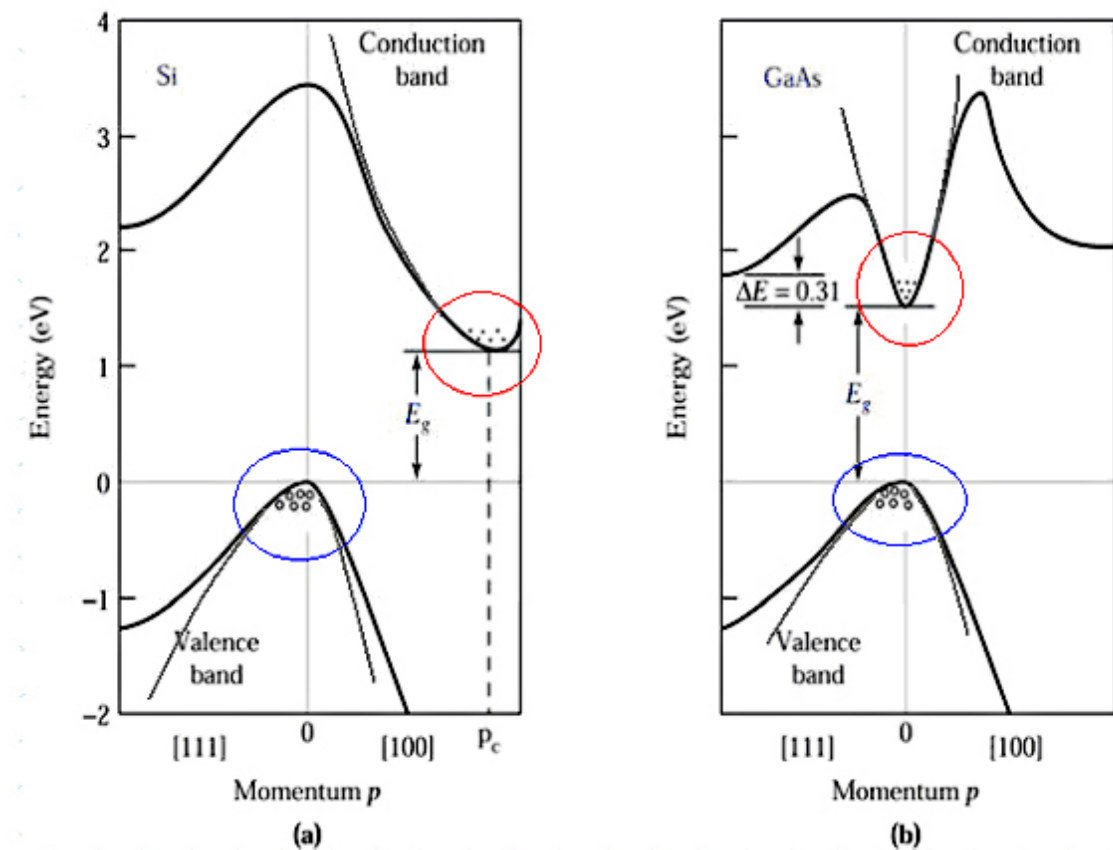


Figura 2.2 Grafici Energia vs Quantità di moto

Come possibile vedere da *Figura 2.2* il minimo e il massimo di energia in banda di conduzione e di valenza, corrispondono allo stesso valore di k per l'arseniuro di gallio, cosa che invece non vale per il silicio. Si dice infatti che il primo è un semiconduttore a bandgap diretto mentre il silicio è a gap indiretto.

Per capire bene come avvengono i processi di ricombinazione e assorbimento di elettroni (e quindi il significato di bandgap diretto e indiretto) bisogna descrivere innanzitutto i tre principali processi di interazione tra fotoni ed elettroni di un materiale e poi definire delle condizioni cui le particelle devono soddisfare per effettuare questo tipo di transizioni.

2.1 Sistemi a 2 livelli energetici

Come risaputo dalla teoria quantistica [2], un atomo di un qualsiasi materiale può assorbire o emettere un fotone effettuando delle transizioni energetiche da un livello ad un altro. Come accennato sopra, vi sono principalmente tre tipi di interazione tra fotoni e materia:

- *Emissione Spontanea*
- *Emissione Stimolata*
- *Assorbimento*

Per la trattazione che si farà di seguito, si considererà un sistema atomico a 2 livelli inserito in una cavità risonante di volume V in grado di sostenere alcuni modi di una radiazione elettromagnetica. Tra tutti questi l'interesse si focalizza su di uno in particolare la cui energia è pari a: $h\nu = E_2 - E_1$.

2.1.1 Emissione Spontanea

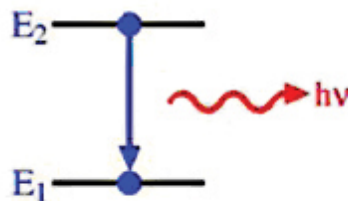


Figura 2.3 Processo di emissione spontanea in un sistema a 2 livelli energetici

Un atomo che si trova in un livello energetico E_2 può decadere al livello inferiore in maniera spontanea emettendo un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$ che va ad aggiungersi all'energia del modo elettromagnetico. Questo processo è detto *Emissione Spontanea* perché la transizione è indipendente dal numero di fotoni che possono essere presenti nel modo.

In una cavità di volume V , la densità di probabilità al secondo (o rate) che un atomo emetta un fotone in maniera spontanea all'interno di un modo di frequenza ν vale:

$$P_{sp} = \frac{c}{V} \sigma(\nu)$$

In questa espressione la funzione $\sigma(\nu)$ è detta sezione d'urto, ha le dimensioni di cm^2 e viene utilizzata per caratterizzare l'interazione di un atomo con una radiazione alla frequenza ν .

La sua area S si può calcolare come:

$$S = \int \sigma(\nu) d\nu$$

Questo parametro viene detto *forza della transizione* e presenta le dimensioni di $\text{cm}^2 \text{Hz}$.

La sua forma descrive la relativa forza d'interazione con fotoni a frequenze diverse. Questo tipo di grandezza introduce un altro tipo di funzione $g(\nu)$ detta *funzione profilo* che è legata alla sezione d'urto in questo modo: $\sigma(\nu) = Sg(\nu)$

Come possibile ricavare dalle espressioni precedenti, le dimensioni di $g(\nu)$ sono di Hz^{-1} con la proprietà $\int g(\nu) d\nu = 1$. Questo tipo di funzione, dà informazioni sulla probabilità che avvenga una transizione alla frequenza ν .

La sua forma è generalmente del tipo:

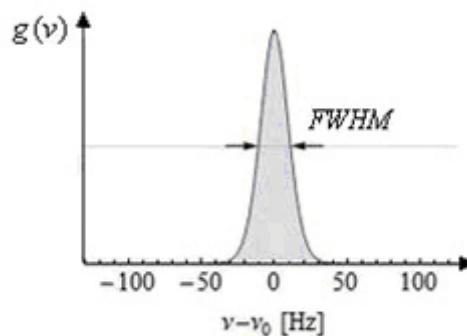


Figura 2.4 Grafico della funzione profilo di un generico materiale

e ha un picco massimo alla frequenza $\nu_0 = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$.

Se a questo punto si considera che la densità del numero di modi in una cavità risonante di volume V è data da $M(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$, la densità di probabilità dell'emissione spontanea in tutti i modi della cavità è:

$$P_{sp} = \int_0^{\infty} \left[\frac{c}{V} \sigma_m(\nu) \right] [VM(\nu)] d\nu = c \int_0^{\infty} \sigma_m(\nu) M(\nu) d\nu$$

dove con $\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{max}$ si intende la sezione d'urto media nello spazio dato che i modi all'interno della cavità hanno una distribuzione spaziale isotropa.

Siccome la sezione d'urto media è molto stretta rispetto alla densità di distribuzione degli stati $M(\nu)$ ed è centrata in ν_0 , la densità di probabilità di emissione spontanea si può approssimare come:

$$P_{sp} = M(\nu_0) c S_m = \frac{8\pi S_m}{\lambda^2}$$

A questo punto è possibile definire un'ulteriore variabile detta *tempo di vita di emissione spontanea* t_{sp} della transizione da 2 a 1 tale che :

$$P_{sp} = \frac{1}{t_{sp}} = M(\nu_0) c S_m$$

Indipendente dal volume V della cavità.

In questo modo la forza di transizione media diventa $S_m = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}}$.

2.1.2 Emissione stimolata

Questo tipo di emissione avviene principalmente nei Laser in cui un fotone incidente in un materiale detto *attivo* (in grado di presentare un'inversione di popolazione) stimola l'emissione di un ulteriore fotone coerente mediante il decadimento dal livello E_2 a quello E_1 degli atomi. Questo processo consente quindi di avere un'amplificazione del flusso di

fotoni incidenti e di mantenere inalterate alcune delle caratteristiche come la polarizzazione (coerenza del fascio).

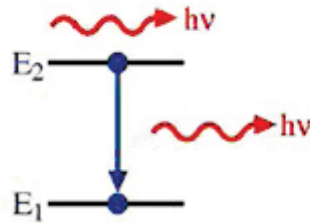


Figura 2.5 Livelli emissione stimolata

La densità di probabilità che un fotone all'interno di una cavità di volume V stimoli l'emissione di un altro fotone coerente, è data da: $p_{st} = \frac{c}{V} \sigma(\nu)$

Se il modo incidente contiene n fotoni, allora $P_{st} = np_{st}$

Possiamo quindi affermare che la densità di probabilità che un atomo all'interno di una cavità, emetta un fotone per emissione spontanea o stimolata è data da:

$$p_{sp} + P_{st} = (n + 1) \frac{c}{V} \sigma(\nu)$$

2.1.3 Assorbimento

Se inizialmente l'atomo di un materiale si trova al livello E_1 e un modo incidente al mezzo stesso contiene un fotone pari all'Energy Gap, il fotone può essere assorbito e portare l'elemento atomico al livello E_2 . Questo processo è detto *assorbimento* ed è il processo inverso dell'emissione.

Anche in questo caso, la densità di probabilità che un atomo all'interno di una cavità risonante di volume V possa assorbire un fotone di un modo incidente è data da:

$$p_{ab} = \frac{c}{V} \sigma(\nu)$$

Se poi il modo incidente contiene n fotoni, tale densità diviene:

$$P_{ab} = np_{ab}$$

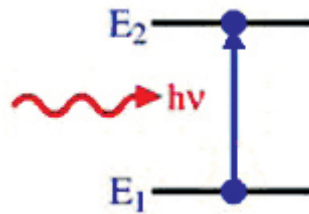


Figura 2.6 Assorbimento

2.2 Processi di generazione/ricombinazione nei semiconduttori a gap diretto

Fatta una prima introduzione sui principali processi di interazioni tra fotoni e atomi di un dato materiale, è necessario stabilire delle regole di transizione per quanto riguarda i semiconduttori a gap diretto in modo da poter parlare in seguito dei vari tipi di ricombinazione che vi avvengono all'interno e quali di questi contribuiscono all'emissione di radiazione luminosa nei LED.

Queste sono appunto:

- *Conservazione dell'energia;*
- *Conservazione della quantità di moto;*

2.2.1 Conservazione dell'energia

Il processo di emissione (o assorbimento) di un fotone di energia $h\nu$, dovuto alla ricombinazione tra un elettrone di energia E_2 e una lacuna di energia E_1 , deve soddisfare la condizione:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

2.2.2 Conservazione del Momento

In un processo di emissione/assorbimento di un fotone, anche il momento deve essere conservato. Infatti:

$$p_2 - p_1 = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow k_2 - k_1 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Quest'equazione è possibile approssimarla come:

$$k_2 \cong k_1$$

se la costante reticolare a è tale che $\frac{2\pi}{\lambda} \ll \frac{2\pi}{a}$. La transizione tra i due livelli energetici diviene quindi di tipo verticale. In base a queste considerazioni, per un semiconduttore come il silicio (gap indiretto) quindi, un elettrone, per potersi ricombinare con una lacuna in banda di valenza, deve prima perdere parte della quantità di moto "urtando" contro il reticolo cristallino. Questo processo di ricombinazione genera nuovi tipi di particelle detti fononi ed è molto meno probabile rispetto alla ricombinazione in materiali a gap diretto come il GaAs. Per questo motivo i semiconduttori a gap indiretto non vengono utilizzati per la realizzazione di dispositivi optoelettronici.

In base al principio di conservazione dell'energia e del momento, è possibile affermare:

$$E_2 - E_1 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_v} + E_G + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c} = h\nu$$

Da cui:

$$k^2 = \frac{2m_r}{\hbar^2} (h\nu - E_G)$$

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_v}$$

Sostituendo l'espressione di k^2 all'interno dell'equazione $E_2 - E_1$ si ottiene:

$$E_2 = E_c + \frac{m_r}{m_c} (h\nu - E_G)$$

$$E_2 = E_c - \frac{m_r}{m_v} (h\nu - E_G) = E_2 - h\nu$$

2.3 Ricombinazione Bimolecolare

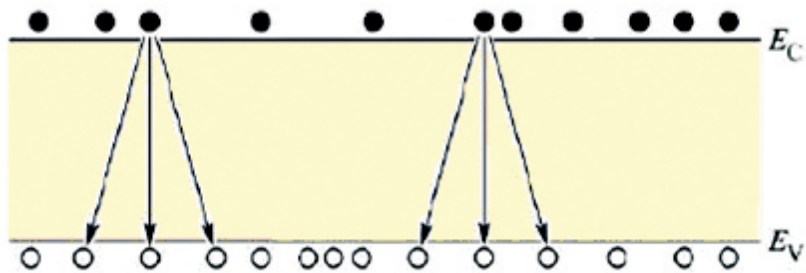


Figura 2.7 Processo di ricombinazione bimolecolare tra elettroni e lacune

Si è detto che all'interno di un semiconduttore possono avvenire vari processi di generazione e ricombinazione di coppie elettrone/lacuna tra la banda di conduzione e quella di valenza del materiale. Per quanto riguarda la ricombinazione in semiconduttori a gap diretto, questa può avvenire in maniera radiativa o meno. Si descriveranno in seguito i vari tipi di ricombinazione non radiativa dato che quella radiativa è già stata trattata nei paragrafi precedenti e verrà analizzata nel caso di un LED nei prossimi capitoli.

Dato che il processo coinvolge sia elettroni in banda di valenza che lacune in banda di conduzione, il tasso di ricombinazione si può esprimere come:

$$R = r_r np$$

Il *coefficiente di ricombinazione bimolecolare* r_r dipende dalle caratteristiche del materiale, inclusa la presenza di difetti, temperatura del materiale e in parte dal livello di drogaggio. Se si analizza la concentrazione di elettroni e lacune all'equilibrio termodinamico (n_0 e p_0) è possibile dedurre che tante coppie elettrone/lacuna si ricombinano quante ne vengono generate in modo che i due processi, uno l'inverso dell'altro, si compensino a vicenda.

Si può quindi affermare che, in condizioni stazionarie, il tasso di generazione G_0 è uguale a quello di ricombinazione R_0 .

Ipotizzando di iniettare portatori tramite una corrente elettrica oppure un fascio di fotoni (condizioni di non equilibrio termodinamico) con un certo tasso R , si viene a creare

all'interno del materiale un eccesso di portatori in banda di conduzione e valenza $\Delta n = \Delta p$ che va ad incrementare la concentrazione di elettroni e lacune presenti all'equilibrio

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

Sapendo che:

$$R_0 + R = G_0 + R = rnp$$

si ottiene:

$$R = r(np - n_0p_0) = r(n_0\Delta n + p_0\Delta n + \Delta n^2) = r\Delta n(n_0 + p_0 + \Delta n) = \frac{\Delta n}{\tau}$$

Con
$$\tau = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta n]} \cong \frac{1}{r(n_0 + p_0)}$$
 in condizioni di bassa iniezione.

Il parametro τ è possibile vederlo come la costante di tempo del processo di ricombinazione tra elettroni e lacune in presenza di eccesso di portatori.

In assenza di campo elettrico all'interno del semiconduttore, l'equazione di continuità che descrive la variazione dell'eccesso di elettroni (lo stesso discorso vale per l'eccesso di lacune) nel tempo in funzione del processo di generazione e ricombinazione dei portatori iniettati diventa:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = R - \frac{\Delta n}{\tau}$$

Una volta che all'istante 0 t viene spento il pompaggio R , elettroni e lacune in eccesso si ricombinano secondo una legge esponenziale del tipo:

$$\Delta n(t) = \Delta n(t_0) \exp\left[\frac{-(t - t_0)}{\tau}\right]$$

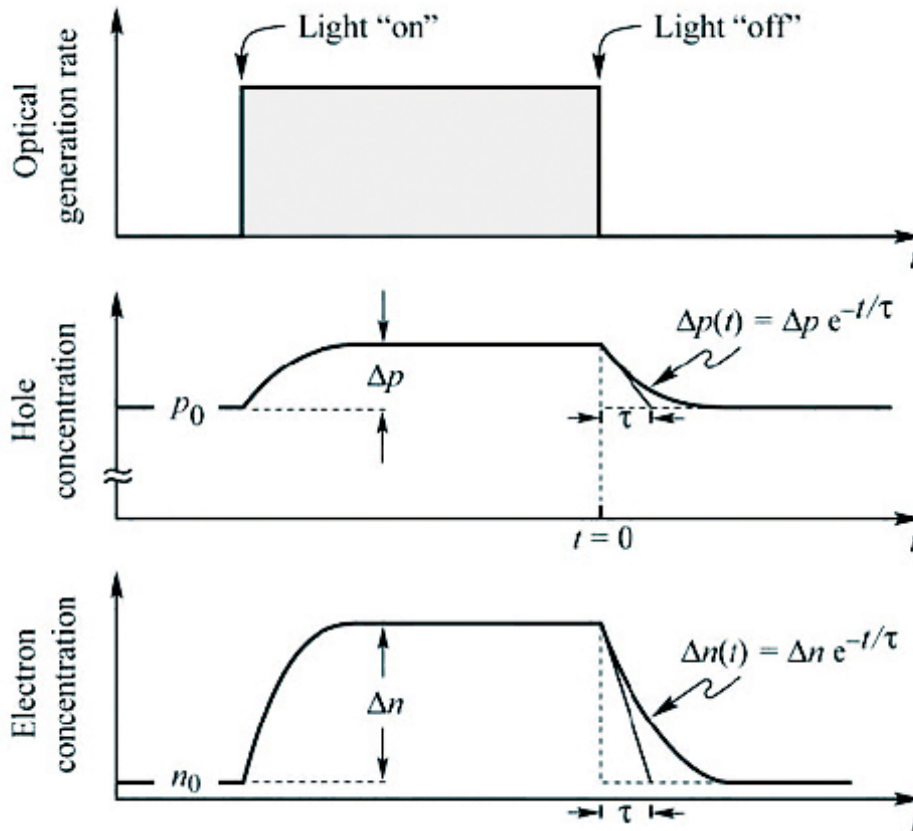


Figura 2.8 Risposta a gradino dell'eccesso di lacune ed elettroni in funzione del tempo

Tale equazione, in condizioni stazionarie $\left(\frac{d(\Delta n)}{dt} = 0\right)$ diventa:

$$R = \frac{\Delta n}{\tau}$$

La trattazione effettuata fino a questo punto presuppone di essere in condizioni di bassa iniezione di portatori. Nel caso di alta iniezione invece l'equazione di continuità diviene:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - R = -r\Delta n^2$$

Risolvendo tale equazione mediante il metodo della separazione delle variabili si ottiene che per un tempo $t > t_0$:

$$\Delta n(t) = \frac{1}{rt + \Delta n_0^{-1}}$$

Tale decadimento è descritto da una costante di tempo:

$$\tau = -\frac{\Delta n(t)}{\frac{d(\Delta n)}{dt}} \Rightarrow \tau = t + \frac{1}{r\Delta n_0}$$

E' quindi possibile notare che, mentre in condizioni di bassa iniezione la costante di tempo dipende dalla concentrazione di portatori maggioritari all'equilibrio, nel caso ad alta iniezione la dinamica del processo di ricombinazione è determinata dall'eccesso di cariche iniettate al tempo t_0 .

Il tutto può essere riassunto graficamente dalla *Figura 2.9*.

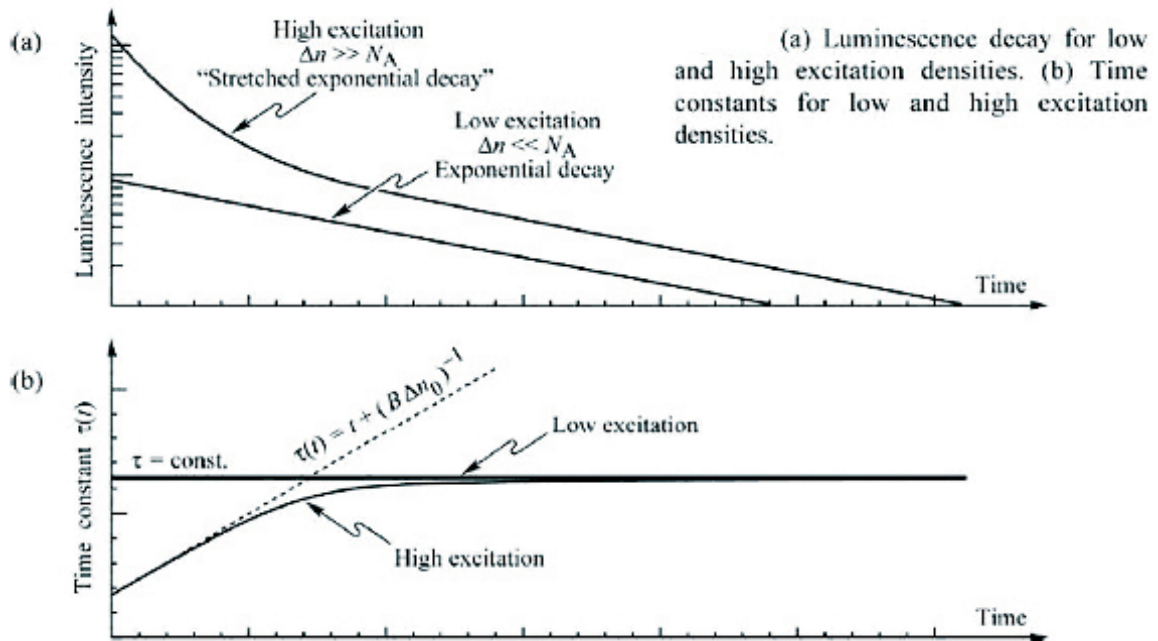


Figura 2.9 a) Decadimento della luminescenza in alta e bassa eccitazione; b) Costante di tempo in bassa e alta eccitazione

2.4 Ricombinazioni non radiative

Si è detto che all'interno di un semiconduttore le cariche in eccesso si possono ricombinare in diversi modi radiativi e non. Per applicazioni optoelettroniche come LED, laser, fotosensori ecc. le prestazioni dipendono fortemente dalla qualità del processo di fabbricazione delle regioni attive di tali componenti. Questo perché i semiconduttori presentano una serie di difetti reticolari, dislocazioni e non idealità in grado di intrappolare i portatori e incrementare il processo di ricombinazione senza emissione di radiazione. Non è scopo di questo lavoro entrare nel dettaglio di questi aspetti. Ciò nonostante è possibile

darne una spiegazione generale in modo da capire come agiscono e in che modo calano le prestazioni del dispositivo.

I principali processi di ricombinazione non radiativa sono:

- *Ricombinazione SHR* ;
- *Ricombinazione superficiale* ;
- *Ricombinazione Auger* ;

2.4.1 Ricombinazione SHR (Shockley Read Hall)

Si è detto che durante la fase di crescita epitassiale dei semiconduttori, vengono introdotti nel reticolo cristallino una serie di difetti. Principalmente questi ultimi si dividono in tre categorie: *difetti di punto*, *di linea* e *di superficie*.

I Difetti di punto: Essi interessano solo pochi siti reticolari. Se il reticolo cristallino è costituito da una sola specie di atomi o di molecole si può avere la mancanza di una particella in una posizione reticolare ben determinata: tale difetto è chiamato *lacuna* o *vacanza*.

Altro tipo di difetto di punto si presenta nel caso in cui un atomo anziché essere posizionato nel reticolo cristallino si trova in posizioni intermedie tra vari atomi (*autointerstiziale*).

In altri casi è possibile che alcune impurità siano presenti all' interno del materiale sostituendo alcuni atomi del reticolo (*impurezze sostituzionali*) mentre altre volte si possono trovare inserite tra le cavità (*impurezze interstiziali*).

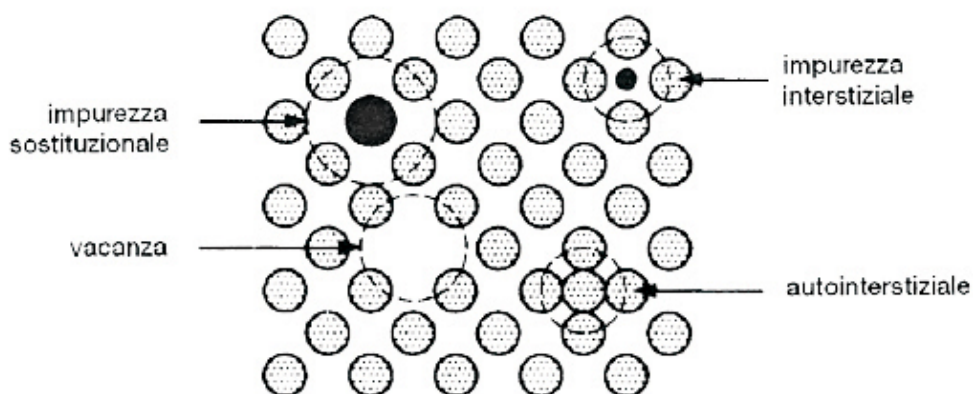


Figura 2.10 Difetti di punto in un solido cristallino semplice

2 Difetti di linea (o dislocazioni) : sono dovuti ad un' irregolare disposizione dei piani reticolari. Ne esistono di diversi tipi. I principali sono i *difetti a cuneo* e i *difetti a vite* in un reticolo cubico rappresentato in *Figura 2.10* .

Questo tipo di difetto si forma con facilità sia durante il processo di cristallizzazione che di lavorazione.

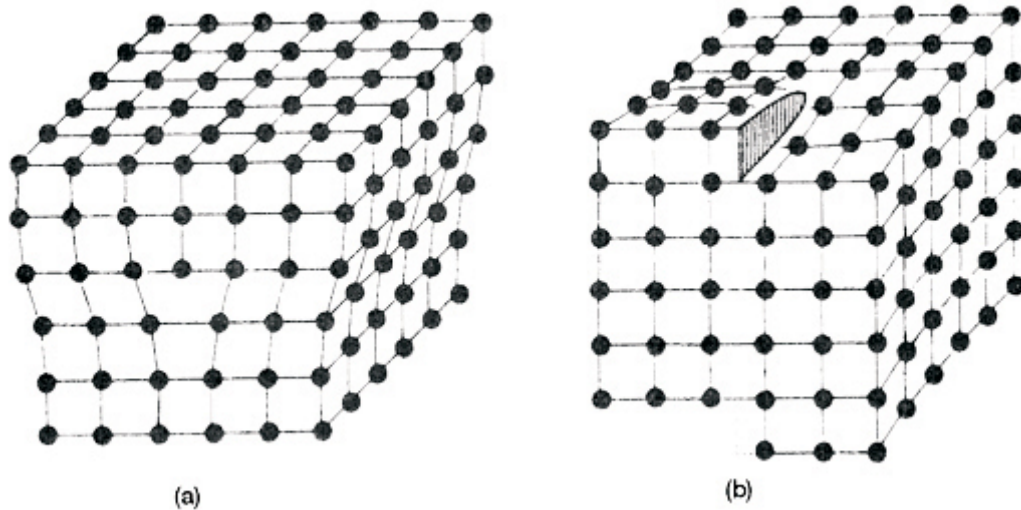


Figura 2.11 Due tipi di difetti di linea in un reticolo cristallino: (a) Dislocazione a Cuneo; (b) Dislocazione a vite

3 Difetti di Superficie : sono quelli che si riferiscono alle zone di transizione tra due cristalli adiacenti orientati in modo diverso. In questo caso i piani reticolari dei cristalli che sono a contatto hanno un' orientazione irregolare e un diverso passo reticolare che determina tensioni e instabilità strutturali.

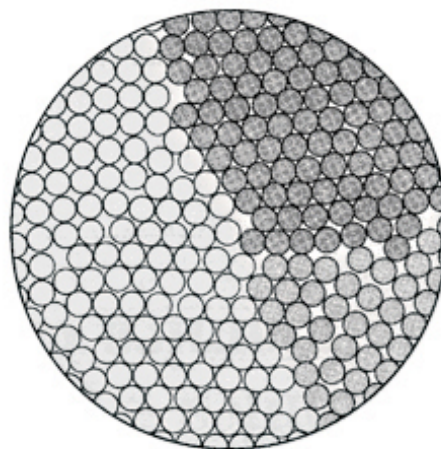


Figura 2.12 Zone di disordine tra cristalliti diversi

A livello di diagrammi a bande, i difetti introducono all'interno del gap energetico degli stati (detti *profondi*) energetici in grado di catturare elettroni (o lacune) facendoli ricombinare in modo non radiativo e con emissione di fononi.

Per descrivere questo tipo di processo, tre ricercatori della Bell Laboratory (Shockley Read Hall), svilupparono una teoria considerando i difetti come degli stati trappola, ciascuno con la propria capacità di catturare e/o cedere cariche elettriche.

Il tutto è descritto dalla funzione U definita come la differenza tra il processo di ricombinazione R e quello di generazione G . Il tutto è stato approssimato eguagliando la sezione di cattura del trappole σ_p e σ_n :

$$R - G = U = \frac{(p_0 + n_0)n'}{[p_0 + n_0 + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)]\tau_0} = \frac{n'}{\tau_n}$$

In cui i parametri:

- n' è l'eccesso di elettroni in banda di conduzione
- n_0 e p_0 sono le concentrazioni di elettroni e lacune all'equilibrio termodinamico
- E_t livello energetico dei difetti
- E_i livello di Fermi intrinseco
- $\tau_n = \frac{n_0 + p_0 + 2n_i \left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)}{n_0 + p_0} \tau_0$ tempo di vita medio dell'elettrone in banda di conduzione

2.4.2 Ricombinazione superficiale

Le proprietà di un semiconduttore (in particolare il diagramma a bande), dipendono fortemente dalla struttura periodica del reticolo cristallino. In prossimità della superficie questa periodicità viene a mancare provocando così cambiamenti significativi riguardo le caratteristiche optoelettroniche del materiale. Vi è inoltre la presenza di un buon numero di difetti che introducono centri di ricombinazione SHR in grado di catturare le cariche e farle ricombinare in maniera non radiativa.

Non volendo entrare nel dettaglio di questi complessi processi di ricombinazione, ci si limita solamente a darne una descrizione di tipo grafico riportando allo stesso tempo qualche risultato ricavato a partire dall'equazione di continuità:

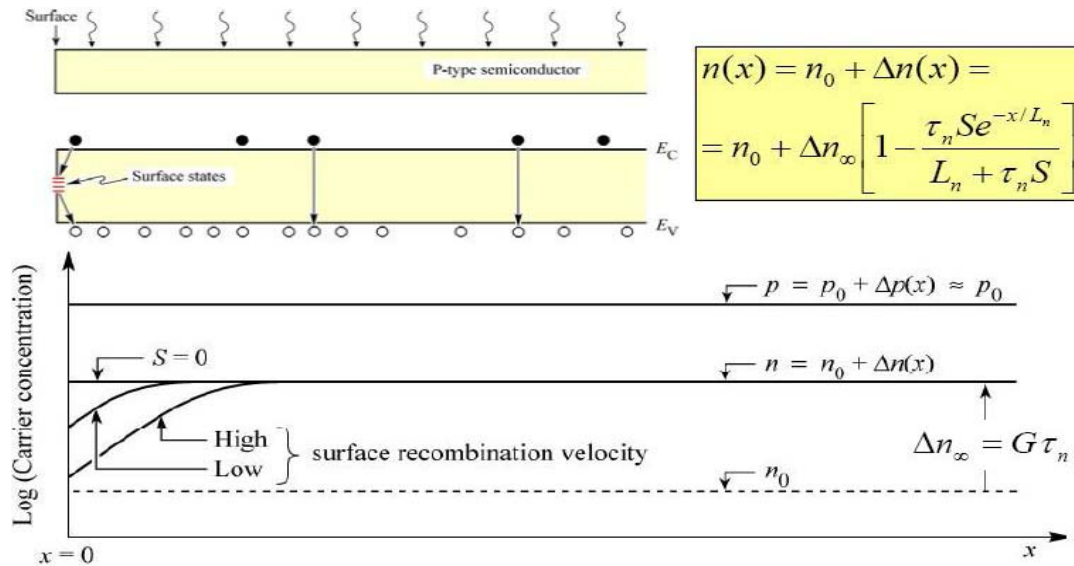


Figura 2.13 Processo di ricombinazione superficiale e concentrazione portatori minoritari alla superficie

I grafici e i risultati riportati in Figura si riferiscono ad un processo di ricombinazione superficiale di un semiconduttore di tipo P dopo essere stato sottoposto ad illuminazione esterna.

2.4.3 Ricombinazione Auger

A differenza dei due processi precedenti, la ricombinazione Auger dipende fortemente dalla concentrazione di elettroni e/o lacune. Infatti, quando un portatore si ricombina, questo cede la sua energia ad un altro dello stesso tipo il quale subisce una transizione intrabanda.

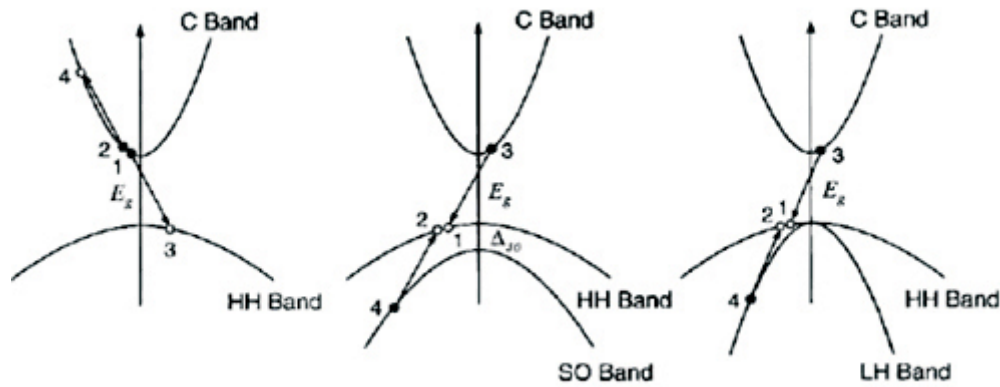


Figura 2.14 Tre tipi di ricombinazione Auger

La Figura 2.14 mostra come un elettrone (oppure una lacuna) ricombinandosi, cede energia ad un altro elettrone (o lacuna) portandolo ad un livello di energia superiore (o inferiore) e successivamente ritornando al limite inferiore della banda per termalizzazione. Il processo viene descritto dalle seguenti equazioni:

$$R_{Auger} = C_p np^2$$

$$R_{Auger} = C_n pn^2$$

Mentre il primo è più probabile in materiali di tipo *P*, il secondo si verifica con maggior probabilità in materiali di tipo *N*.

In condizioni di alta iniezione ($n = p$), il tasso di ricombinazione diventa:

$$R_{Auger} = (C_n + C_p)n^3 = Cn^3$$

In cui C , C_n e C_p sono i coefficienti di Auger.

2.5 Ricombinazione radiativi

Si è parlato nei precedenti capitoli dei due processi di emissione radiativa (spontanea e stimolata) dovuti alla ricombinazione elettrone/lacuna. Nel caso di nostro interesse non verrà trattata l'emissione stimolata dato che viene solitamente sfruttata nei Laser. Questo tipo di dispositivi permette infatti di ottenere una serie di modi risonanti all'interno di una

cavità in cui vi è un mezzo attivo caratterizzato da un inversione di popolazione, in grado di emettere fasci di luce coerente.

Nei LED invece, non è necessario avere inversione di popolazione per emettere la radiazione. Per questo motivo questi dispositivi sfruttano il processo di emissione spontanea di luce incoerente presentando una certa larghezza spettrale.

Prima di analizzare la struttura fisica di un LED è necessario descrivere in maniera dettagliata il processo di emissione spontanea in un semiconduttore a gap diretto.

Per poter determinare la densità di probabilità che un fotone di energia $h\nu$ venga emesso secondo questo tipo di processo all'interno di un semiconduttore a Bandgap diretto si devono determinare tre fattori principali:

- *Densità congiunta degli stati*
- *Probabilità di occupazione degli stati*
- *Probabilità di transizione*

2.5.1 Densità congiunta degli stati

La densità congiunta degli stati $\rho(\nu)$ include sia la densità degli stati in banda di conduzione che in banda di valenza. Tale espressione in funzione dell'energia può essere scritta come:

$$\rho_c(E) = \frac{\sqrt{2}m_c^{3/2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E - E_c}$$

Sapendo che:

$$\rho(\nu) = \frac{dE_2}{d\nu} \rho_c(E_2)$$

Si ottiene:

$$\rho(\nu) = \frac{\hbar m_r}{m_c} \rho_c(E_2) \Leftrightarrow \rho(\nu) = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi\hbar^2} \sqrt{h\nu - E_g} \quad h\nu \geq E_g$$

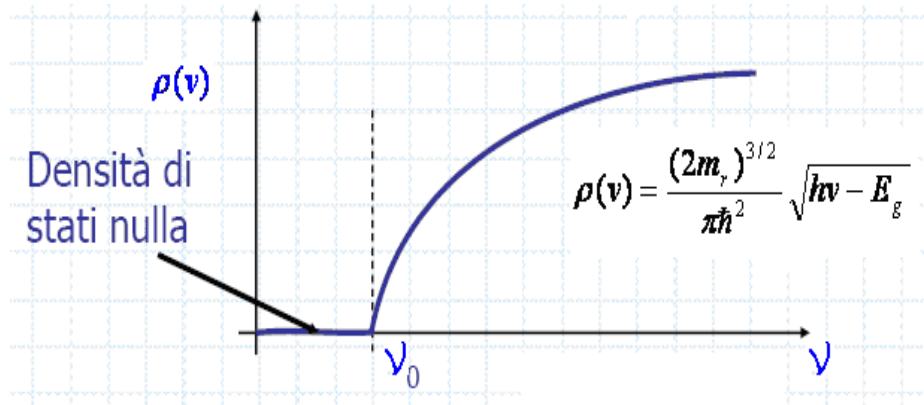


Figura 2.15 densità congiunta degli stati in banda di conduzione e valenza

2.5.2 Probabilità di occupazione degli stati

Le condizioni di assorbimento e di emissione di un fotone in un sistema a 2 livelli energetici E_2 e E_1 si possono riassumere nel seguente modo:

- *Condizioni di Emissione:* Probabilità che lo stato della banda di conduzione E_2 sia pieno (contiene un elettrone) e lo stato E_1 vuoto (contiene una lacuna)
- *Condizioni di Assorbimento:* Probabilità che lo stato della banda di conduzione E_2 sia vuoto mentre lo stato E_1 sia occupato da elettroni.
-

Per poter descrivere la probabilità che uno stato energetico sia occupato da un elettrone, in meccanica quantistica si utilizza la funzione distribuzione di Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

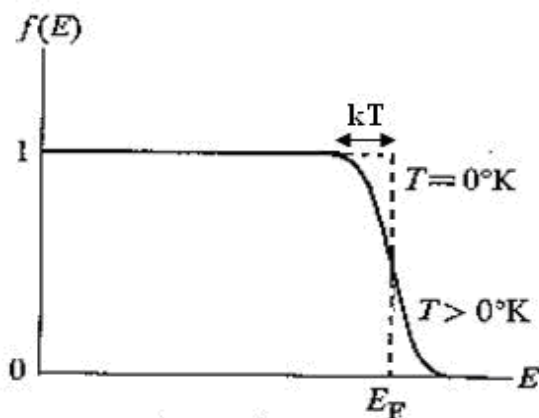


Figura 2.16 Grafico funzione di fermi Dirac e approssimazione boltzman

Questa funzione calcolata al livello energetico E_f (detto “livello di Fermi”) è pari a 0.5 e indica che a tale livello si ha il 50% di probabilità che lo stato sia occupato. Questo tipo di densità di probabilità, per bassi livelli di iniezione in cui $E - E_f \gg kT$, può essere approssimata con la funzione distribuzione di Boltzman:

$$f(E) = \exp\left[-\frac{(E - E_f)}{kT}\right]$$

Per determinare quindi le probabilità di occupazione degli stati E_2 e E_1 sopra la banda di valenza e sotto quella di conduzione, si utilizzano le funzioni $f_c(E)$ e $f_v(E)$ associate ognuna ad un livello di fermi (E_{fc} e E_{fv}) in condizioni di non equilibrio.

In questo modo la densità di probabilità di emissione $f_e(E)$ per un fotone di energia $h\nu$ è data dal prodotto della probabilità che gli stati superiori siano pieni per la probabilità che gli stati inferiori siano vuoti, cioè:

$$f_e(\nu) = f_c(E_2)[1 - f_v(E_1)]$$

Viceversa avviene per la densità di probabilità di assorbimento in cui:

$$f_a(\nu) = [1 - f_c(E_2)]f_v(E_1)$$

2.5.3 Probabilità di Transizione

Una volta soddisfatte le condizioni di occupazione per emissione e assorbimento, non è detto che avvenga la transizione tra i due livelli. Questo processo è regolato da leggi probabilistiche di interazione tra fotoni e sistemi atomici come visto in precedenza, in cui la probabilità di emissione o assorbimento è determinata principalmente dalla sezione d’urto che a sua volta dipende dalla frequenza.

Per adattare l’analisi fatta per un sistema a 2 livelli al caso dei semiconduttori, è possibile ridefinire la sezione d’urto nel seguente modo:

$$P_{sp}(\nu)d\nu = \frac{1}{\tau_r} g(\nu)d\nu$$

Tipicamente per un semiconduttore la funzione profilo è di un mezzo omogeneo e di tipo Lorentziana con larghezza spettrale:

$$\Delta\nu \cong \frac{1}{\pi T_2}$$

In cui T_2 rappresenta il tempo di collisione tra elettroni e fononi ed è dell'ordine di qualche picosecondo.

Tenendo conto delle considerazioni appena effettuate, per ogni coppia di livelli E_1 e E_2 della banda di conduzione e valenza del semiconduttore, si avrà una certa funzione profilo centrata su $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ denominata $g_{\nu_0}(\nu)$.

Il calcolo del tasso di emissione spontanea totale viene effettuato integrando rispetto a ν_0 le densità di probabilità di transizione tra due livelli E_1 e E_2 :

$$r_{sp}(\nu) = \int \left[\left(\frac{1}{\tau_r} \right) g_{\nu_0}(\nu) \right] f_e(\nu_0) \rho(\nu_0) d\nu_0$$

Approssimando $g_{\nu_0}(\nu) \cong \delta(\nu - \nu_0)$ per la sua larghezza molto ristretta rispetto alle altre funzioni all'interno dell'integrale, si ottiene:

$$r_{sp}(\nu) = \frac{1}{\tau_r} \rho(\nu) f_e(\nu)$$

In condizioni di non equilibrio termodinamico, un semiconduttore presenta uno sdoppiamento dei livelli di fermi. La funzione $f_e(\nu)$ può quindi essere scritta come:

$$f_e(\nu) = f(E_2)[1 - f(E_1)]$$

In cui:

$$f(E_2) \approx \exp \left[- \frac{(E_2 - E_{fc})}{kT} \right]$$

$$1 - f(E_1) \approx \exp \left[- \frac{(E_{fv} - E_1)}{kT} \right]$$

Sotto le ipotesi di bassa iniezione ($E_{fc} \cong E_{fv}$) la funzione:

$$f_e(\nu) \cong \exp \left(- \frac{h\nu}{kT} \right)$$

Riscrivendo il tasso di emissione spontanea sostituendo la funzione appena ricavata, è possibile ottenere:

$$r_{sp} \cong D_0 \sqrt{h\nu - E_g} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right)$$

Con $D_0 = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi h^2 \tau_r} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$, parametro che cresce con la temperatura.

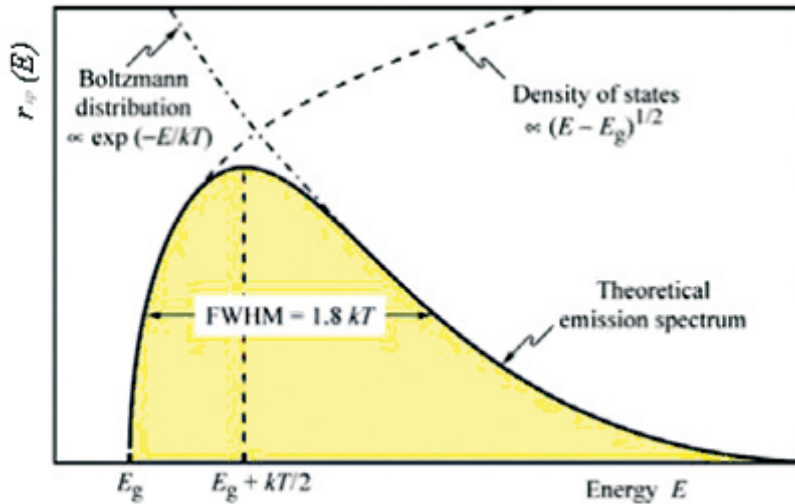


Figura 2.17 tasso di emissione spontanea in funzione dell'energia della radiazione emessa

Il grafico di *Figura 2.17* mette in risalto il tasso di emissione spontanea di un semiconduttore in funzione dell'energia (legata direttamente alla frequenza). E' possibile notare come a bassi valori di energia sia dominante il termine che descrive la densità degli stati mentre ad energie maggiori inizia a decadere grazie alla funzione distribuzione di Fermi.

Il Tasso di emissione spontanea può quindi essere incrementato aumentando $f_e(v)$ e quindi iniettando un numero elevato di portatori nella regione attiva.

Una volta ricavato il tasso di ricombinazione spontanea, integrando questa funzione rispetto alla frequenza, è possibile ottenere il flusso di fotoni emesso dal dispositivo:

$$\Phi = V \int_0^{\infty} r_{sp} dv = \frac{V(m_r)^{3/2}}{2\pi^2 h^3 \tau_r} (kT)^{3/2} \exp\left(\frac{E_{fc} - E_{fv} - E_g}{kT}\right)$$

La formula conferma il fatto che incrementando il rate di pompaggio R , i livelli di Fermi si allontanano tra loro e il flusso Φ aumenta esponenzialmente grazie all'aumento della funzione $f_e(v)$.

3. Light Emitting Diode (LED)

Il dispositivo a semiconduttore in grado di sfruttare il processo di emissione spontanea dovuto alla ricombinazione radiativa di elettroni e lacune è il Diodo ad Emissione di Luce (Light Emitting Diode). Esistono varie tipologie di LED distinte in base al tipo di applicazione in cui vengono utilizzati. Per dare una classificazione generale, i LED si possono dividere in *dispositivi di segnale* e *dispositivi di potenza*. I primi vengono utilizzati come segnalatori o trasmettitori di dati in fibra ottica e devono soddisfare specifiche come lunghezza d'onda, velocità di accensione ecc.

I LED di potenza vengono invece utilizzati soprattutto in questi ultimi tempi per l'illuminazione di luoghi pubblici (lampade a LED per uso civile), nei fanali delle automobili oppure nella retroilluminazione dei display in varie applicazioni (signage, ATM, etc.) e necessitano di soddisfare specifiche di efficienza, affidabilità e durata (obiettivo di questa tesi).

Per capire quali componenti si trovano all'interno di questi dispositivi, in *Figura 3.1* è rappresentato un LED di potenza.

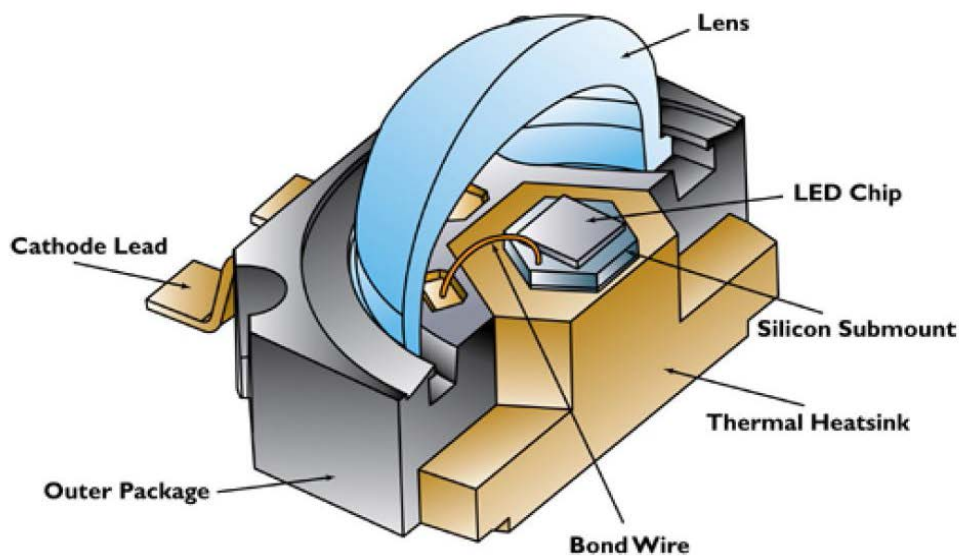


Figura 3.1 Struttura di un LED di potenza

E' possibile notare le tre parti principali come ad esempio la zona attiva, il package composto dall'ottica (lente) e il thermal pad per la dissipazione termica.

In seguito verrà analizzato il principio di funzionamento di un LED, focalizzando l'attenzione sulla struttura della regione attiva e su come questa influisce sull'efficienza del dispositivo.

3.1 Principio di funzionamento della regione attiva

Si è detto che un LED (Light Emitting Diode) è un dispositivo a semiconduttore in grado di sfruttare il processo di ricombinazione tra elettroni e lacune emettendo fotoni in modo spontaneo e incoerente. La struttura più semplice per poter realizzare un dispositivo di questo tipo è la giunzione p-n. Gli elettroni iniettati nella regione P del diodo si ricombinano con l'alta concentrazione di lacune presenti emettendo di conseguenza fotoni (analisi del processo ideale).

Questo tipo di struttura è però poco efficiente a causa della scarsa concentrazione della carica per la mancanza di un confinamento nella regione attiva. Infatti per un omogiunzione (vedi Fig 3.2), i portatori minoritari che attraversano la regione di carica spaziale (RCS), si ricombinano lungo una distanza pari alla lunghezza di diffusione delle lacune in zona N e degli elettroni in zona P (dei portatori minoritari) che si aggira intorno a qualche μm :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad e \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

In cui:

- D rappresenta il coefficiente di diffusione dei minoritari
- τ è il tempo di vita dei portatori minoritari;

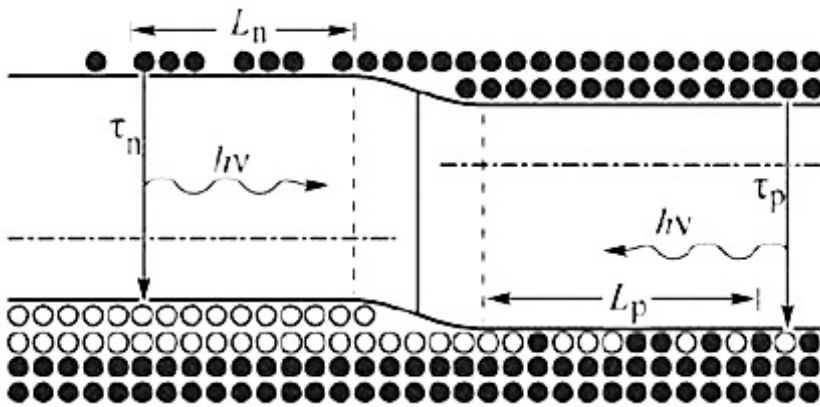


Figura 3.2 Diagramma a Bande di un omogiunzione in polarizzazione diretta

Per migliorare questo aspetto, vengono utilizzate delle eterostrutture, cioè giunzioni tra diversi tipi di materiali semiconduttori (con Energy gap, costante reticolare e altre caratteristiche diverse tra loro) in modo da creare delle buche di potenziale dove poter concentrare una buona quantità di carica e aumentare la probabilità e l'efficienza del processo di emissione stimolata.

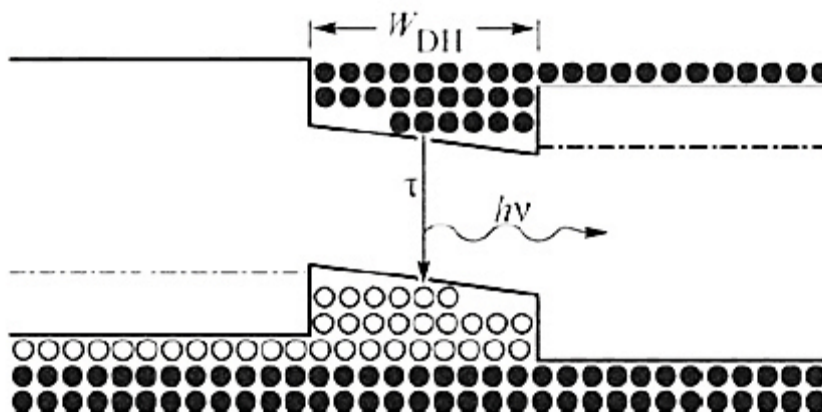


Figura 3.3 Diagramma a Bande di un'eterostruttura

Come possibile osservare da *Figura 3.3*, unendo materiali con affinità elettroniche e bandgap diversi vengono a crearsi delle discontinuità energetiche nel diagramma a bande in grado di guidare i portatori iniettati all'interno delle buche (regioni attive del dispositivo) dove si dovranno ricombinare.

Una giunzione tra materiali diversi comporta però l'introduzione di ulteriori difetti a causa dei diversi passi dei reticoli cristallini e quindi un incremento della ricombinazione non radiativa.

Per limitare questo problema, i vari semiconduttori devono avere passi reticolari abbastanza simili in modo da “raccordare” al meglio le loro strutture cristalline.

Questi tipi di giunzioni vengono effettuate, come si parlerà in seguito, tramite l'utilizzo di alcune tecniche epitassiali come MBE (Molecular Beam Epitaxy), MOCVD (Metal-Organic

Chemical Vapor Deposition) e MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) con relative varianti.

Un altro vantaggio nell'utilizzo di eterostrutture tra materiali con gap diverso, sta nel fatto che i fotoni emessi dalle regioni attive (quelle con E_g più piccolo) non vengono assorbiti dagli altri materiali presenti nella struttura del dispositivo aventi *band gap* maggiori.

3.2 Efficienza di un LED

Per descrivere qualitativamente il comportamento di un LED, vengono introdotte varie grandezze tra le quali le più importanti sono l'efficienza quantica e l'efficienza elettrica.

Parlando di efficienza quantica, questa si divide in due tipi:

- *Efficienza quantica interna*
- *Efficienza quantica di estrazione*

Per efficienza quantica interna si intende il rapporto tra il numero di fotoni emessi dalla regione attiva al secondo rispetto al numero di elettroni iniettati nel LED al secondo:

$$\eta_{II} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e} = \frac{\tau_r}{\tau_{nr} + \tau_r}$$

Come si può capire dalla definizione, l'efficienza quantica interna dipende da quanti elettroni si ricombinano in maniera radiativa rispetto al numero totale di elettroni che si ricombinano. Il suo valore è quindi più elevato tanto più calano i processi di ricombinazione non radiativa Auger, SHR che, come già accennato in precedenza, sono proporzionali al numero di difetti e imperfezioni introdotti nel reticolo cristallino durante il processo di crescita del dispositivo attivo.

La regione attiva di un LED però, viene realizzata con diversi strati di semiconduttori e con

diverse geometrie inserita a sua volta su package con una specifica tipologia di lenti in grado di ottimizzare l'estrazione di fotoni. Esiste quindi un altro parametro che dà un'indicazione di quanti fotoni vengono emessi dal dispositivo al secondo rispetto al numero di fotoni generati al secondo dalla regione attiva. Questo parametro è definito come *efficienza di estrazione*:

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P / (h\nu)}{P_{\text{int}} / (h\nu)}$$

Una volta generato nella regione attiva, un fotone, nel suo percorso verso l'esterno, può incontrare vari ostacoli che non gli permettono di raggiungere la lente e quindi di essere emesso.

Questo fenomeno, come rappresentato in *Figura 3.4*, dipende principalmente dalla direzione con cui viene emessa la radiazione.

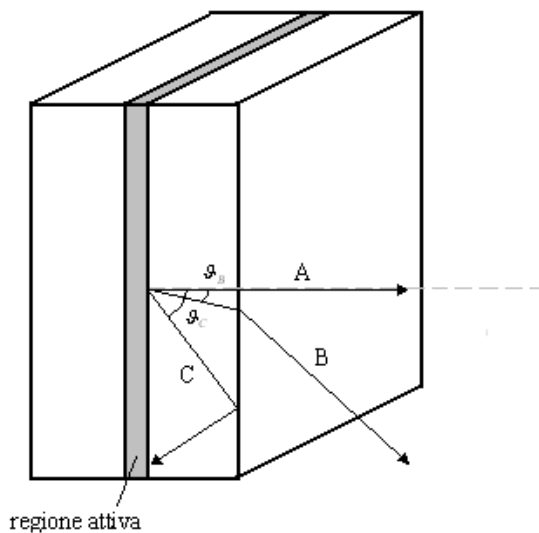


Figura 3.4 mezzo attivo di un LED a struttura piana

Se si considera un flusso di fotoni che viene emesso da un mezzo planare in una delle tre possibili direzioni A, B o C di *Figura 3.4*, durante il suo percorso, può:

- Essere attenuato viaggiando in direzione A di un fattore:

$$\eta_I = \exp(-\alpha l_1)$$

Dove α è il coefficiente di assorbimento del materiale e l_1 è la distanza percorsa dalla giunzione. Seppur viaggiando in direzione A, il flusso di fotoni viene trasmesso in parte all'interfaccia semiconduttore-aria a causa della differenza di indici di rifrazione che per la legge di Fresnel introduce un coefficiente di riflessione pari a:

$$\eta_2 = 1 - \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

Con n coefficiente di riflessione del semiconduttore;

- Se il flusso viaggia lungo la direzione B, una porzione maggiore rispetto al caso A viene riflessa;
- Se il flusso viaggia in direzione C con angolo $\vartheta > \vartheta_c = \sin^{-1}(1/n)$, per la legge di Snell viene completamente riflesso;

Per cercare di estrarre dal dispositivo il maggior flusso di fotoni possibile eliminando parte dell'effetto delle riflessioni interne dovute alle differenze di indici di rifrazioni o angoli di incidenza, si è soliti cercare varie strutture geometriche della regione attiva, come ad esempio:

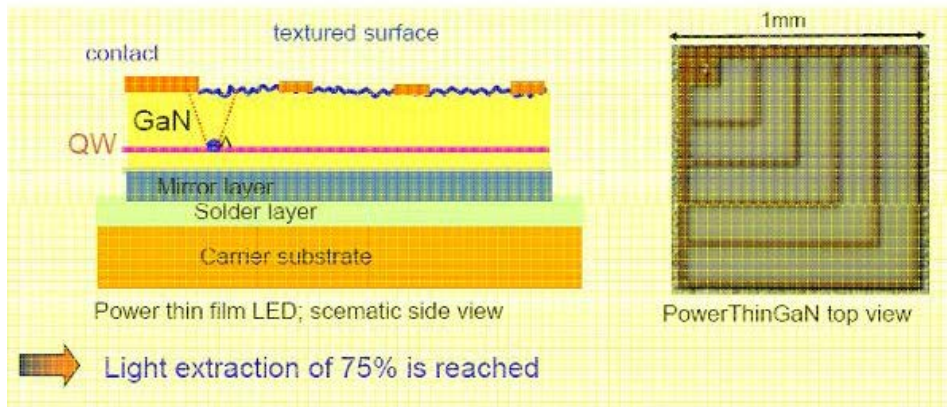
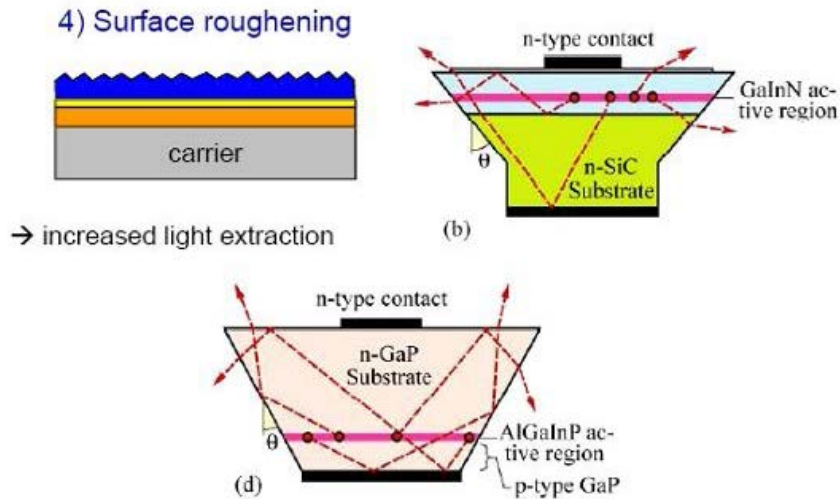


Figura 3.5 Alcune strutture geometriche di mezzi attivi

La Figura 3.5 rappresenta solo alcuni tipi di soluzione per migliorare l'estrazione di fotoni dato che, essendo sempre oggetto di ricerca, ogni azienda adotta un suo metodo personale e segreto per risolvere questo tipo di problema.

Conoscendo sia l'efficienza di estrazione che l'efficienza interna è possibile definire l'efficienza esterna come il rapporto tra il numero di fotoni emessi al secondo da dispositivo rispetto al numero di cariche iniettate:

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \eta_{extraction} = \frac{P/(h\nu)}{I/e}$$

Infine, per caratterizzare le prestazioni in termini di rendimento, viene introdotto un altro parametro definito *efficienza elettrica*. Questo dà la possibilità di valutare quanta della potenza elettrica introdotta nel dispositivo viene convertita in potenza ottica:

$$\eta_{power} = \frac{P_{ottica}}{P_{elettrica}} = \frac{P_{ottica}}{VI}$$

3.3 Effetti della temperatura sulle caratteristiche optoelettroniche di un LED

Un fattore molto importante in grado di modificare le prestazioni dei dispositivi elettronici, in particolare dei LED, è la temperatura. I principali parametri che possono esserne influenzati sono:

- la mobilità dei portatori
- il valore di Energy-Gap (quindi della lunghezza d'onda emessa)
- l'intensità luminosa cala a causa del calo del coefficiente di ricombinazione radiativa τ_r
- il degrado sia della struttura cristallina del mezzo attivo che delle altre componenti del dispositivo che verrà trattato in maniera più dettagliata nei prossimi capitoli.

All'interno del mezzo attivo la temperatura, causa delle vibrazioni reticolari del dispositivo, può variare il moto dei portatori e quindi la loro mobilità all'interno di un semiconduttore come rappresenta il grafico di *Figura 3.6*

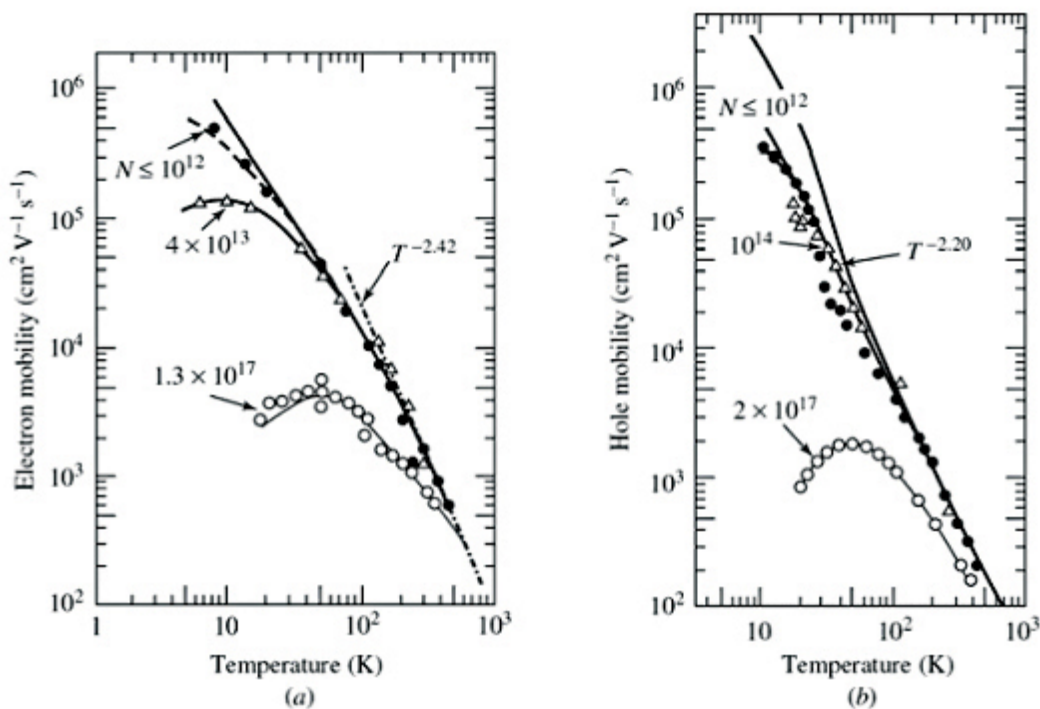


Figura 3.6 Mobilità dei portatori nel silicio

E' possibile notare che in un semiconduttore la mobilità subisce forti variazioni per diversi valori di temperatura. Se si considerano semiconduttori con alti livelli di drogaggio, per basse temperature, l'aumento della stessa riduce lo scattering introdotto dai materiali droganti aumentando la mobilità dei portatori fino ad un certo valore massimo. Per valori di temperatura superiori infatti, inizia a farsi sentire lo scattering introdotto dai moti reticolari comportando un calo di mobilità e quindi un aumento della resistività del materiale.

Ulteriore effetto della temperatura, molto importante in dispositivi optoelettronici, è la variazione dell'Energy Gap del materiale che a sua volta varia il valore della lunghezza d'onda fondamentale emessa:

$$\frac{ch}{E_g} = \lambda_0$$

Il grafico di *Figura 3.7* riporta l'andamento dell'Energy Gap in funzione della temperatura.

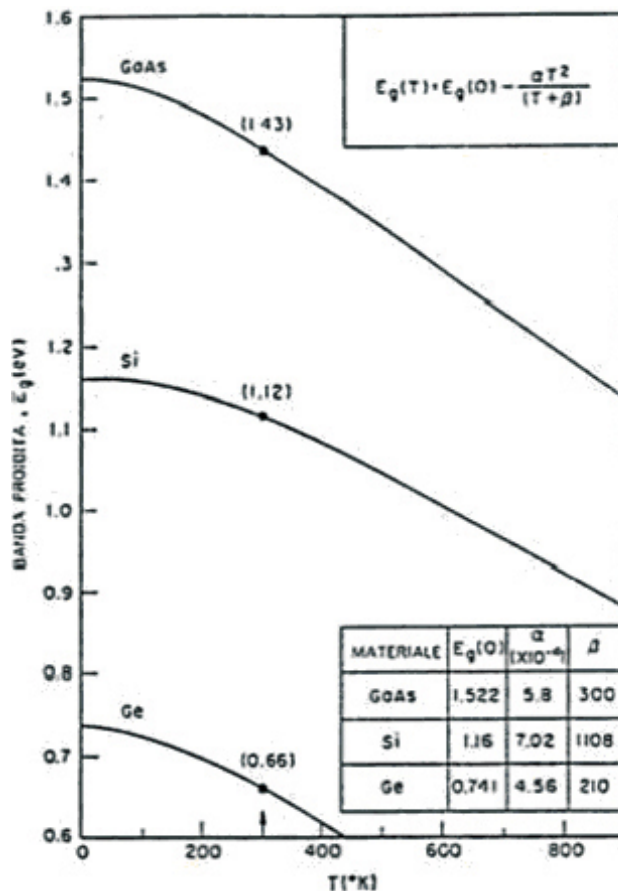


Figura 3.7 Variazione dell'Energy Gap in funzione della temperatura

Com'è possibile notare il valore di Energy Gap in un semiconduttore cala all'aumentare della temperatura secondo la formula:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

In cui i parametri α e β vengono ricavati sperimentalmente.

A titolo di esempio, la tabella di *Figura 3.8* riporta alcuni valori di questi parametri e di Energy Gap e di alcuni semiconduttori:

	Ge	Si	GaAs
$E_g(0)$ [eV]	0.741	1.16	1.522
α [eV/K]	4.56×10^{-4}	7.02×10^{-4}	5.8×10^{-4}
β [K]	210	1108	300

Figura 3.8 Tabella riassuntiva dei parametri dell'Energy Gap del Ge, Si e GaAs

Per un dispositivo optoelettronico come un LED, l'aumento della temperatura comporta un calo della frequenza della radiazione emessa e quindi un aumento della lunghezza d'onda. Questo processo è detto red-shifting. Viceversa un calo di temperatura comporta un calo della lunghezza d'onda (blue-shifting).

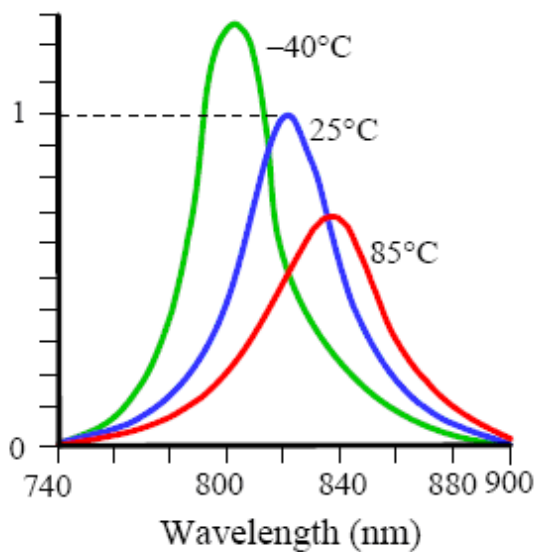


Figura 3.9 Variazione dello spettro di emissione di un LED in funzione della temperatura

Come possibile notare da *Figura 3.9*, all'aumentare della temperatura cala anche l'intensità luminosa. Questo fenomeno avviene per tre principali motivi: il primo perché all'aumentare della temperatura i centri di ricombinazione SHR sono più efficienti (anche i difetti superficiali) incrementando il coefficiente di ricombinazione non radiativa r_{nr} ; secondo motivo perché cala il coefficiente di ricombinazione radiativa (bimolecolare) r_r ; terzo perché cresce la frazione di portatori che attraversa le barriere di potenziale della regione attiva aumentando la "corrente di buio".

Ci sono vari metodi [1] che non verranno trattati in questa tesi per il calcolo del coefficiente di ricombinazione radiativa. Tra questi è possibile citare il modello di Van Roosbroeck- Shockley, di Hall, di Garbuzov ecc. Tutti mettono in risalto la dipendenza di questo parametro dalla temperatura secondo un andamento del tipo $(1/T)^{3/2}$. Questo deriva dal fatto che al variare di T , cambia all'interno del materiale la concentrazione dei portatori.

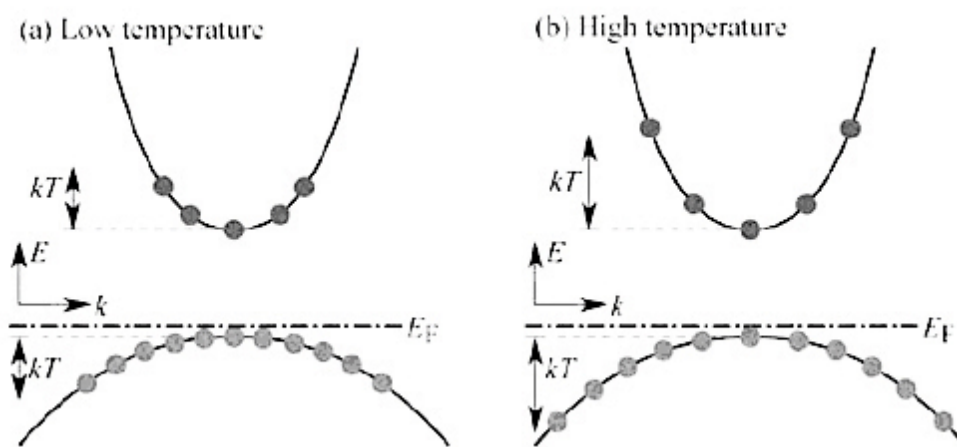


Figura 3.10 Variazione dell'energia e della quantità di moto di elettroni e lacune al variare della temperatura

La *Figura 3.10* dà un'idea della distribuzione energetica dei portatori in funzione del momento k al variare della temperatura. Si nota infatti che per alte temperature sono presenti meno portatori per intervalli del momento k rispetto al caso di basse temperature (notare che le considerazioni appena effettuate valgono per semiconduttori non degeneri).

Un calo del tasso di ricombinazione comporta quindi ad un calo dell'intensità luminosa secondo la regola:

$$I = I_{300K} \exp\left(-\frac{T - 300K}{T_1}\right)$$

In cui $\left|\frac{1}{T_1}\right|$ è la pendenza della retta rappresentante l'intensità luminosa in funzione della temperatura:

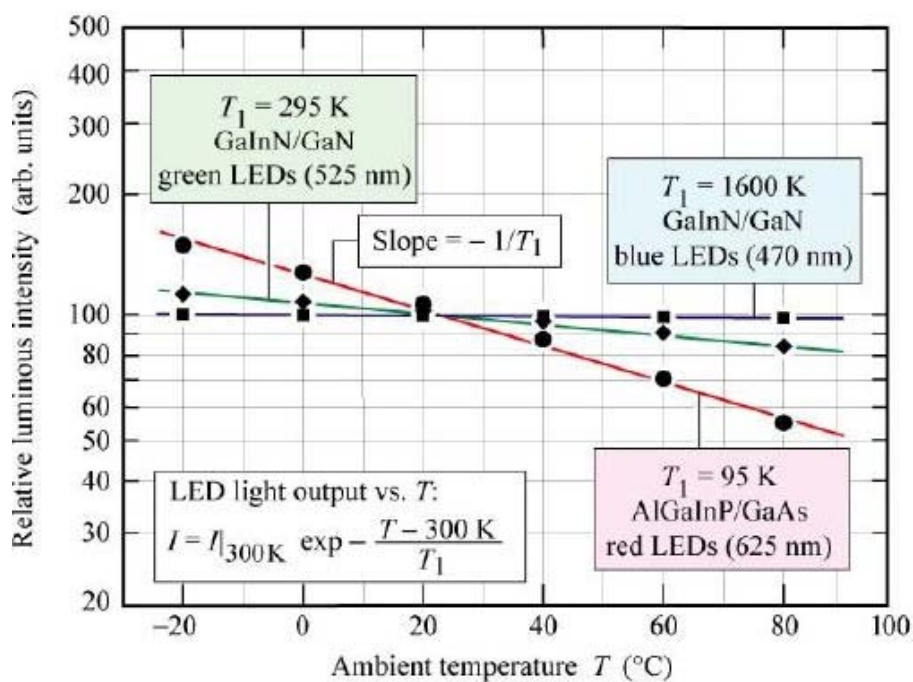


Figura 3.11 Intensità luminosa di LED blu, rossi e verdi in funzione della temperatura

In Figura 3.11 vengono confrontati tre tipi di LED utilizzati nella configurazione RGB. Si può notare che un aumento della temperatura per il LED rosso comporta un calo di intensità maggiore rispetto ad un LED verde e blu. Questo perché il LED rosso, all'interno della sua struttura cristallina, presenta un maggior numero di difetti rispetto agli altri e ad alte temperature i centri di ricombinazione non radiativa, a conferma di quanto è stato detto in precedenza, sono molto più efficaci.

Per alcune applicazioni, la variazione dell'intensità luminosa rispetto alla temperatura è un problema delicato da risolvere. Per rispettare determinate specifiche progettuali si è soliti

aggiungere dell'elettronica di controllo dell'intensità luminosa variando la corrente di alimentazione in modo da rendere quasi indipendente l'intensità dalla temperatura.

3.4 Caratteristica I-V di un LED

Essendo un bipolo, un LED presenta ai suoi capi una caratteristica tensione-corrente molto simile a quella di un diodo. Questo per il fatto che all'interno della regione attiva sono presenti delle giunzioni p-n e tra semiconduttori con diversi Energy Gap.

La legge che descrive la relazione I-V, a differenza di un diodo è del tipo:

$$I = I_S \exp\left(\frac{qV}{\eta_{ideal} kT}\right)$$

In cui il parametro η_{ideal} viene denominato *fattore di idealità* di un diodo. Per un diodo ideale il fattore di idealità è pari a 1 mentre per semiconduttori composti si arriva anche a valori intorno a 7.

A differenza di un semplice diodo, il LED può essere fortemente influenzato da resistenze parassite serie e parallelo. La resistenza serie dipende fortemente dal tipo di contatti ohmici e della mobilità dei portatori nelle regioni neutre. La resistenza parallelo invece, è vista come un percorso degli elettroni da un elettrodo all'altro senza attraversare la giunzione. Questo a causa di danneggiamenti in alcune parti del semiconduttore oppure per la presenza di imperfezioni nelle zone superficiali.

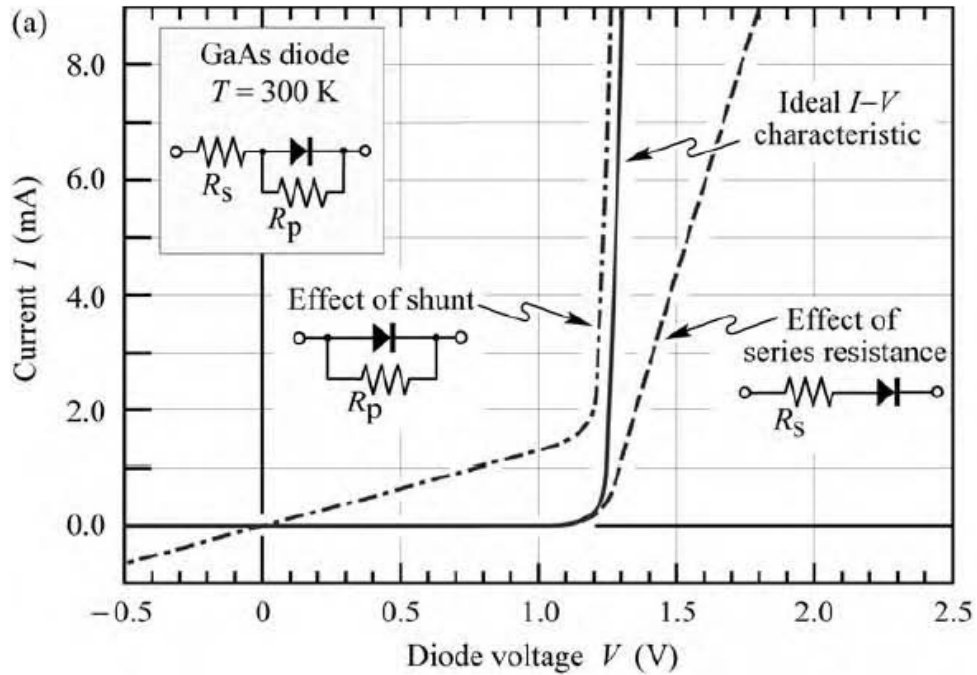


Figura 3.12 Caratteristica I-V di un LED con la presenza di resistenze parassite

La Figura 3.12 mette in risalto l'effetto delle singole resistenze parassite sulla caratteristica di un diodo ideale. L'equazione che lega la tensione con la corrente in questo tipo di dispositivi diviene quindi:

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

Se $R_s \rightarrow 0$ e $R_p \rightarrow \infty$, si ritornerebbe avere l'equazione di Shockley del diodo ideale.

Per quanto riguarda l'accensione di un LED, alcuni dispositivi non presentano una ben precisa tensione di soglia, ma tendono ad accendersi prematuramente a diverse tensioni di un intervallo di valori come è possibile notare in Figura 3.13.

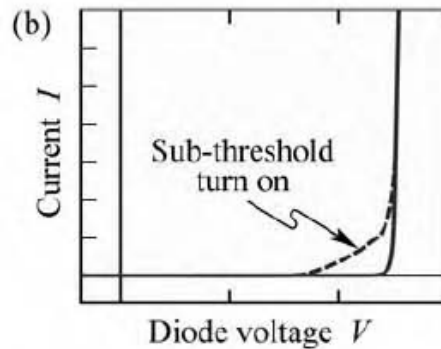


Figura 3.13 Grafico I-V con corrente di sottosoglia del LED

Questa corrente di sottosoglia può essere generata da vari effetti parassiti che possono avvenire all'interno dei diodi. Oltre alle resistenze parassite, altri fenomeni indesiderati possono essere:

- *Processi di generazione e ricombinazione nella regione di svuotamento*
- *Fotocorrenti*
- *Presenza di diodi parassiti con altezza di barriera più bassa rispetto al diodo principale*
- *ma con area inferiore*

3.4.1 Generazione e ricombinazione all'interno della regione di svuotamento

Nell'equazione del diodo ricavata da Shockley si è fatta l'ipotesi di avere un dispositivo ideale senza difetti (e quindi centri di generazione-ricombinazione) all'interno della regione di svuotamento. Se si tiene presente che i dispositivi reali presentano una certa concentrazione di difetti anche in queste zone, si può notare che la corrente può essere alterata da processi di generazione e ricombinazione della carica. Infatti, per un diodo in polarizzazione diretta, il processo di ricombinazione all'interno della RCS genera un eccesso di corrente soprattutto a basse tensioni assegnando un valore pari a 2 al fattore di idealità del diodo. Viceversa, nel caso di polarizzazione inversa del diodo, la corrente in eccesso si ha per il processo di generazione all'interno della stessa regione di svuotamento come possibile notare in *Figura 3.14*

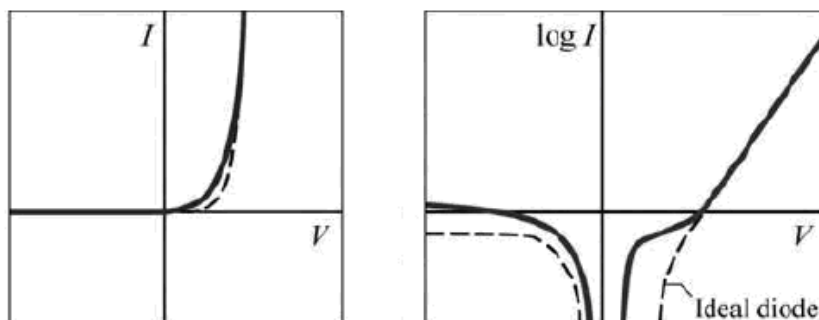


Figura 3.14 Effetto del processo di generazione e ricombinazione all'interno della RCS

3.4.2 Fotocorrente

Il LED, essendo un dispositivo inserito all'interno di un package composto da una lente, è in grado di generare una fotocorrente in presenza di un ambiente esterno luminoso. Per non alterare le misure sul dispositivo infatti, è necessario disporre di un ambiente buio.

Figura 3.15 rappresenta l'effetto della fotocorrente nella caratteristica del diodo ideale.

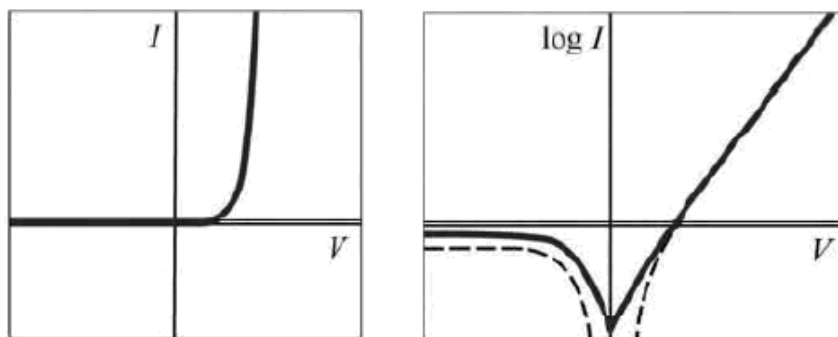


Figura 3.15 Effetto della foto corrente nella caratteristica I-V di un LED

3.4.3 Diodo Parassita

Alcuni diodi presentano una tensione di accensione prematura a causa delle perdite attraverso gli stati superficiali presenti nel perimetro del chip o attraverso i difetti lungo l'asse della giunzione p-n dando origine a percorsi con altezza di barriera più bassa rispetto al diodo principale. Questo fenomeno parassita è visto come un diodo in parallelo in grado di alterarne la caratteristica tensione/corrente nel seguente modo:

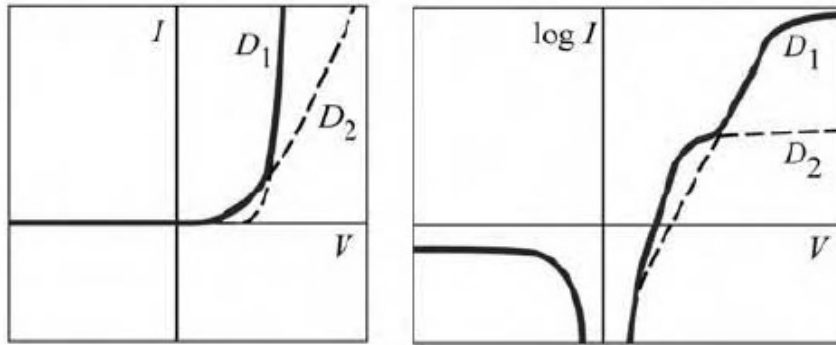


Figura 3.16 Effetto del diodo parassita nella caratteristica I-V del LED

Nonostante la presenza di tutti questi fenomeni parassiti, è possibile determinare dal diagramma a bande (in modo abbastanza approssimato) il valore di tensione ai capi del dispositivo. Secondo un bilancio energetico infatti, a livello ideale (quindi senza perdite) si dovrebbe avere:

$$V = \frac{h\nu}{q} \cong \frac{E_g}{q}$$

Un dispositivo reale invece, oltre alla presenza di resistenze parassite, presenta delle cadute di tensione dovute alla presenza di buche quantiche all'interno delle eterostrutture.

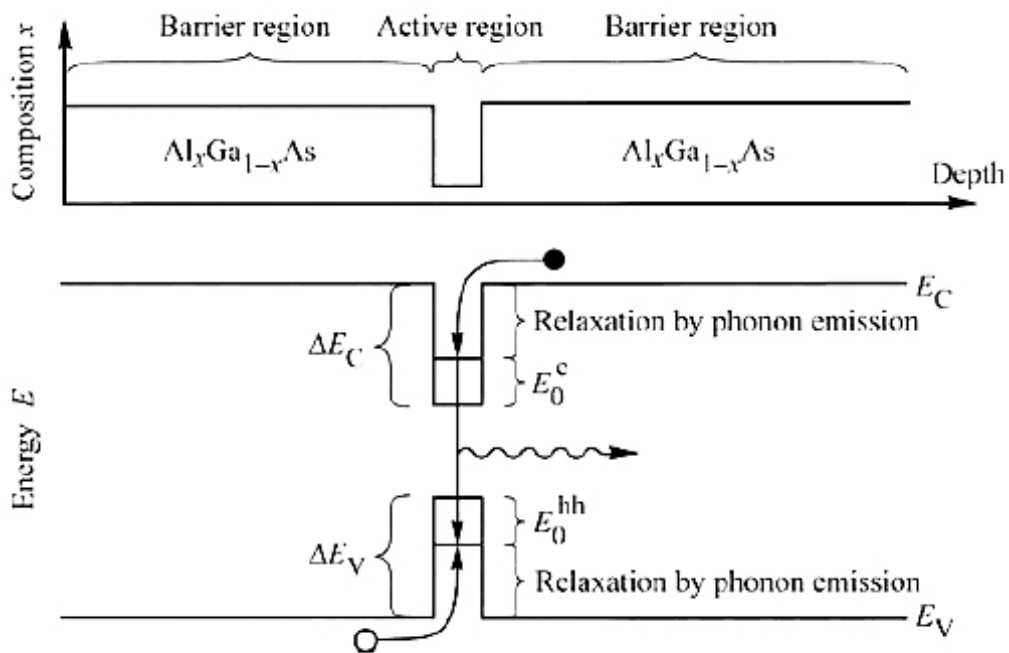


Figura 3.17 Diagramma a Bande Piatte di un'eterogiunzione

Seguendo infatti il diagramma a bande di un LED con una buca di potenziale, l'espressione della tensione diviene con una buona approssimazione:

$$V = \frac{E_g}{q} + IR_s + \frac{\Delta E_C - E_0^e}{q} + \frac{\Delta E_V - E_0^{hh}}{q}$$

Dalla formula, la tensione totale ai capi del dispositivo è data dalla somma della caduta di potenziale sulla resistenza serie con la tensione del processo di ricombinazione elettrone/lacuna $\frac{E_g}{q}$, più altre due cadute di potenziale all'interno della buca quantica in cui l'elettrone perde energia con emissione di fononi portandosi al livello minimo della banda di conduzione dello strato attivo E_0^{hh} e al livello minimo della banda di valenza una volta ricombinatosi con una lacuna.

4. Il Nitruro di Gallio e le tecnologie di fabbricazione

Durante gli ultimi decenni sono stati effettuati enormi passi avanti nella ricerca di materiali adatti per applicazioni optoelettroniche. In particolare nel 1990 molte sono state le scoperte e studi sulle proprietà dei nitrucci, realizzando semiconduttori a gap diretto in grado di emettere nell'ultravioletto o nel visibile con lunghezza d'onda vicine al blu per i loro alti valori di Energy Gap.

La classe di composti più studiati in questo senso, sono appunto GaN, InN, AlN realizzati da elementi del III gruppo della tavola periodica uniti all'azoto appartenente al V gruppo.

L'importanza di questi composti ha trovato molte applicazioni in vari settori commerciali a partire da quello agricolo per la produzione di lampade in grado di stimolare la fotosintesi clorofilliana, a quello militare con lo sviluppo di sensori, quello automobilistico per la realizzazione di fanali, quello signage per la realizzazione di display outdoor che sostituiscono la cartellonistica per arrivare in questi ultimi anni alla produzione di lampade a LED per l'illuminazione pubblica.

Nonostante la lunga serie di vantaggi ci sono ancora molte lacune che la ricerca sta cercando di colmare in modo da rendere più efficienti questi dispositivi. Uno dei più grossi problemi riguarda infatti la generazione di difetti e dislocazioni all'interno della struttura cristallina durante il processo di fabbricazione, introducendo dei centri di ricombinazione indesiderati in grado di influire in maniera drastica sulle prestazioni e la durata di tali componenti.

Lo scopo di questo capitolo è quello di presentare le principali caratteristiche fisiche e chimiche del nitrucci di gallio (GaN), materiale utilizzato all'interno dei dispositivi analizzati in questa tesi, elencando in seguito alcuni dei metodi più efficaci per la crescita e il drogaggio di questo semiconduttore.

4.1 Struttura cristallina del GaN

Come tutti i semiconduttori, anche il nitrucci di gallio presenta una struttura cristallina in grado, grazie al teorema di Bloch e di Kronig-Penny, di assicurare una distribuzione dei portatori su bande energetiche. Le due principali strutture utilizzate per la crescita nel GaN sono: la *wurzite* e la *zincoblenda*.

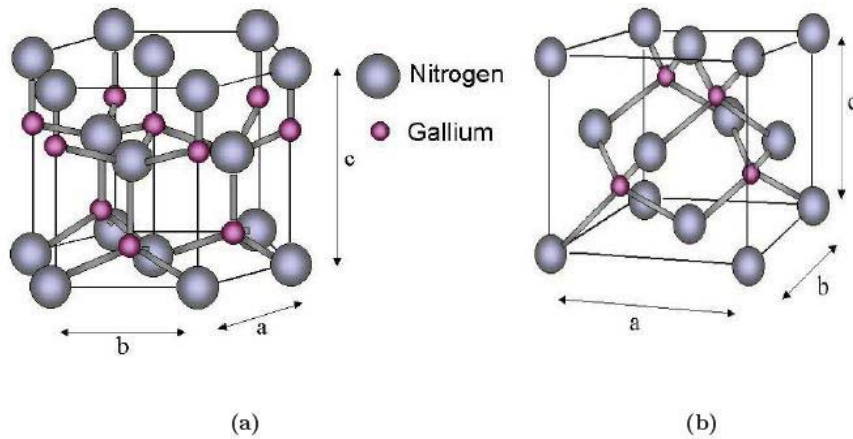


Figura 4.1 a) Struttura a wurzite del GaN; b) Struttura a zinco blenda

Mentre per altri semiconduttori come il silicio o il germanio, la struttura è quella tipica del diamante (tetraedrica), il GaN tende a crescere con un reticolo tipo wurzite a differenza degli altri composti del III-V gruppo che presentano una struttura tipo zincoblenda.

Nonostante siano tutte e due strutture tetraedriche, come possibile notare da *Figura 4.1* nella wurzite la simmetria è di tipo esagonale mentre nel zincoblenda è di tipo cubico. Per dare una descrizione più dettagliata di queste strutture vengono utilizzate delle coordinate cristallografiche (a, b, c) per le distanze interatomiche e (α, β, γ) per misurare gli angoli tra i legami.

Mentre per la wurzite queste costanti valgono $a = b \neq c$ e $\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma = 120^\circ$, per il zincoblenda assumono valori del tipo $a = b = c$ e $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Queste differenze tra le due strutture si ripercuotono sulle proprietà elettriche del materiale e sul valore dell'Energy Gap.

Le costanti reticolari determinano infatti le proprietà elettriche del materiale dal momento che l'Energy Gap è tanto più grande quanto più piccolo è il passo reticolare. A partire da questo concetto è possibile capire come l' aumento della temperatura possa influire su E_g abbassandone il valore a causa dell'allargamento delle celle cristalline dovuto alle vibrazioni termiche.

Un altro vantaggio che presenta il GaN è la presenza di pochi difetti e dislocazioni reticolari grazie ai forti legami tra gli atomi di azoto e gallio che rendono la struttura abbastanza regolare e in grado di sostenere meglio le alte correnti degradando più lentamente rispetto ad altri semiconduttori. Per questo motivo il GaN è un buon candidato per la realizzazione di dispositivi di potenza.

Proprietà (300K)	Simbolo	Ge	Si	GaAs	GaP	GaN
Struttura cristallina	D=diamante Z=zincoblenda W=wurzite	D	D	Z	Z	W Z
Gap	D=diretto I=indiretto	I	I	D	I	D
Costanti del reticolo	$a_0 = b_0$ [Å] c_0 [Å]	5.64	5.43	5.65	5.45	3.19 4.52 5.19 4.52
Energia di bandgap	E_g [eV]	0.66	1.12	1.42	2.26	3.39
Coefficiente di temperatura	$\frac{dE_g}{dT}$ [$\frac{eV}{K}$]					$-6 \cdot 10^{-4}$
Concentrazione di portatori intrinseca	n_i [cm^{-3}]	$2 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$1.9 \cdot 10^{10}$
Mobilità elettronica	μ_n [$\frac{cm^2}{V \cdot s}$]	3900	1500	8500	110	1500
Mobilità delle lacune	μ_p [$\frac{cm^2}{V \cdot s}$]	1900	450	400	75	30
Costante di diffusione elettronica	D_n [$\frac{cm^2}{s}$]	101	39	220	2.9	39
Costante di diffusione delle lacune	D_p [$\frac{cm^2}{s}$]	49	12	10	2	0.75
Affinità elettronica	χ [V]	4.0	4.05	4.07	-	4.1
Indice di rifrazione	N_{opt}	4.0	3.3	3.4	-	2.5

Figura 4.2 Principali parametri elettrici di alcuni semiconduttori

Nella tabella di Figura 4.2 vengono riportate le caratteristiche principali di alcuni tra i semiconduttori più utilizzati in campo elettronico in modo da poter confrontare le prestazioni del GaN con altri materiali. Oltre a tutti questi parametri, del GaN è importante conoscere la sua struttura a bande e quindi come si distribuiscono elettroni e lacune in funzione del momento k .

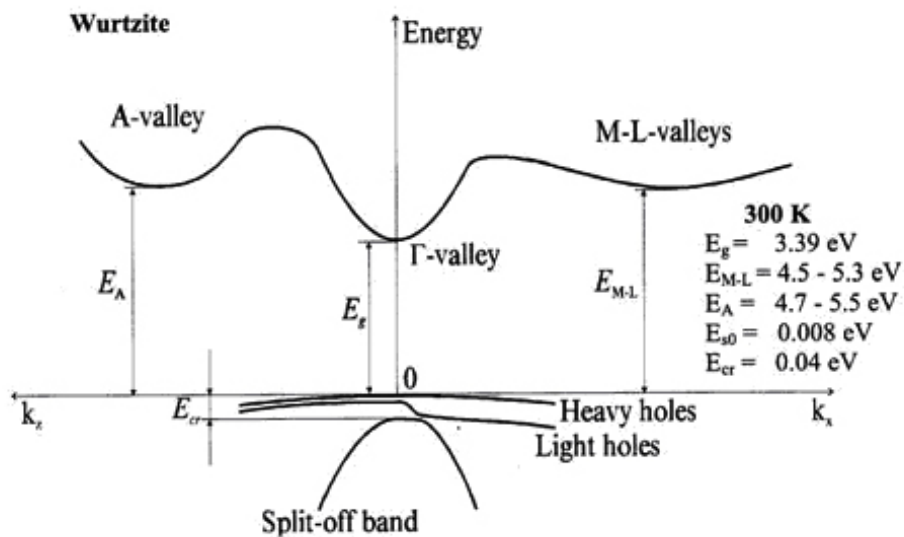


Figura 4.3 Livelli energetici del GaN in funzione del momento

Tale struttura a bande è molto simile a quella dell'arseniuro di gallio (struttura a zincoblenda) anche se il GaN presenta una degenerazione della banda di valenza in più livelli energetici (come si può notare da *Figura 4.3*) dovuta al forte campo elettrico presente all'interno della struttura cristallina.

Altra proprietà del GaN rispetto all'arseniuro di gallio, è quella di avere una struttura a bande che risente meno dello *strain* del reticolo. Questo perché, grazie alla sua struttura a wurzite, il GaN si può considerare deformato intrinsecamente. La struttura del GaN però, a differenza di altri semiconduttori del III-V gruppo, impedisce di utilizzare il concetto di massa efficace per la forma delle bande energetiche non paraboliche.

Nonostante la degenerazione degli stati, la transizione più importante tra le bande è quella tra il minimo della banda di conduzione e il massimo della banda di valenza che, nel caso del nitruro di gallio, comporta l'emissione di fotoni ad energia pari a 3.504 eV con una lunghezza d'onda nel vuoto di circa 355 nm (UV).

4.2 Proprietà elettriche dei nitruri

Essendo i nitruri dei semiconduttori a gap diretto con un alto valore di $g E$, hanno la capacità di sostenere un'alta tensione di breakdown, campi elettrici elevati e sono in grado di operare ad alte temperature e potenze. Per analizzare la mobilità dei portatori all'interno di questo materiale è possibile studiare due casi separati, uno a bassi valori di campo elettrico e uno ad alti valori.

A bassi campi elettrici, l'energia acquisita dagli elettroni è molto minore della loro energia termica. In questo modo la distribuzione di elettroni non viene alterata dal campo elettrico e la mobilità dei portatori è determinata da fenomeni di scattering.

Ad alti campi elettrici invece, l'energia dell'elettrone è paragonabile alla sua energia termica e la funzione distribuzione degli elettroni si discosta dal suo valore di equilibrio. Questo tipo di elettroni vengono detti *caldi* per il fatto che la loro temperatura è superiore a quella del reticolo in cui si muovono.

Concentrando l'attenzione al caso del trasporto a bassi campi elettrici, le proprietà di trasporto delle cariche all'interno di un semiconduttore vengono analizzate mediante l'effetto Hall.

Questo metodo è in grado di dare informazioni riguardo la presenza di malformazioni, fenomeni di scattering, concentrazione di impurità ecc. su strati epitassiali di semiconduttori.

Il coefficiente di Hall e la resistività sono determinate sperimentalmente e relate ai parametri elettrici nel modo seguente:

$$R_H = r_H / nq$$

$$\mu_H = R_H / \rho$$

in cui:

- ρ rappresenta la resistività del materiale
- q il valore della carica di un elettrone
- r_H il fattore di scattering di Hall
- μ_H la mobilità di Hall
- n la concentrazione di portatori liberi

Mentre gli elettroni viaggiando attraversano il semiconduttore, diversi fenomeni di scattering influiscono sul moto delle particelle. Che tiene conto degli effetti di tutti questi processi è appunto il coefficiente di Hall r_H e il parametro τ (*tempo di rilassamento*) che determina il tasso di cambio del momento delle particelle dovuto ai singoli fenomeni di scattering.

La mobilità è quindi legata al tempo di rilassamento dalla relazione:

$$\mu = \frac{q \langle \tau \rangle}{m^*}$$

dove:

- μ è la mobilità degli elettroni
- $\langle \tau \rangle$ è il tempo di rilassamento medio
- m^* è il valore di massa efficace

Il tempo medio di rilassamento tiene conto della media dei singoli fenomeni di scattering per i composti del III-V gruppo, validi per la maggior parte anche per i nitrucci.

Tra questi è possibile elencare:

1. *Scattering da parte delle impurità ionizzate*: la presenza di materiali droganti e ionizzati all'interno del reticolo cristallino può deviare il moto delle particelle tramite la forza Coulombiana ;
2. *Scattering acustico di fononi*: la presenza di fononi acustici interagisce col moto delle particelle introducendo vibrazioni reticolari ;
3. *Scattering dovuto a fononi polarizzati*: questo tipo di scattering è causato dall'interazione tra le cariche in movimento con il campo elettrico indotto dalla polarizzazione elettrica associata alle vibrazioni del reticolo cristallino di natura ionica presente nei legami con i nitruri ;
4. *Scattering piezoelettrico*: avviene a causa del campo elettrico generato dallo stiramento dovuto ai fononi di un reticolo cristallino senza inversione di simmetria, in particolare in semiconduttori a Band Gap largo come i composti dei nitruri.
5. *Scattering dovuto alle dislocazioni nel reticolo cristallino*: Questo è dovuto al fatto che i centri accettori introdotti nelle dislocazioni catturano elettroni dalla banda di conduzione in materiali di tipo *n*. In questo modo le dislocazioni diventano dei centri di carica negativa e il campo elettrico da loro generato devia il moto degli altri elettroni in movimento.

Per quanto riguarda la mobilità delle particelle all'interno del nitruro di gallio, si è detto che non vale il modello della massa efficace a causa della forma delle bande non paraboloidali. Per questo motivo lo studio della mobilità dei portatori all'interno del GaN è stata oggetto di molti studi negli ultimi anni.

Si è cercato quindi di studiarne la variazione in funzione della temperatura, dello spessore e del livello di drogaggio del materiale. Diversi modelli sono stati usati per spiegare i risultati sperimentali dei grafici riportati di seguito:

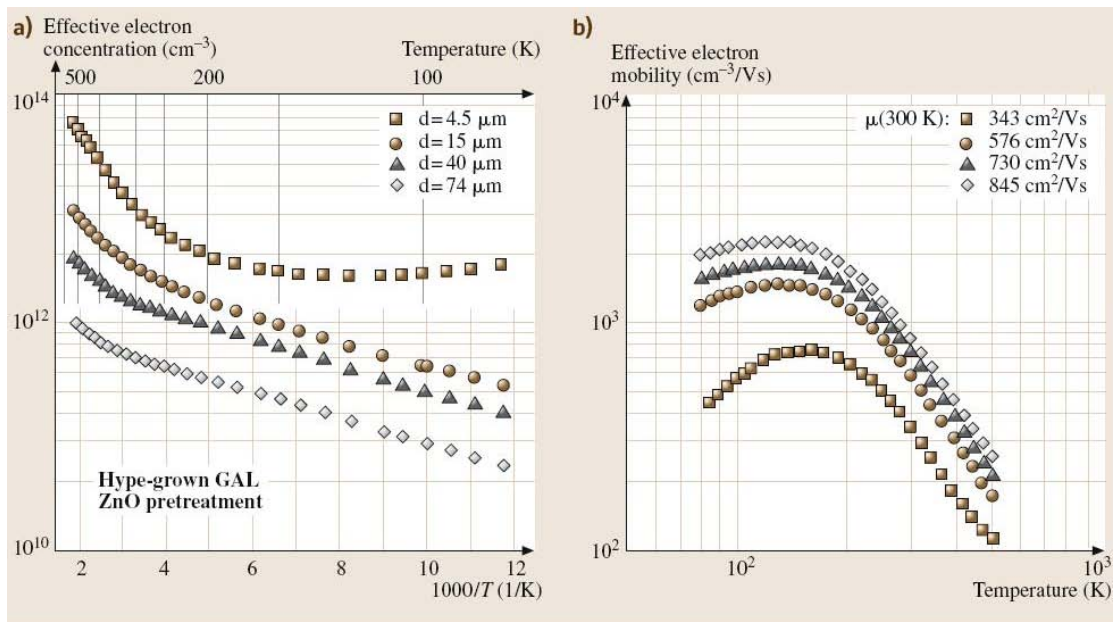


Figura 4.4 a) Concentrazione di elettroni in funzione della temperatura; b) Mobilità elettronica in funzione della temperatura

Dagli esperimenti effettuati e dai grafici (Figura 4.4 a)) è possibile notare che per basse concentrazioni di portatori ($< 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), la mobilità è determinata dallo scattering

introdotto dalle dislocazioni reticolari ed è proporzionale a $\frac{\sqrt{n}}{N_{dis}}$ (n concentrazione di elettroni e N_{dis} concentrazione di dislocazioni) mentre per alte concentrazioni di elettroni la presenza di impurità ionizzate diventa il processo di scattering dominante.

Analizzando invece la dipendenza della mobilità dalla temperatura, per quei materiali in cui lo scattering delle dislocazioni riveste il ruolo dominante, si nota un andamento crescente del tipo $T^{2/3}$ a basse temperature che poi inizia a calare quando a dominare è lo scattering dovuto alla presenza di fononi ottici polari e alla presenza delle vacanze nei nitruri ad alte temperature (Fig. 4.4 b)).

Un altro parametro analizzato da Götzet per lo studio della mobilità del GaN è lo spessore del materiale. Sono stati realizzati diversi strati di n-GaN (ciascuno con un suo spessore) su di un substrato di zaffiro pretrattato con ZnO oppure con GaCl mediante la tecnica HVPE. Dalle prove effettuate tramite l'effetto Hall si è notato (vedi Figura 4.4) che all'aumentare dello spessore diminuiva la concentrazione di portatori e allo stesso tempo aumentava la mobilità. Le ragioni di questo andamento non sono ancora del tutto chiare anche se presumibilmente la variazione dello spessore distribuisce in maniera non uniforme i difetti

introdotti dal processo di crescita su materiali diversi (in grado di generare difetti all'interfaccia a causa del diverso passo reticolare) in tutti e due i tipi di materiali.

4.3 Substrati

Uno dei problemi principali che il nitruro di gallio ha sempre condiviso con gli altri semiconduttori del gruppo III-V è la difficoltà di trovare un substrato adatto alla crescita epitassiale della struttura cristallina del materiale, questo perché i due materiali devono presentare una costante reticolare e coefficiente di espansione termica simile tra loro, altrimenti (Fig 4.5) verrebbero a formarsi una serie di difetti superficiali a causa di stress meccanici e termici sul reticolo cristallino.

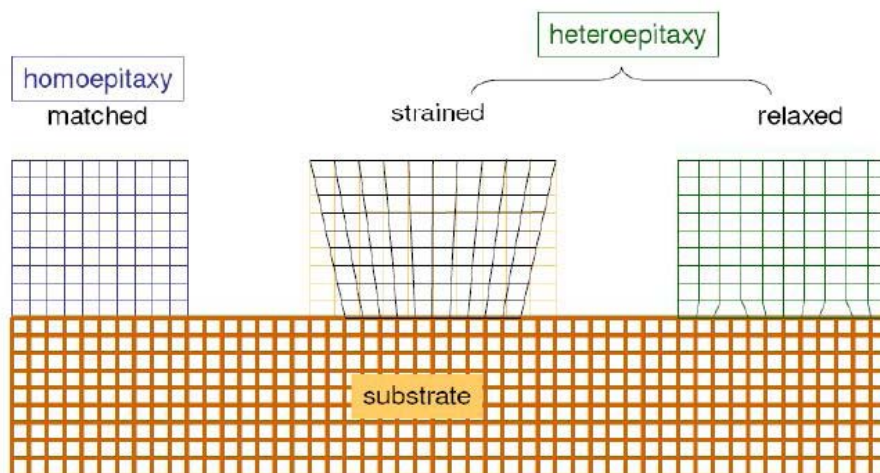


Figura 4.5 Confronto tra crescita omoepitassiale e etero epitassiale

A tale scopo sono state adottate varie tecniche di *eteroepitassia* utilizzando materiali come silicio, ossido di magnesio, ossido di zinco, carburo di silicio o zaffiro anche se i substrati più utilizzati sono appunto lo zaffiro (Al_2O_3) e il carburo di silicio (SiC).

Per quanto riguarda il processo di crescita del GaN su di un substrato di zaffiro, si può dire che, nonostante il mismatch reticolare del 16% e termico del 36% rispetto alla wurzite, è stato il primo materiale utilizzato per il suo basso costo sul mercato e per la simmetria esagonale. Negli ultimi tempi, per calare l'effetto di tali mismatch, si è utilizzato uno strato intermedio (buffer) abbassando di due ordini di grandezza la concentrazione di difetti e dislocazioni.

A differenza dello zaffiro, il carburo di silicio presenta un mismatch reticolare del 3.5% e termico del 3.2%, quindi più adatto e in grado di introdurre meno difetti reticolari. A discapito dei costi elevati di questo materiale e delle alte temperature a cui va utilizzato, il processo di crescita permette di ottenere LED a strutture verticali offrendo molti altri vantaggi come la possibilità di utilizzare la conducibilità termica ed elettrica per dissipare il calore della giunzione (adatta per dispositivi di potenza) e per creare i contatti del dispositivo, a differenza dello zaffiro (isolante elettrico) in cui vengono realizzati sulla superficie superiore del LED togliendo area luminescente.

Nonostante l'enorme utilizzo di questi tipi di substrati, si è arrivati negli ultimi anni a realizzare crescite *omoepitassiali* su GaN (cresciuto a sua volta in maniera eteroepitassiale) separandolo mediante l'utilizzo di laser ad impulsi dal resto del substrato. In questo modo è possibile avere un adattamento reticolare e termico migliore rispetto a zaffiro e carburo di silicio.

4.4 Principali tecniche epitassiali utilizzate in optoelettronica

Nonostante l'estesa gamma di tecniche [3,4,5] di fabbricazione di dispositivi elettronici, nel settore optoelettronico vengono utilizzate principalmente tre tipologie di tecniche epitassiali (e relative varianti). Tra queste è possibile elencare:

- MBE (Molecular Beam Epitaxy)
- MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)
- MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)

4.4.1 Molecular Beam Epitaxy (MBE)

Questa tecnica è molto usata per crescere una vasta serie di materiali come: semiconduttori, superconduttori, metalli, ossidi, nitrucci e film organici. Si presenta inoltre molto adatta per strutture di tipo Quantum-Well come i LED con uno spessore controllato in maniera molto accurata.

Il processo consiste nell'immettere separatamente all'interno di una camera a vuoto (Ultra High Vacuum) uno o più flussi di elementi gassosi (tra i quali anche i droganti) in modo tale da farli depositare su di un substrato posto ad una certa temperatura e mantenuto in

rotazione per garantire la formazione di uno film più omogeneo. I vari componenti di questa tecnica vengono rappresentati in *Figura 4.6*.

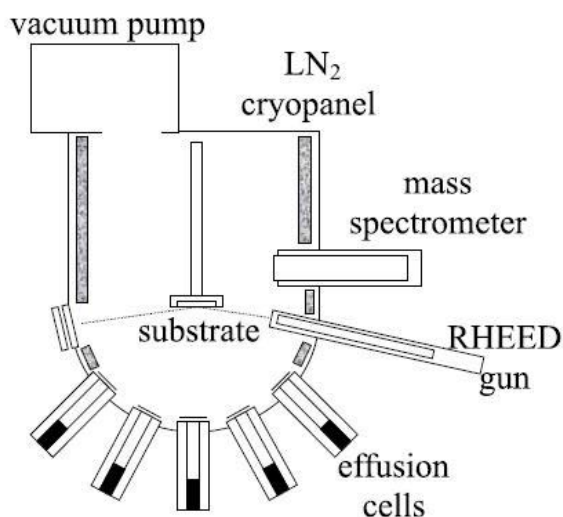


Figura 4.6 Camera di reazione MBE

La camera di reazione deve essere mantenuta a pressioni molto basse (generalmente inferiore ai 10^{-5} bar), in modo tale da consentire un cammino libero delle molecole pari alle dimensioni della stessa. In questo modo si riesce a velocizzare l'ingresso dei reagenti e quindi della reazione sul substrato, anche se non si deve eccedere troppo per evitare la formazione di difetti o strati disomogenei.

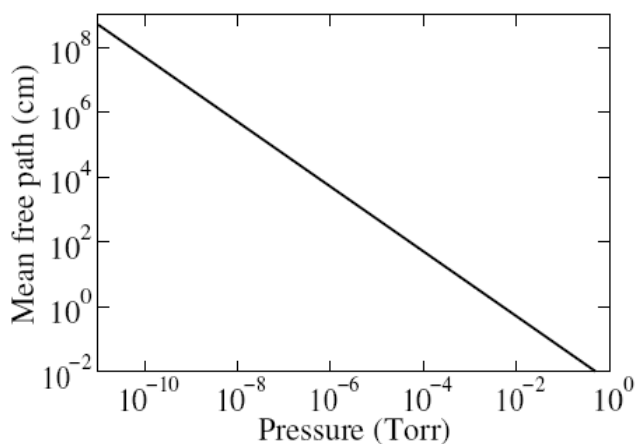


Figura 4.7 Cammino medio libero delle particelle in funzione della pressione della camera

Come possibile vedere da *Figura 4.7*, le sostanze vengono immesse nella camera attraverso degli ugelli in grado di chiudersi nell'arco di 0.1 secondi (inferiore al tempo

necessario per realizzare uno strato pari a 1-5 secondi) mentre lo spessore dello strato in fase di crescita è controllato da un sistema RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction). Le oscillazioni del segnale RHEED nel tempo (vedi *Figura 4.8*) stabiliscono il tempo necessario per la formazione di uno strato mentre il pattern di diffrazione dà indicazioni sullo stato della superficie che si sta formando (*Figura 4.8*).

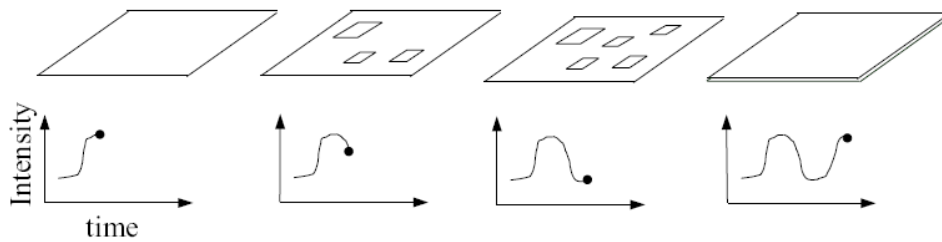


Figura 4.8 Segnale RHEED in funzione dello spessore dello strato

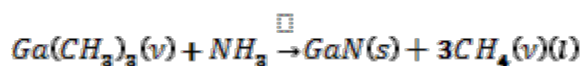
Le temperature in gioco sono intorno agli 800 °C (inferiori a MOCVD) e consentono di avere un minor numero di difetti generati da mismatch termico con il substrato e allo stesso tempo una reazione più lenta (intorno ai 50nm/h).

Questa tecnica viene solitamente utilizzata per crescere strati di InGaN e di GaN drogati con magnesio perché, grazie alle “basse” temperature in gioco, non sono necessari trattamenti di annealing per attivare gli accettori.

4.4.2 Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

La Metal Organic Chemical Vapor Deposition è una tecnica sviluppata negli anni '60 (migliorata in seguito all'inizio degli anni '90) adatta alla fabbricazione di strati epitassiali composti da elementi del III (alcali) e V Gruppo (idruri) della tavola periodica. Il processo consiste nel mescolare alcuni tipi di reagenti in forma gassosa all'interno di una camera a determinate condizioni di pressione e temperatura. In questo modo i reagenti vanno a depositarsi su di un substrato posto ad una certa temperatura in modo da innescare processi di pirolisi e formare degli strati per “nucleazione”.

Con riferimento al processo di deposizione del GaN, la reazione che ne determina la crescita è del tipo:



Si vede infatti che, facendo reagire il trimetilgallio ($Ga(CH_3)_3$) con una molecola di ammoniaca (NH_3), si ottiene una molecola di nitruro di gallio (GaN) e 3 di metano ($3CH_4$). Il tutto avviene utilizzando azoto e idrogeno come gas trasportatori su di un substrato a temperature superiori ai 1000 °C.

Per quanto riguarda la camera di reazione, questa può essere di tipo orizzontale o verticale come possibile notare da *Figura 4.9*.

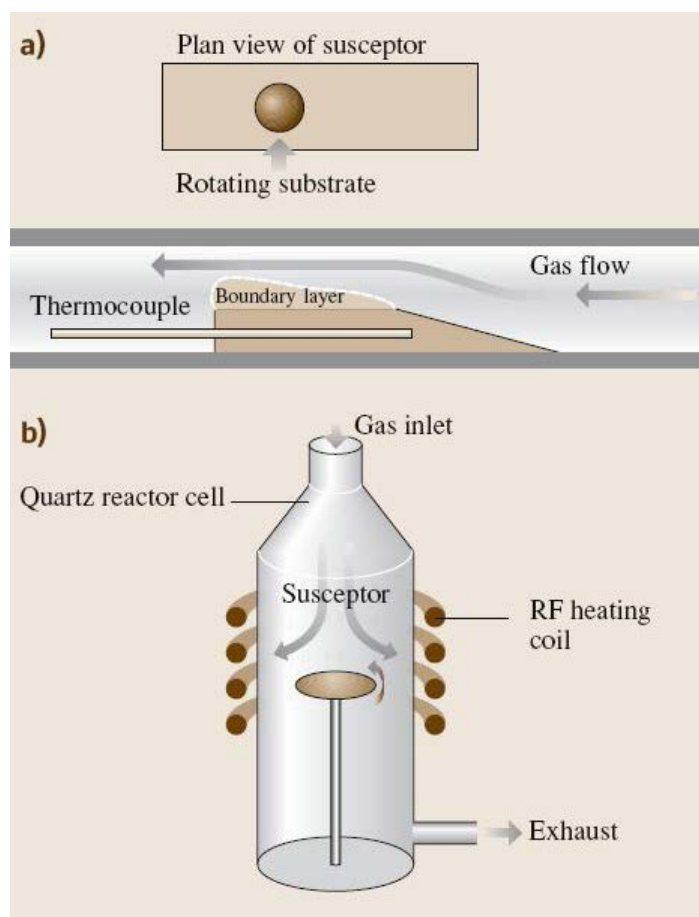


Figura 4.9 Due tipi di camera di reazione: a) orizzontale; b) verticale

Il substrato viene messo al di sopra di un sostegno di grafite e può riscaldato mediante un sistema RF tramite una bobina, da una resistenza messa sotto il sostegno oppure da alcune lampade sotto la grafite.

La pressione all'interno della camera viene solitamente abbassata a circa un decimo di atmosfera in modo da velocizzare l'ingresso dei gas reagenti. In questo modo si riesce ad avere una crescita epitassiale più o meno omogenea, direttamente dipendente dalla velocità con cui entra il gas all'interno della camera.

Un difetto di questa tecnica, oltre alla presenza di idrogeno che tende a legarsi con gli atomi di magnesio del p-GaN (passivando il drogante), è la scarsa omogeneità del substrato.

Una miglioramento è stato introdotto nel tempo da Nakamura con la TF-MOCVD il cui schema viene rappresentato in *Figura 4.10*

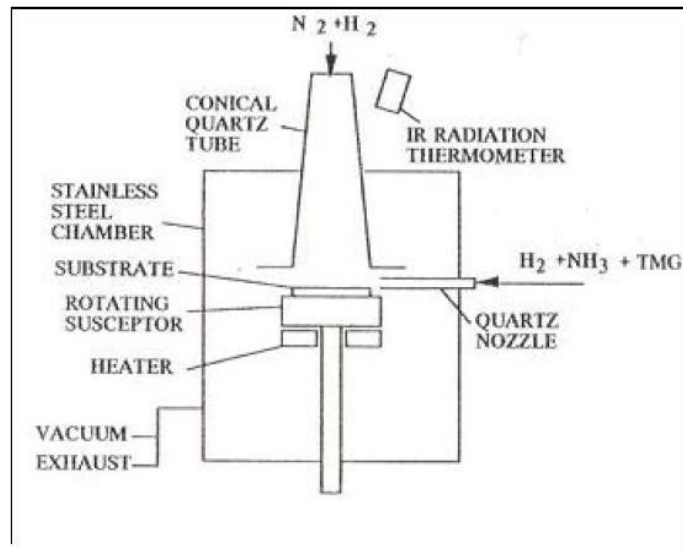


Figura 4.10 camera di reazione utilizzata nel TF-MOCVD

A differenza della classica MOCVD, questa tecnica permette di ottenere uno strato epitassiale molto più omogeneo grazie alla presenza di due gas in parallelo: il primo composto dagli elementi della reazione; il secondo invece è un gas inerte utilizzato per il controllo della pressione e della reazione (N_2 o H_2) all'interno della camera. In questo modo il gas inerte riesce a deviare la direzione del flusso principale in direzione perpendicolare al substrato e distribuire in maniera ottimale il contatto dei reagenti con il substrato.

4.4.3 Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE)

Anche in questa tecnica lo strato di GaN viene depositato all'interno di una camera a temperature comprese tra i 1000 e i 1100 °C su di un substrato di zaffiro o di carburo di silicio sopra i quali viene applicato uno strato buffer di AlN in modo da adattare le costanti reticolari dei due materiali e diminuire il numero di dislocazioni e difetti dovuti allo strain.

I precursori utilizzati sono solitamente ammoniaca (NH_3) per ottenere l'azoto e trimetilgallio (TMG) oppure trietilgallio (TEG) per separare il gallio.

Per la deposizione dell'azoto, oltre all'utilizzo di ammoniaca, esistono in alcuni casi delle camere inserite a monte di quella principale in cui avviene la reazione in grado di dissociare, mediante utilizzo di tecniche al plasma, le molecole di azoto in atomi che in un ambiente a basse pressioni (10-100 Pa) presentano un tempo di vita superiore rispetto al caso in cui la pressione sia quella atmosferica.

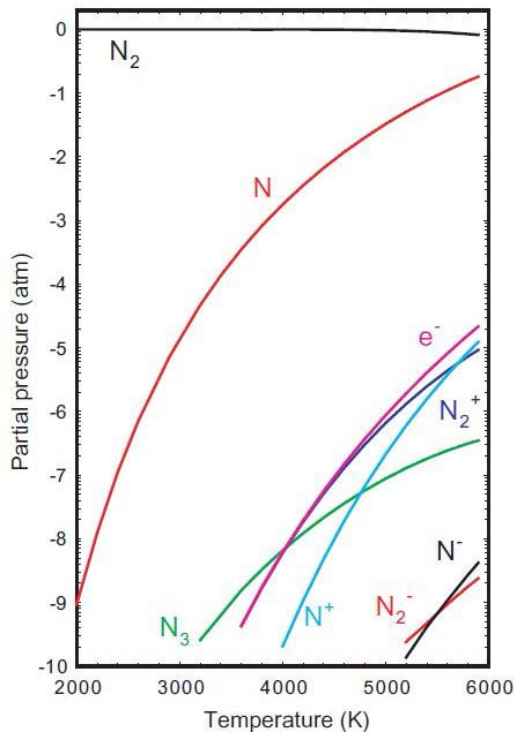


Figura 4.11 Pressione vs Temperatura di elementi e ioni di azoto

La Figura 4.11 indica i valori di pressione in funzione della temperatura dei vari ioni e atomi di azoto utilizzati in questa tecnica. Nonostante il possibile utilizzo di questi elementi, si è soliti optare per l'ammoniaca data la sua capacità di generare un minor numero di difetti reticolari.

A discapito di una migliore struttura cristallina, l'utilizzo di ammoniaca come precursore dell'azoto introduce all'interno della camera degli atomi di idrogeno in grado di legarsi con il magnesio (utilizzato come drogante di tipo P) passivandone il drogaggio. E' necessario per questo motivo, effettuare un processo di annealing termico per disattivare i legami Mg-H.

Per quanto riguarda la camera di reazione (Figura 4.12), questa deve essere fatta in modo da tener ben separati i precursori prima che raggiungano il substrato a causa della forte tendenza dell'ammoniaca a legarsi con il TMG.

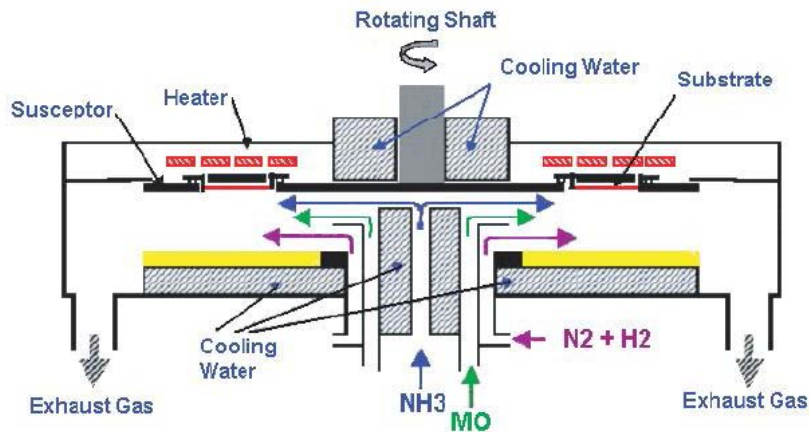


Figura 4.12 Camera di reazione MOVPE

Come in molti processi epitassiali, anche nel MOVPE e' presente un sistema di controllo dello strato che si viene a formare, effettuato solitamente misurando la variazione di riflettività del raggio incidente al substrato con un laser durante la crescita. La funzione periodica che si viene a formare ha un periodo pari a:

$$\tau = \frac{\lambda \cos \theta}{2nV}$$

In cui:

- λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente
- θ è l'angolo di incidenza del raggio con il substrato
- n l'indice di rifrazione del GaN
- V il tasso di crescita

Quando il raggio laser viene assorbito o deviato dallo scattering della rugosità del substrato, le oscillazioni vengono smorzate.

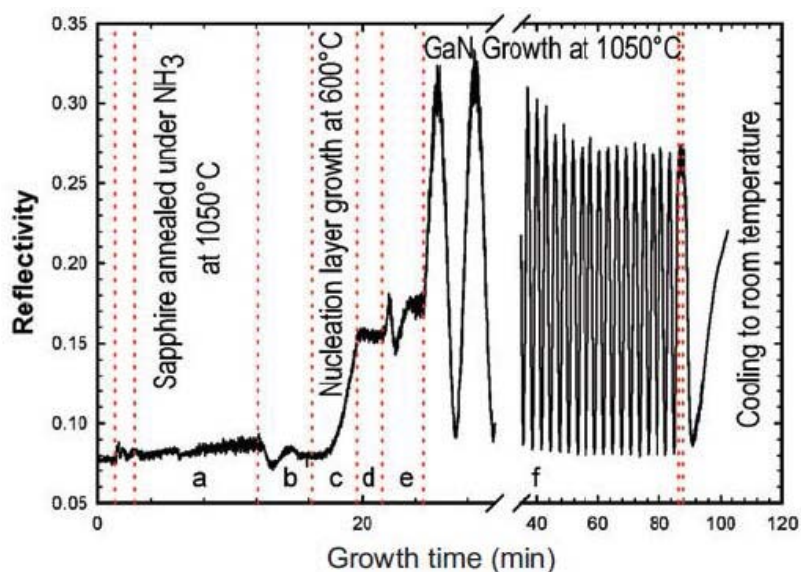


Figura 4.13 riflettività dello strato epitassiale in funzione del tempo di crescita

A titolo di esempio viene riportato in *Figura 4.13* un grafico di riflettività in un processo di crescita del GaN su di un substrato di zaffiro, si possono notare varie fasi e passi prima della formazione dello strato. Si parte dalla fase a) in cui si ha un trattamento dello zaffiro a più di 1000°C con dell'ammoniaca per poi abbassare la temperatura a circa $450\text{-}600^{\circ}\text{C}$. Dopodiché, a 600°C (passo b)), avviene il primo deposito per nucleazione del GaN, aumentandone in questo modo la riflettività (passo c). Il processo di nucleazione viene successivamente interrotto e il materiale depositato viene sottoposto ad un breve processo di annealing a 1050°C . A questo punto la crescita epitassiale è pronta per partire (fase f). Si vede infatti da *Figura 4.13* una funzione periodica di periodo pari a 2.9 min che corrisponde ad un tasso di crescita di circa $2.8 \mu\text{m}/\text{h}$.

Per quanto riguarda la qualità dello strato generato mediante MOVPE, generalmente si ha una concentrazione di dislocazioni intorno a 10^8cm^{-2} . Per cercare di ridurre il numero di difetti, sono state effettuate delle modifiche nel corso degli anni, tra le quali la più importante è la tecnica ELO (Epitaxial Lateral Overgrowth) in grado di calare da uno a due ordini di grandezza la concentrazione di dislocazioni del GaN.

Questa tecnica consiste nel creare su di un substrato di GaN formato inizialmente, delle maschere mediante delle strisce di isolante (tipicamente biossido di silicio o nitruro di silicio) utilizzando le classiche tecniche fotolitografiche. Il GaN depositato all'interno delle zone selezionate dalla maschera, una volta rimosso l'isolante, viene utilizzato come "seme" per la crescita laterale nelle zone in cui vi era la presenza del biossido di silicio ("wing region").

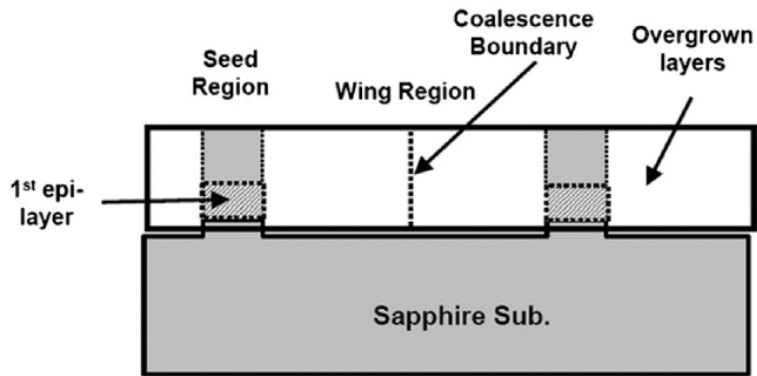


Figura 4.14 Crescita ELO di uno strato di GaN

Con questa tecnica, come possibile vedere da *Figura 4.14*, la concentrazione di dislocazione è maggiore nelle zone in cui il GaN è stato cresciuto sopra il substrato di zaffiro. Questo perché il mismatch tra i reticoli cristallini tende a forzare il passo reticolare del GaN in modo da adattarlo al substrato (strain) generando difetti e dislocazioni che fungono da centri di ricombinazione non radiativa.

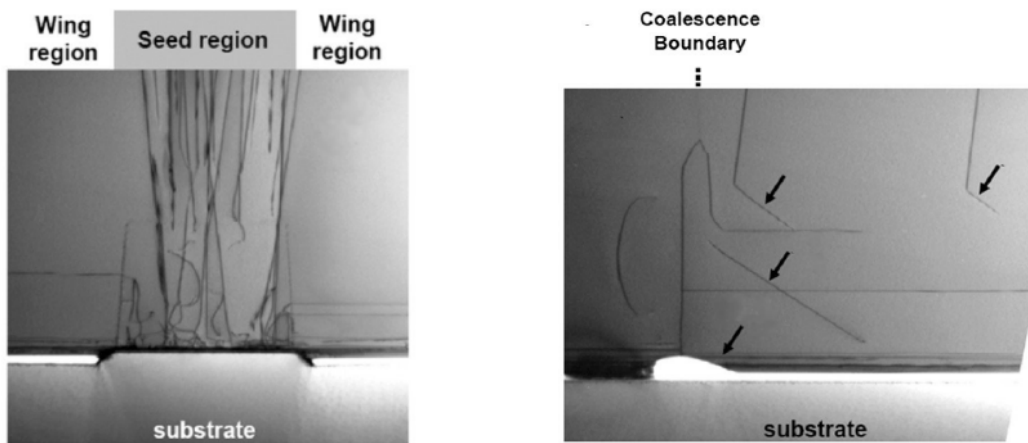


Figura 4.15 Immagini al microscopio elettronico di uno strato di GaN cresciuto tramite la tecnica ELO

4.5 Drogaggio del GaN

Una delle grosse sfide nella realizzazione di dispositivi su GaN è il controllo del drogaggio e della mobilità dei portatori nel materiale.

Per quanto riguarda il drogaggio di tipo-*n*, durante la fase di crescita, il GaN presenta un drogaggio non intenzionale dovuto, secondo alcuni alla mancanza di atomi di azoto in alcuni punti del reticolo cristallino mentre secondo altri, deriva dalla presenza d'impurità come l'ossigeno, nonostante le concentrazioni siano basse. Per compensare tale drogaggio, si è soliti introdurre atomi donori (solitamente germanio o silicio) sottoforma gassosa (GeH_4 o SiH_4), facendoli reagire con il trimetilgallio e l'ammoniaca.

Il drogaggio di tipo-*p* invece, nel corso degli anni, è stato il fattore determinante dello sviluppo di dispositivi al nitruro di gallio per le sue problematiche.

Vari tentativi sono stati fatti sino alla fine degli anni '80, arrivando con risultati soddisfacenti soltanto nel '92 quando Nakamura, riuscì ad ottenere un drogaggio efficiente di p-GaN introducendo del magnesio (Mg) e trattando successivamente il materiale mediante dell'*annealing termico* a circa 700°C in ambiente N_2 .

Questa tecnica consente di ottenere dei buoni risultati anche per spessori di materiale relativamente grandi (intorno ai $4\mu m$) e con caratteristiche abbastanza uniformi. Il fatto di utilizzare temperature così elevate, permette inoltre di eliminare l'idrogeno presente all'interno dello strato epitassiale introdotto durante il processo di crescita, allo stesso tempo però si rischia di danneggiare il materiale stesso.

Lo stesso processo di crescita si può effettuare a temperature inferiori (500 °C) introducendo dell'ossigeno al posto dell'azoto in camera di reazione. In questo modo, gli atomi di idrogeno liberatesi nel processo, si legano con l'ossigeno e vengono eliminati sottoforma di vapore acqueo.

5. LED a luce bianca

Prima che venisse accettata la teoria di Newton la maggior parte degli scienziati riteneva che il bianco fosse il colore fondamentale della luce e che gli altri colori si formassero solamente con l'aggiunta di "qualcosa" alla luce.

Newton invece dimostrò che la radiazione di luce bianca è formata dalla combinazione di radiazioni colorate.

Una delle possibili applicazioni dei LED blu è la generazione di luce bianca tramite la conversione della radiazione dovuta alla presenza di un foglio di fosfori interposto tra la sorgente e l'osservatore.

Questo è soltanto l'ultimo dei modi possibili per la generazione di luce bianca che sta prendendo piede al giorno d'oggi per applicazioni in ambito civile nelle applicazioni di illuminazione e nella produzione di televisori e display.

Si sa infatti che esistono molti altri dispositivi che vanno dalle lampade a incandescenza a quelle al mercurio, a tecniche che permettono di miscelare tra loro i tra colori, intesi come radiazioni luminose, per ottenere la percezione di luce bianca.

In questo capitolo verranno introdotti alcuni concetti basilari di fotometria e radiometria per capire come l'occhio umano percepisce la radiazione elettromagnetica e quali sono le grandezze utilizzate per poter dare una descrizione qualitativa e quantitativa di una sorgente luminosa.

Saranno inoltre esposte le varie tecniche per ottenere luce bianca dai LED che sono uno degli argomenti su cui è centrato questo lavoro di tesi.

5.1 L'occhio umano

Dato che uno degli obiettivi di questa tesi è di analizzare dispositivi LED per applicazioni su display, è indispensabile sapere, almeno a grandi linee, come è percepita la radiazione luminosa dall'occhio umano.

Si sa che l'intervallo di lunghezze d'onda che l'occhio riesce a percepire va da 380nm a 780nm (dal blu al rosso) con relativa percezione dell'intensità come possibile vedere da

Figura 5.1:

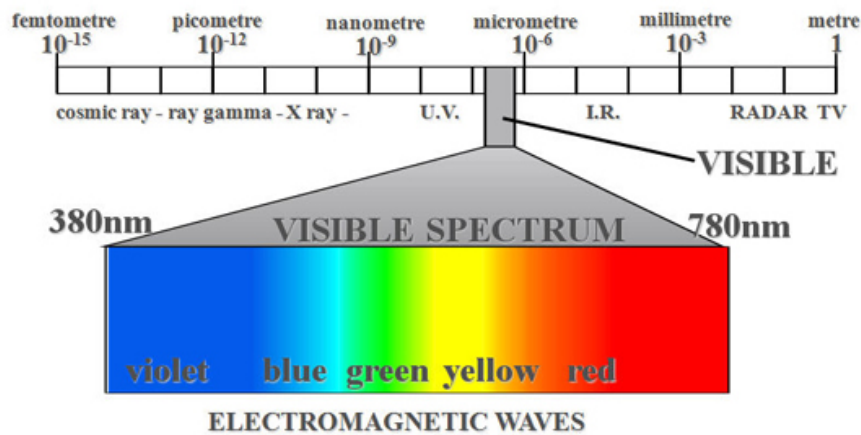


Figura 5.1 Spettro visibile dall'occhio umano

La luce percepita dall'occhio umano, dopo essere stata focalizzata dal cristallino e dalla cornea viene proiettata sulla retina in cui sono presenti due tipi di sensori: *i coni* e *i bastoncelli*.

I primi consentono di vedere durante le ore diurne (visione *fotopica*) in cui si hanno alte intensità di luce e riescono a percepire i colori e i contrasti luminosi. I bastoncelli invece, a differenza dei coni, sono più sensibili alla luce e consentono di vedere in condizioni di scarsa luminosità (visione *scotopica*).

Nel 1924 l'International Commission of Illuminance, introdusse due funzioni che descrivevano la risposta dell'occhio umano (visione fotopica e scotopica) rispetto alla lunghezza d'onda.

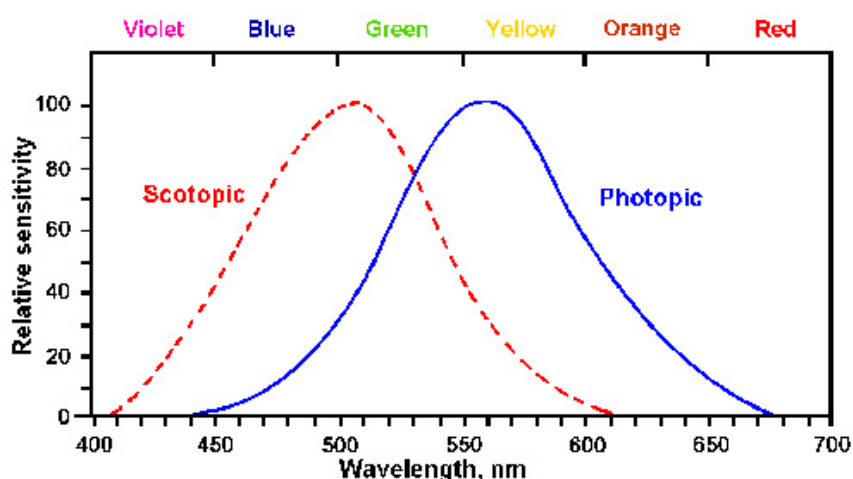


Figura 5.2 Visione fotopica e scotopica dell'occhio umano

Come possibile vedere in *Figura 5.2*, le due funzioni presentano un picco massimo (visione fotopica) a 555nm e a 507nm (visione scotopica).

5.2 Radiometria e Fotometria

Essendo la luce una radiazione elettromagnetica per poter quantificarne l'intensità e altre proprietà, sono state introdotte delle variabili *radiometriche e fotometriche*. Mentre la *Radiometria* consente di effettuare delle misure in funzione dell'energia radiante, la *Fotometria* misura l'intensità luminosa in funzione della percezione visiva della brillantezza luminosa.

La tabella di *Figura 5.3* riporta un elenco di tutte le grandezze radiometriche e fotometriche utilizzate per descrivere una sorgente luminosa.

Quantità fotometriche	Simbolo	Quantità radiometriche	Simbolo
Intensità luminosa [cd]	I_V	Intensità radiante [W/sr]	I_e
Intensità luminosa media [cd]	$I_{LED A}$ $I_{LED B}$	Intensità radiante media [W/sr]	$I_{e,LED A}$ $I_{e,LED B}$
Flusso luminoso [lm]	Φ_{lum}	Flusso radiante [W]	Φ_e
Efficacia luminosa [lm/W]	η_V	Efficienza radiante	η_e
Luminanza [cd/m ²]	L	Radianza (W/sr/m ²)	L_e

Figura 5.3 Elenco grandezze fotometriche e radiometriche per caratterizzare una sorgente luminosa

Le grandezze fotometriche sono:

- *Intensità luminosa* I_V : 1cd è l'intensità luminosa di una sorgente monocromatica con picco a 555 nm che emette con intensità radiante di 1/ 683W in un angolo solido di 1 steradiano.
- *Intensità luminosa media* $I_{LED A}$ [cd] oppure $I_{LED B}$ [cd] è definita dal CIE tramite la misura rappresentata in *Figura 5.4*. Ha particolare importanza per LED dotati di sistemi di microlenti. In essi infatti, vista la mancanza di un punto di partenza ben determinato della radiazione luminosa, la misura dell'intensità luminosa tende a variare significativamente con la distanza di misura e l'apertura

del fotorivelatore, pertanto attenendosi alle distanze indicate si evitano variazioni dell'intensità ottenendo misure più attendibili.

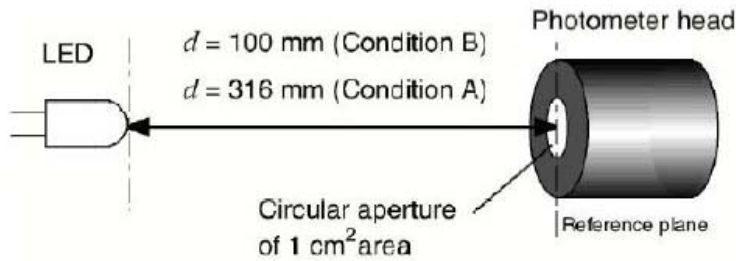


Figura 5.4 metodo utilizzato per misurare l'intensità luminosa media

- *Flusso luminoso* Φ_{lum} : 1 lumen, unità di misura del flusso luminoso, è definito come il flusso di 1 *cd* emesso da una sorgente in un angolo solido di 1 steradiante. La stessa quantità può essere definita utilizzando il concetto della curva di sensibilità $V(\lambda)$ dell'occhio umano e dello spettro luminoso $S(\lambda)$ nel modo seguente:

$$\Phi_{lum} = K_m \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

In cui $K_m = 683 [lm/W]$

- *Efficacia luminosa* $\eta_V [lm/W]$: è definita come il prodotto tra l'*efficienza quantica esterna*, definita come il rapporto tra il numero di fotoni emessi dal dispositivo al secondo e il tasso di elettroni entranti al secondo, e l'*efficienza luminosa della radiazione* (K) definita a sua volta come il rapporto tra il flusso luminoso e il flusso radiante, calcolata in funzione della curva di sensibilità dell'occhio:

$$K = \frac{\Phi_{lum} K_m \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\Phi_e \int S(\lambda) d\lambda}$$

- *Luminanza* L : è l'intensità luminosa per unità di area e si misura in cd/m^2

Per quanto riguarda le grandezze radianti, queste sono:

- *Flusso radiante*: è definito come la variazione del flusso di energia radiante nel tempo e si misura in watt [W]
- *Intensità radiante*: è il flusso radiante per unità di angoli solidi in una data direzione. Analiticamente è definita come:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$$

- *Efficienza radiante*: è la capacità di una sorgente luminosa di convertire la potenza elettrica entrante in flusso radiante:

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P}$$

- *Radianza*: è una grandezza che descrive la quantità di luce emessa (o riflessa, o trasmessa) attraverso una data sezione e diretta verso un determinato angolo solido in una direzione indicata. E' solitamente impiegata per descrivere l'emissione da sorgenti diffuse e la riflessione da superfici diffuse. L'unità di misura della radianza secondo il SI è il watt su steradiante su metro quadrato ($W/(sr\ m^2)$).

5.3 Colorimetria

La *colorimetria* comprende tutta una serie di grandezze che permettono di dare una descrizione numerica del colore percepito dall'occhio umano.

Queste sono:

- *Tono o tinta*: è la proprietà qualitativa del colore legata essenzialmente alla lunghezza d'onda
- *Purezza o saturazione*: la purezza del colore è legata alla monocromaticità del colore, infatti i colori saturi sono quelli monocromatici. La combinazione di colori saturi compone altri colori meno puri
- *Intensità della sensazione*: dipende dalla luminanza della sorgente

L'insieme della tinta e della saturazione del colore definisce la cromaticità della luce.

Esistono in fisica due *leggi di Grassmann* che descrivono la cromaticità di un colore. Di seguito viene riportata solamente la prima:

- La variazione delle proprietà cromatiche della luce ha carattere di *continuità*: variando cioè con continuità un attributo fisico della radiazione (ad es. la lunghezza d'onda o la potenza), la sensazione cromatica varia con continuità.
- Il colore può essere costruito attraverso la *composizione additiva* di altri colori, ed in particolare di colori puri. L'occhio non è in grado infatti di discernere nel colore-miscela la natura delle singole componenti cromatiche che lo costituiscono.
- La luminanza di un colore che è ottenuto dalla miscela di vari colori è pari alla somma delle luminanza dei colori componenti.

Nel 1931 è stato introdotto il sistema colorimetrico CIE che permette di rappresentare su di un grafico, detto triangolo dei colori, le proprietà cromatiche della luce. Il tutto si basa sul fatto che la maggior parte dei colori risulta essere composta dal miscuglio tra il *Rosso*, il *Verde* e il *Blu* (*sistema RGB*).

Per questo motivo sono state introdotte le tre *matching-function* $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$.

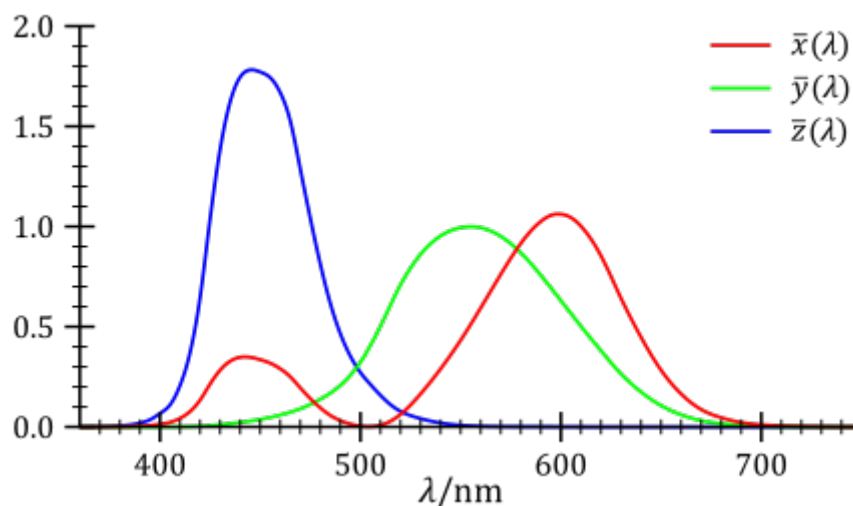


Figura 5.5 matching-functions del sistema RGB

Da queste funzioni, e dallo spettro $S(\lambda)$ della radiazione, sono stati definiti i valori di tristimolo X , Y e Z come:

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

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

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

Per non dover ricorrere ad un grafico tridimensionale, da questi valori è possibile ricavare le coordinate cromatiche nel piano (x,y) del *diagramma cromatico* di *Figura 5.6* in modo tale da poter identificare ogni colore in maniera univoca.

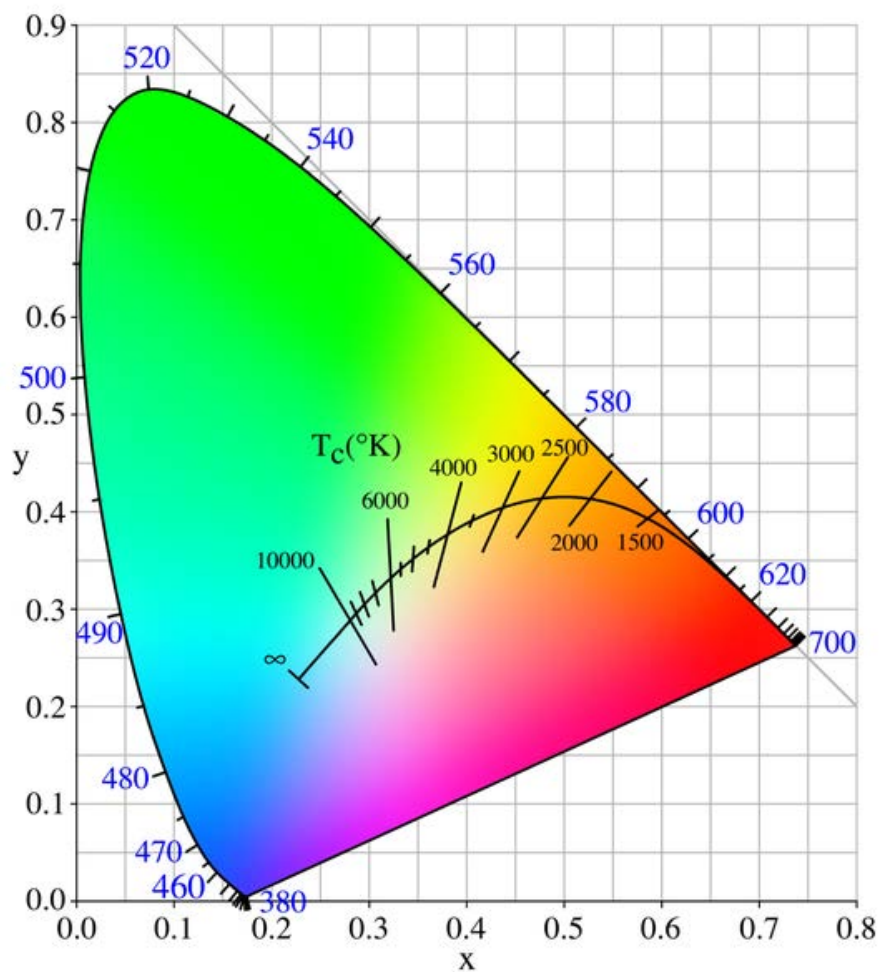


Figura 5.6 Diagramma Cromatico

Tali coordinate si definiscono come:

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

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

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

E vengono normalizzate in modo tale che $x + y + z = 1$ per qualsiasi valore originario di X, Y e Z. Da questo si ricava tra l'altro che: $z = 1 - x - y$ ed è dunque possibile utilizzare due sole coordinate cromatiche (x e y) per identificare un colore essendo la terza (z, in questo caso) ricavabile sottraendo all'unità le altre due.

Il vantaggio è evidente: normalizzando i colori col meccanismo della somma costante (uguale a 1) è possibile utilizzare un grafico bidimensionale per *catalogare* qualitativamente (e non quantitativamente) tutte le tinte reali.

Ovvero si tracciano tutti i colori possibili e immaginabili la cui intensità totale è costante e pari ad uno, dunque ci si rende indipendenti dalla luminosità.

5.4 Temperatura di colore e indice di resa del colore

Oggi giorno ci sono molte varianti di luce bianca prodotta dai LED, ma esse possono essere raggruppate in 3 principali categorie descrittive: “*bianco caldo*”, “*bianco puro*” e “*bianco freddo*”.

Agli estremi della scala ci sono il “*bianco caldo*” caratterizzato da una luce bianca giallognola e il “*bianco freddo*” che mostra una luce tendente al blu.

Il “*bianco puro*”, come suggerisce il nome, è più o meno la forma più pura di luce bianca disponibile prodotta dai LED.

Solo i LED con luce nello spettro del bianco-blu sono classificati in questo senso, mentre non lo sono i LED con spettro al di fuori di esso.

5.4.1 Temperatura di Colore

Per capire bene il senso della nomenclatura nella classificazione della luce bianca ci viene in aiuto la definizione di *Temperatura di Colore*: nella sua definizione più basilare, essa è

uno standard di misurazione in gradi Kelvin che si basa sul concetto fisico del "radiatore nero" (Legge di Planck), cioè che assorbe tutta l'energia della luce che urta esso, ma secondo la termodinamica, è anche un emettitore perfetto.

Un buon esempio di questo concetto può essere visto in un pezzo di metallo esposto ad una fonte di calore.

Il metallo, che assorbe calore, emette diversi colori durante il suo riscaldamento.

Diventa rosso quando viene riscaldato, diviene poi arancione come diventa più caldo per infine apparire bianco come la temperatura continua ad aumentare, e così via.

Si può effettivamente determinare una temperatura approssimativa del metallo semplicemente registrando il colore che emette.

Nonostante i LED producano luce mediante un processo diverso dal riscaldamento, usiamo ancora la Temperatura di Colore T_c quando si deve descrivere l'aspetto della luce emessa da un LED.

La T_c , in questo senso, è semplicemente il punto più vicino alla curva del corpo nero di un colore particolare definito dal suo valore di cromaticità nel diagramma cromatico CIE 1931.

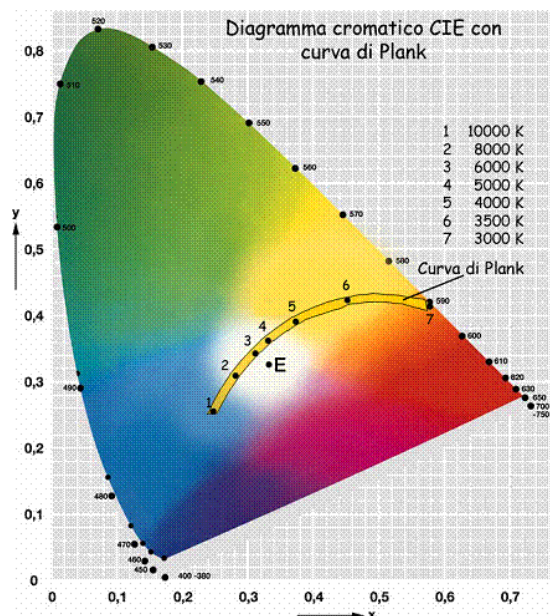


Figura 5.7 Curva di Planck all'interno del diagramma cromatico CIE 1931

Quando il bagliore della luce bianca del LED è leggermente giallo, si è in genere intorno a 3000° Kelvin (K).

A causa della tinta giallastra della luce, questo particolare colore è indicato come "bianco caldo".

Seguendo la classificazione, la luce dei LED appartenente al "*bianco puro*" misura intorno 4500°K e arrivando ad una misura di temperatura della luce bianca intorno a 6500°K o più si trova il colore indicato come "*bianco freddo*".

Naturalmente, può nascere un po' di confusione su questo.

Se la temperatura colore è bassa, perché stiamo ragionando con il termine "*caldo*"? E se è alta, perché stiamo chiamando il bianco come "*bianco freddo*"? È necessario prendere in considerazione la risposta nel senso visivo di come stiamo usando le parole.

La mente umana è stata condizionata per migliaia e migliaia di anni ad accettare che il colore giallo indica il calore e il blu significa freddo. Come tali, le parole "caldo" e "freddo" sono semplicemente gli aggettivi usati per descrivere il tipo di colore emesso.

Per dare una descrizione visiva di ciò:



Figura 5.8 Colore di un corpo nero in funzione della sua temperatura

Temperature di colore più elevate non indicano necessariamente l'appartenenza del LED ad una gamma di qualità superiore, oppure che il LED necessiti di più energia per fare luce. Inoltre non significa che esso sia più luminoso di altri.

Sono le variazioni di diodi come la tecnologia impiegata nel LED che influenzano largamente il prezzo, non il campo di temperatura di colore del LED.

Bisogna tenere anche a mente che i LED non sono perfetti. Ogni diodo ha una leggera variazione della sua temperatura di colore.

I LED di qualità più economico hanno una gamma piuttosto ampia temperatura di colore. Per esempio, un LED bianco caldo potrebbe variare tra 3000-3500 ° K (che è una

differenza abbastanza significativa). LED di alta qualità, invece, hanno una gamma piuttosto stretta, spesso con solamente 150 ° K differenza.

Tipo di luce Bianca	Range di temperatura	Luce emessa	Ottima per...	Esempi
Calda	3000-4500°k	Bianca con una tinta giallognola	Aree che necessitano di bassa intensità di luce	Camere da letto, sale da pranzo, ristoranti, botiques e reception
Pura	4500-6000°K	Bianca	Applicazioni a luce intensa	Sale operatorie, ambienti fotografici, uffici, scuole, fabbriche, negozi
Fredda	6000-7500°K	Bianca con una tinta bluastra	Applicazioni speciali che necessitano di alta intensità luminosa e un una buona resa cromatica	Gallerie d'arte, musei, gioiellerie

Figura 5.9 Classificazione della luce bianca in base alla Temperatura di Colore

5.4.2 Indice di resa cromatica CRI

Nonostante questa descrizione dei colori di tipo qualitativo, non è detto che sorgenti *metameriche* (la cui luce emessa ha le stesse coordinate cromatiche), presentino uno spettro riflesso dal materiale (colore di un oggetto campione) uguale per tutte. Per questo motivo è stato introdotto un indice CRI che permette di indicare quanto più una sorgente luminosa presenta le stesse caratteristiche del sole. Per esempio, una lampada ad incandescenza presenta un CRI pari a 95, una lampada a fluorescenza ha un CRI di 60, mentre i LED permettono di aver CRI intorno a 80.

5.5 Metodi di implementazione dei LED bianchi

Esistono diversi modi con cui i LED vengono utilizzati per produrre luce bianca, ma le tecnologie impiegate sono fondamentalmente due:

- si possono mescolare LED monocromatici per ottenere LED con strutture *multichip*:
 1. *tri-chip* che unisce in un unico package 3 chip
 2. *double-chip* formati da una unica struttura che unisce due LED
- oppure utilizzare dei fosfori che convertano lunghezze d'onda più corte (UV o blu) in blu, verde, giallo o rosso.

5.5.1 LED Multichip

I LED Multichip sono LED che all'interno del package possono contenere 2, 3 o fino a 4 LED chip monocromatici e possono produrre luce di colore variabile tramite software per esempio per la creazione di scenari particolari, oppure luce bianca.

All'inizio degli anni '90, l'uso della tecnica MOCVD per la crescita del materiale epitassiale e delle buche quantiche multiple (MQW) nella costruzione dei LED verdi e blu basati sul GaN ha raggiunto una svolta storica. E la sua luminosità (funzionalità) è stata raggiunta con il LED rosso.

Con il rosso, il verde e il blu esso formava completamente un sistema tricromatico, denominato RGB.

Successivamente nacquero anche i LED bicromatici costituiti da un LED rosso e da uno blu il cui scopo era quello di mescolare due colori tra loro complementari e quelli tricromatici con LED di color ambra, bianco e blu (AWB) o quadri cromatici costituiti da rosso, verde, blu e ambra (RGBA) che sfruttavano il fatto di mescolare tra di loro più colori in modo che la sensazione di colore risultante fosse bianco, ma nonostante ciò i risultati ottenuti non furono soddisfacenti a causa delle elevate sensibilità di cui soffrono queste tipologie di LED.

1.LED Tri-chip (RGB)

Il LED a multichip bianco era dunque in origine realizzato dall'unione di 3 LED monocromatici: uno rosso, uno verde e uno blu, costruiti rispettivamente sulla base di AlGaAs o AlGaInP / GaAs, GaP: N e InGaN e confezionati tutti in un unico package.

Regolando l'intensità luminosa di ogni singola radiazione si è in grado di ottenere una certa tonalità di bianco con un certo CRI e temperatura di colore. L'efficienza luminosa di

questi LED raggiunse i 40lm/W con un indice di resa cromatica CRI pari al 95%.

Ma i difetti di questo primo approccio furono da subito evidenti, caratterizzati dal complesso circuito di pilotaggio del LED e l'elevato costo di questo sistema tricromatico.

Oltretutto all'aumentare della temperatura i parametri ottici dei singoli LED, rosso, verde e blu, subivano dei cambiamenti e col passare del tempo di funzionamento si manifestarono degradi intrinseci sempre più evidenti, quindi il picco delle lunghezze d'onda in uscita del LED bianco subiva variazioni; l'elevata sensibilità al tempo e alla variazione della temperatura di funzionamento e alla corrente di pilotaggio iniettata portarono il LED bianco ad essere molto instabile.

2.LED Double-chip

Photon-recycling Semiconductor LED (PRS-LED)

Il LED ad emissione di luce bianca si può ottenere anche con una struttura basata su un diodo semiconduttore a riciclaggio di fotoni che emette luce, conosciuta come Photon Recycling Semiconductor Light Emitting Diode (PRS-LED).

Il dispositivo è costituito da un LED costruito su GaInN/GaN con emissione spettrale nella gamma del blu e un semiconduttore a riciclaggio di fotoni costruito su AlGaInP che emette luce con spettro di colore complementare.

Il PRS-LED ha quindi due radiazioni luminose di lunghezze d'onda di emissione una nel blu e una nel range di lunghezze d'onda ambra. L'efficienza luminosa teorica del PRS-LED è superiore di 300lm/W rispetto all'efficacia dei LED bianchi basati sulla conversione dei fosfori.

L'emissione di luce vicina al bianco è stata dimostrata utilizzando anche lo stesso LED costruito su GaInN/GaN che emette radiazioni nello spettro del blu e un semiconduttore a riciclaggio di fotoni costruito su AlGaInP/GaAs che emette luce con spettro dal rosso-all'ambro.

La struttura di questo LED bianco è chiamata Cascade Single-Chip Phosphor-Free (CSCPF), LED bianco a singolo chip a cascata senza fosforo. Questa struttura è stata proposta con una etero giunzione a GaAs/GaN con uno strato di bonding diretto. Per quanto riguarda il calcolo di color-matching, questo modello di LED bianco ha dimostrato avere le coordinate cromatiche CIE x,y di circa (0,3, 0,3) a 20mA che, come valore, sul

diagramma cromatico CIE Lxy 1931 alla posizione ideale della luce bianca (1/3,1/3).

Tali LED bianchi senza l'utilizzo di fosforo aveva potenziali vantaggi di elevata efficacia e lunga durata. In particolare, quando due di questi LED sono collegati elettricamente in serie, possono essere alimentati da un unico driver LED a confronto della soluzione LED RGB che necessitava di un driver LED più complesso.

Lo schema della struttura e il diagramma a bande dei LED bianchi in CSCPF di un package a flip-chip è mostrato in Fig.

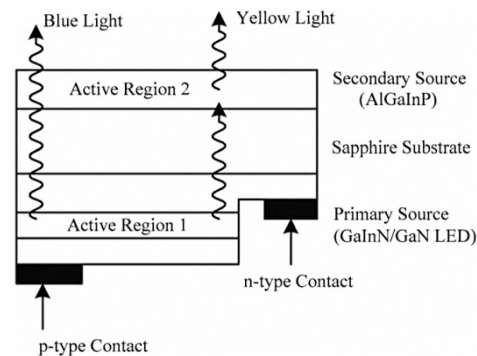


Figura 510 Photon Recycling SemiconductorLED (PRS-LED)

LED a buche quantiche multiple di $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ con co-drogaggio di Si and Zn (MQW-LED)

Le strutture dei LED a buche quantiche multiple (Multi Quantum Well MQW-LED) di $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}/\text{GaN}$ con co-drogaggio di Si e Zn erano cresciute con la tecnica MOVPE. Si osservava una lunghezza d'onda relativa all'emissione della coppia donatore-accettore di 500nm-560nm.

La luce bianca quindi può essere ottenuta dalla combinazione di tale lunghezza d'onda di con l'emissione nel blu data dal InGaN.

Inoltre fu evidente che gli spettri di elettroluminescenza di questi LED sono molto simili a quelli misurati nei LED bianchi con conversione di fosfori. Questi LED erano caratterizzati da una temperatura colore di 6300°K con dei valori delle coordinate cromatiche x,y di 0,316 e 0,312 rispettivamente. Tuttavia, questi LED avevano un'efficienza luminosa bassa rispetto ai LED bianchi con fosfori alla stessa corrente di funzionamento, differenza che può essere attribuita alla scarsa efficienza di emissione nel blu risultante dal co-drogaggio di Si e Zn nella regione delle buche e i limitati centri di ricombinazione per l'emissione radiativi relativi al Zn.

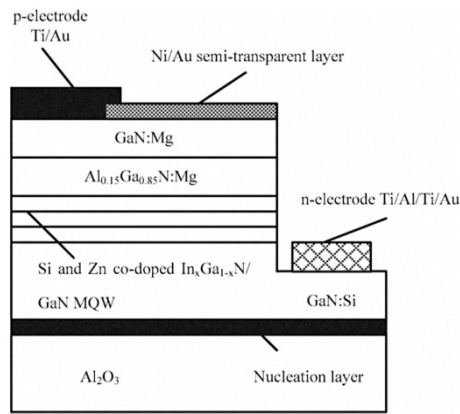


Figura 5.11 Multiple-Quantum Well LED (MQW-LED)

5.5.2 LED con fosfori

I LED con i fosfori, invece, contengono una resina epossidica che viene colata sulla regione attiva del LED chip a UV o a luce blu, in modo da formare un convertitore di luce. Il principio di funzionamento di questo tipo di LED sfrutta dunque la conversione ad opera dei cristalli di fosfori della radiazione incidente in altre radiazioni in modo da allargare lo spettro di emissione in luce visibile.

I vantaggi principali di questo sistema sono di poter raggiungere dei coefficienti di CRI più elevati rispetto al sistema Multichip RGB a scapito però dell'efficienza luminosa, dovuta alla minore efficienza di estrazione a causa della presenza dello strato di fosfori e della forte sensibilità della radiazione emessa in funzione della temperatura.

Nel caso di LED UV, sul chip sono colati fosfori RGB, mentre nel caso di LED blu vengono utilizzati solo fosfori gialli, oppure vengono utilizzati più fosfori, allo scopo fornire uno spettro di emissione globale più ampio e con maggiore qualità cromatiche.

Si classificano nel seguente modo:

1. LED blu con fosfori gialli
2. LED blu con fosfori gialli e rossi
3. LED blu con fosfori rossi e verdi
4. LED UV con fosfori tricromatici

1.LED blu con fosfori gialli

Il metodo più comunemente conosciuto per realizzare LED bianchi con fosfori ed il primo metodo ad essere implementato, è stato quello di utilizzare un LED chip blu costruito su GaN in combinazione con fosforo, incorporato in resina epossidica in modo da formare un convertitore di luce.

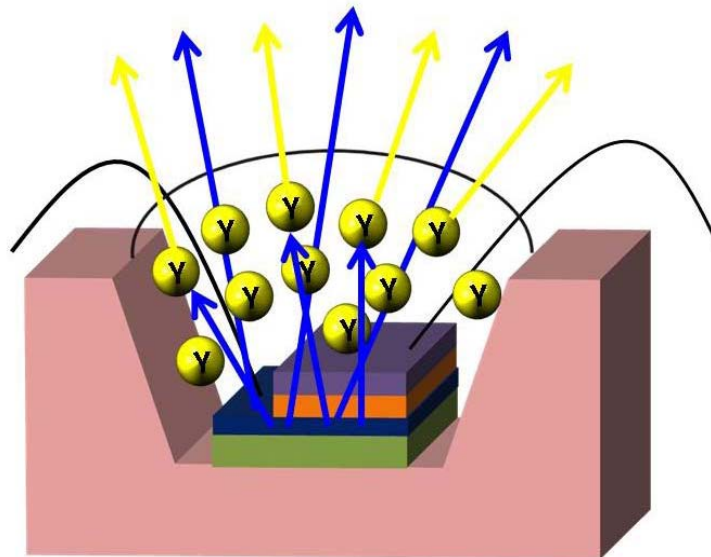


Figura 5.12 LED blu con fosfori gialli

Il materiale, introdotto da Nakamura e Fasol nel 1997, che è usato in applicazioni commerciali per l'emissione del Ce è il $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$ o più brevemente conosciuto come YAG: Ce con struttura granata a luminescenza gialla. (Figura sotto).

Lo **YAG: Ce³⁺** presenta inoltre un'alta resistenza chimica e termica, un potenziale corrosivo molto basso e un'efficienza di estrazione vicina al 100% [8,18].

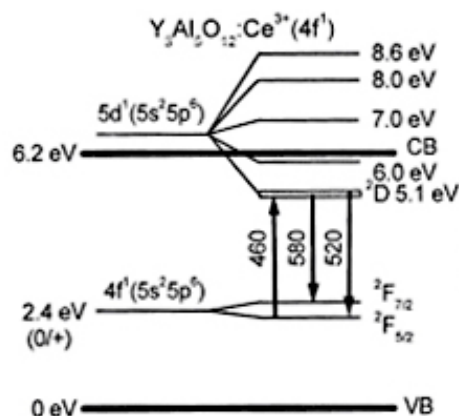


Figura 5.13 livelli energetici di uno strato di fosfori monocromatici

Figura 5.13 rappresenta il diagramma a bande dei fosfori rispetto alla radiazione emessa dalla regione attiva (3.8eV). Si può vedere infatti che la radiazione è in grado di eccitare gli elettroni dallo stato a più bassa energia del livello 4f a quello a più bassa energia del livello 5d (salto energetico di 460 nm) emettendo di conseguenza uno tra due fotoni con lunghezza d'onda pari a 520nm (blu) e l'altro a 580nm (giallo). Questo tipo di fosfori è molto utilizzato quando la regione attiva del LED è composta da AlInGaN in grado di emettere a 465nm, lunghezza d'onda molto vicina ai 460nm (blu) necessari per l'eccitazione dei fosfori. Altra caratteristica importante di questo materiale è dovuta al fatto che il picco del giallo varia da una lunghezza d'onda minima di 560nm ad una massima di 580nm. In questo modo è possibile assegnare al bianco una certa temperatura di colore come si può notare da Figura 5.14

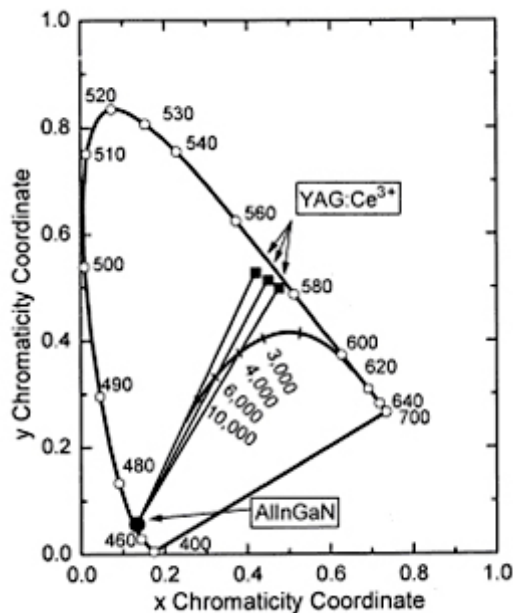


Figura 5.14 Temperatura di colore determinata dalla radiazione emessa dai fosfori

Oltre allo YAG: Ce³⁺ un altro promettente fosforo giallo per i LED è l' Sr_{1.7}Ba_{0.2}Eu_{0.1} SiO₄ (Sr,Ba SiO₄: Eu²⁺).

IL metodo di conversione della luce che sfrutta questi due composti ha una elevata efficienza luminosa, una preparazione semplice ma una mediocre resa cromatica, adatto dunque per ambienti che richiedono alta luminosità ma senza alti requisiti di resa del colore.

2.LED blu con fosfori gialli e rossi

Un altro modo di produrre luce bianca si ottiene aggiungendo del fosforo rosso a quello giallo del tipo precedente.

Negli ultimi anni ha ricevuto molta più attenzione la ricerca sui nitruri di fosforo basati su SiN_4 .

Questo perché i reticoli dei fosfori basati su SiN_4 sono altamente condensate e l'elevata resistenza del legame chimico tra gli elementi costitutivi è il risultato nella straordinaria stabilità chimica e termica del nitruro.

Inoltre, l'elevato legame chimico covalente nei nitruri ed il grande effetto di campo del cristallo dell'anione di azoto da luogo ad una forte espansione della nuvola elettronica provocando elevate emissioni di lunghezze d'onda.

Queste caratteristiche rendono i nitruri basati sui composti $\text{M}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ (con $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$): Eu^{2+} e $\text{MAlSiN}_3: \text{Eu}^{2+}$ (con $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$) i candidati ideali per fosfori rossi.

Mescolando dunque fosfori gialli come $\text{YAG}: \text{Ce}^{3+}$ o $(\text{Sr}, \text{Ba}) \text{SiO}_4: \text{Eu}^{2+}$ e fosfori rossi come

$(\text{Sr}, \text{Ba})_2\text{Si}_5\text{N}_8: \text{Eu}^{2+}$ o $(\text{Sr}, \text{Ca}) \text{SiAlN}_3: \text{Eu}^{2+}$ si ottiene luce bianca con adeguato indice di resa cromatica e moderata efficienza luminosa perfetta per la circostanze in cui dovrebbero essere necessari buoni valori di entrambi i parametri.

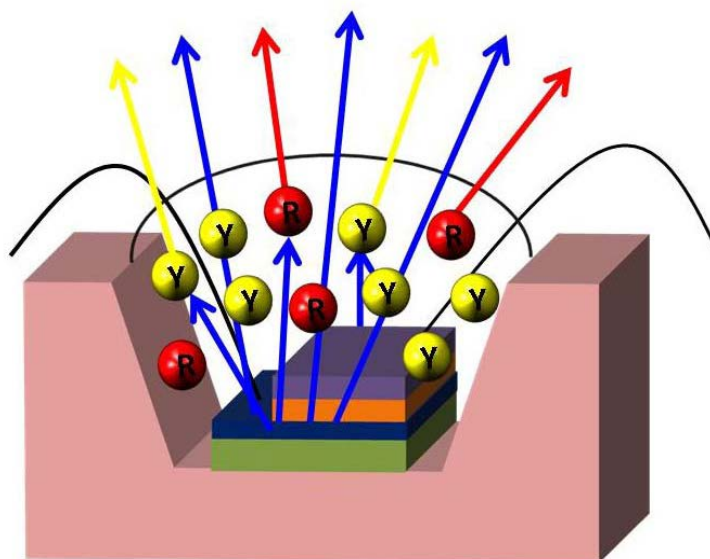


Figura 5.15 LED blu con fosfori gialli e rossi

3.LED blu con fosfori rossi e verdi

Ovviamente, secondo i principi della colorimetria, luce bianca si ottiene anche combinando fosfori rossi e verdi su di un chip LED blu.

Questi ultimi si possono ottenere con il composto $\text{BaSrSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ ottenendo un CRI più elevato a scapito però di una efficienza più bassa.

Un altro composto con luminescenza nel verde è il $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG); nonostante esso abbia una struttura cristallina simile allo YAG, qui il colore di emissione del Ce^{3+} è verde.

Questi composti sono adatti dunque per un luogo che richiede elevata resa cromatica senza aver bisogno di un'elevata efficienza. (Figura sotto)

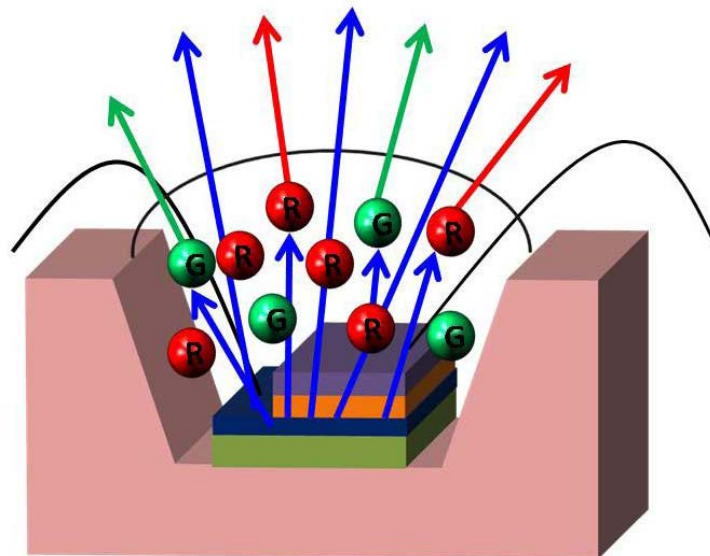


Figura 5.16 LED blu con fosfori rossi e verdi

4.LED UV con fosfori tricromatici

Inoltre, la luce bianca con indice di resa cromatica buona ma bassa efficienza può essere prodotta anche combinando LED con emissione vicina all'UV (nUV/UV) o LED con emissione viola che, come precedentemente menzionato, eccitano fosfori tricolore RGB ma l'efficienza di luminescenza molto bassa, se messa a confronto con i LED blu, ha portato dal punto di vista industriale a preferire i LED bianchi con fosfori costruiti su un chip a luce blu.

Fino ad ora, tuttavia, i fosfori per la conversione della luce del LED blu in luce bianca con indice di resa cromatica elevato ed elevata luminanza non sono stati ancora trovati, come si evince dal punto interrogativo della seguente figura, e questo sarà il campo di lavoro dei prossimi anni per ciò che riguarda i fosfori.

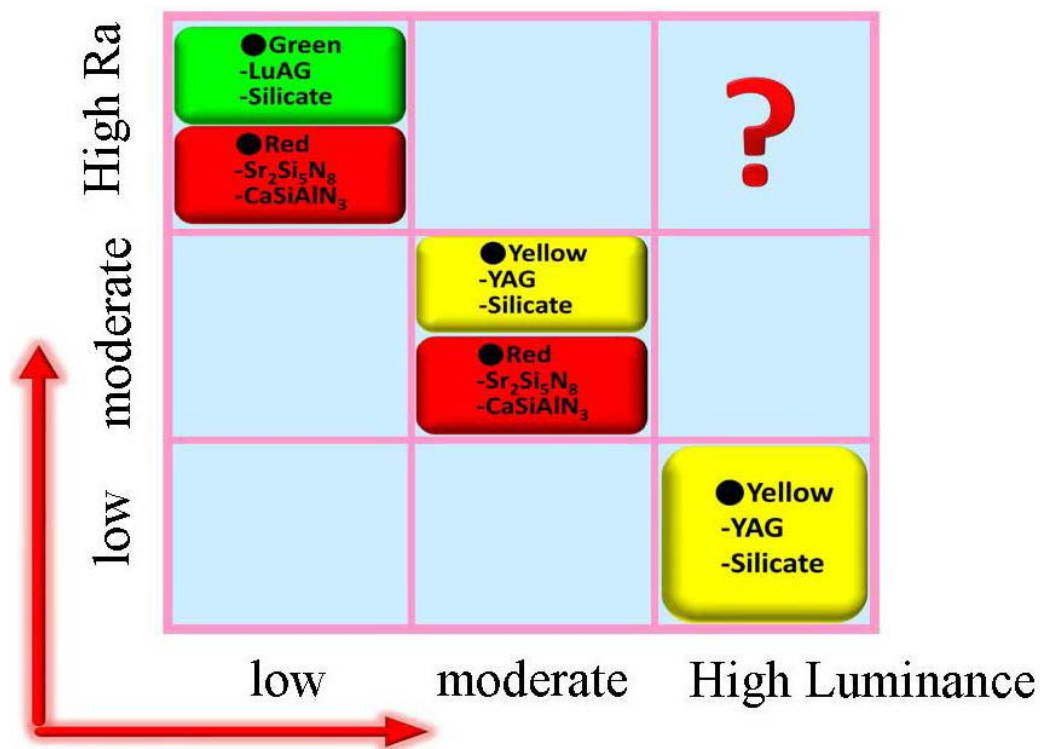


Figura 5.17 Andamento della tecnologia LED con fosfori

5.6 Metodi di deposizione dei fosfori

Un fattore molto importante in grado di determinare le prestazioni del dispositivo in termini di durata, efficienza ottica, coordinate cromatiche e uniformità della radiazione è il modo con cui vengono depositati i fosfori al di sopra della regione attiva di un LED blu.

Esistono principalmente tre metodi di deposizione [19]:

- a) Freely dispersed coating;
- b) Conformal coating;
- c) Remote coating;

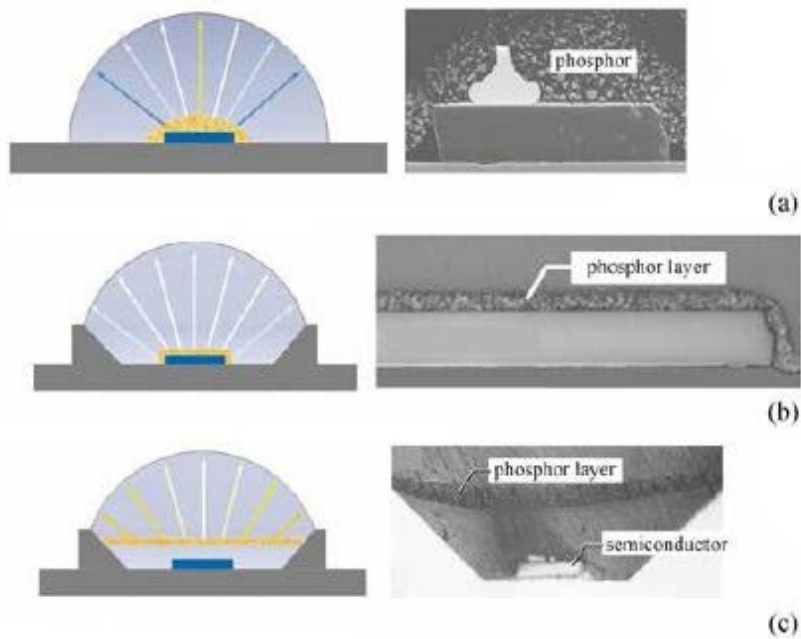


Figura 5.18 a) *Freely dispersed coating*; b) *conformal coating*; c) *remote coating*

Nel primo caso i fosfori vengono mescolati con del silicone in grado di far passare la radiazione blu oltre quella gialla. Questa tecnica è la prima ad essere stata utilizzata per la realizzazione di LED bianchi di potenza e presenta una diversa distribuzione dello spessore sulla superficie del semiconduttore (solitamente una distribuzione convessa). In base allo spessore di fosfori che la radiazione incontra nel suo percorso, in uscita si può avere luce bianca, blu o gialla. Come possibile vedere da *Figura 5.17*, al centro, in cui lo strato di fosfori è spesso, la radiazione è molto vicina al giallo, mentre alle estremità (spessore molto sottile di fosfori) è predominante il colore blu.

Nonostante la radiazione non sia uniforme e i LED non siano molto efficienti, questa tecnica ha il vantaggio di non essere costosa e di poter controllare il volume dei fosfori all'interno del dispositivo.

La tecnica del conformal coating è in grado di depositare un'alta concentrazione di particelle di fosfori in maniera omogenea creando un film sottile (micrometrico) al di sopra della superficie del chip in modo tale (vedi *Figura sopra b*) **indicare numero figura**) che la radiazione emessa sia dello stesso tipo in ogni punto.

Esistono molti metodi per depositare i fosfori secondo questa tecnica; alcune di queste sono lo “slurry”, settling, evaporazione di solventi e il wafer-level coating. Tutti questi metodi cercano di realizzare strati di fosfori sempre più sottili in modo da minimizzarne lo spessore e aumentare l'intensità luminosa in uscita, anche se in questo modo il dispositivo diventa molto più delicato e sensibile a processi di degrado.

Le due tecniche appena descritte consentono di avere ottimi vantaggi in termini di costi grazie soprattutto alla piccola superficie da ricoprire e ad un'alta densità di packaging dei dispositivi; ciò nonostante, il fatto che lo strato di fosfori sia a diretto contatto con la regione attiva, porta ad avere una riflessione interna di circa il 50%-60% [19] di quella emessa dalla regione attiva.

Queste riflessioni portano da un lato al surriscaldamento del LED chip e dunque ad un degrado precoce del dispositivo, dall'altro al degrado di quei materiali, che posti attorno al LED chip, permettono di riflettere nuovamente verso l'esterno la radiazione luminosa.

Un altro inconveniente sta nel surriscaldamento del materiale posto a diretto contatto con la zona calda del chip che provoca un processo di spegnimento (a 120° le particelle calano la loro efficienza quantica del 70%) e successivamente di degrado dei fosfori.

Per ridurre questo tipo di inconvenienti è stata introdotta la tecnica del remote coating (*Figura 5.17*) in grado di depositare un sottile strato di fosfori ad una certa distanza dal chip. Questo permette di diminuire l'assorbimento da parte della regione attiva della luce riflessa dallo strato di fosfori e di mantenere una temperatura inferiore rispetto alle due tecniche precedenti, incrementando inoltre l'intensità luminosa in uscita del 7%-16% rispetto alle altre tecniche.

Per far questo lo strato di fosfori viene depositato con le tecniche del conformal-coating al di sopra di un riflettore ad una certa distanza dal chip. In questo modo però non si riesce ad avere lo stesso strato omogeneo a causa della scarsa aderenza con il materiale riflettente. Un altro svantaggio viene poi dal fatto che nelle zone limitrofe del riflettore la luce attraversa uno strato maggiore di fosfori (emissione nel giallo) variando la distribuzione spaziale del colore (SCD).

E' possibile, oltre un remote-coating di tipo planare, distribuire lo strato di fosfori su di una superficie convessa:



Figura 5.19 Remote coating disposto su di una superficie convessa

In questo modo l'uniformità della distribuzione dei colori può essere migliorata del 70% mantenendo un'alta emissione luminosa. Nonostante questo però, la deposizione dei fosfori è ancora molto difficile a causa della scarsa aderenza con superfici convesse. In base a tutte queste considerazioni, la tecnica più utilizzata in questi ultimi anni (nonostante i costi) è la conformal-coating per l'ottima omogeneità nella distribuzione della luce (specifica molto importante nella fabbricazione di lampade a LED).

6. Struttura di un pannello LCD

6.1 Introduzione

I display LCD (Liquid Cristal Display) vengono così chiamati perché utilizzano il cristallo liquido come elemento fondamentale. Le molecole di un cristallo liquido possiedono un comportamento intermedio tra quello di un solido cristallino e quelle di un liquido isotropo.

Il *solido cristallino* è caratterizzato da un *ordine posizionale* tridimensionale delle molecole e da un *ordine orientazionale* delle molecole. I centri di gravità delle molecole sono disposti su un reticolo cristallino e le loro orientazioni sono ben definite e fisse. Inoltre, le molecole possono solo compiere piccole oscillazioni rispetto alle posizioni di equilibrio. Invece, il *liquido anisotropo* è caratterizzato da un *totale disordine posizionale e orientazionale* delle molecole. I centri di gravità delle molecole e le loro orientazioni sono disposti in modo casuale nello spazio e le molecole sono libere di muoversi e di ruotare. Nel cristallo liquido le molecole pur avendo una certa libertà traslazionale, tendono ad assumere posizioni e orientazioni preferenziali, in cui le molecole hanno un elevato ordine posizionale ed orientazionale e mostrano pochissimi gradi di libertà traslazionale. Infatti, il cristallo liquido è formato da una serie di molecole di forma allungata che orientano il loro asse maggiore parallelo a quello delle molecole adiacenti. Perciò, collocando il cristallo liquido su una superficie finemente corrugata è possibile controllare l'allineamento delle molecole.

I display LCD utilizzano una tecnologia di tipo trasmissivo a valvola di luce, cioè la luce bianca è filtrata ottenendone una scala di grigi, perché è variata la luce che passa attraverso il dispositivo. Inoltre, i vari colori sono ottenuti filtrando questa radiazione.

Un pannello LCD è formato dunque da un insieme di cristalli liquidi compresi tra due superfici finemente corrugate. Le corrugazioni di una superficie sono perpendicolari a quelle dell'altra, infatti, se le molecole prossime ad una superficie hanno direzione nord-sud, quelle vicine alla superficie opposta hanno direzione est-ovest e le molecole intermedie risultano ruotate nella direzione intermedia (Fig. 6.1).

Perciò, la luce che passa attraverso il dispositivo segue l'orientamento delle molecole e subisce una rotazione di 90°.

Applicando un campo elettrico al cristallo liquido, le molecole si dispongono tutte nella medesima direzione e la luce che transita nel dispositivo non subisce una rotazione della polarizzazione (Fig. 6.2).

Esternamente al sistema formato dalle due superfici corrugate e dal cristallo liquido, vengono posizionati, a 90° tra loro, due filtri polarizzatori di luce. Se la tensione è nulla, la luce passa attraverso il primo filtro, viene polarizzata, passa attraverso il cristallo liquido dove subisce una rotazione della polarizzazione pari ad un angolo retto e, infine, attraversa il secondo filtro. Se, invece, si applica una tensione non nulla al cristallo liquido, la luce non riesce a transitare attraverso il secondo filtro, infatti, la radiazione dopo aver attraversato il primo filtro passa inalterata per il cristallo liquido e viene, quindi, bloccata dall'ultimo filtro.

Per mantenere basso il consumo di energia, si preferisce che il passaggio della luce avvenga quando non vi è tensione applicata.

Il pannello LCD viene considerato uno switch ottico.

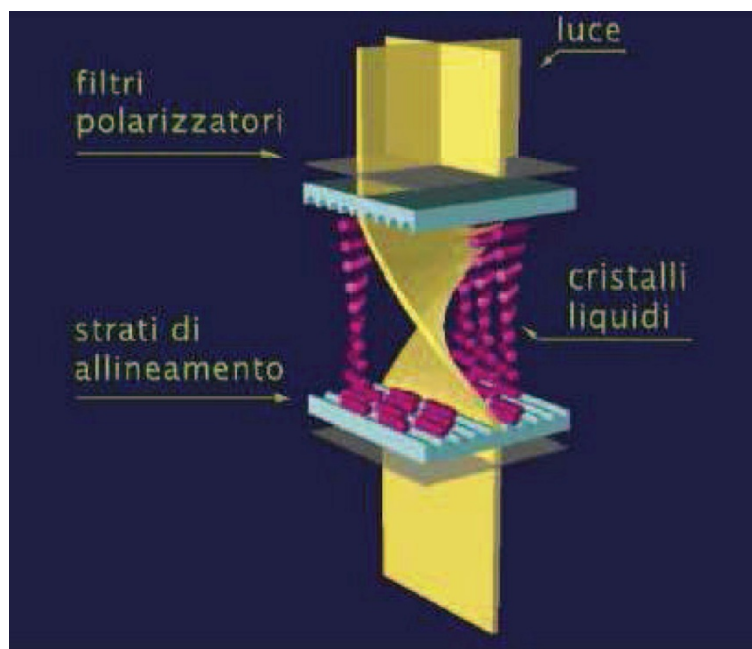


Fig 6.1 Orientamento dei cristalli liquidi. I cristalli liquidi ruotano di 90° perché le corrugazioni delle due superfici sono perpendicolari tra loro. Anche la luce che attraversa il dispositivo subisce tale rotazione

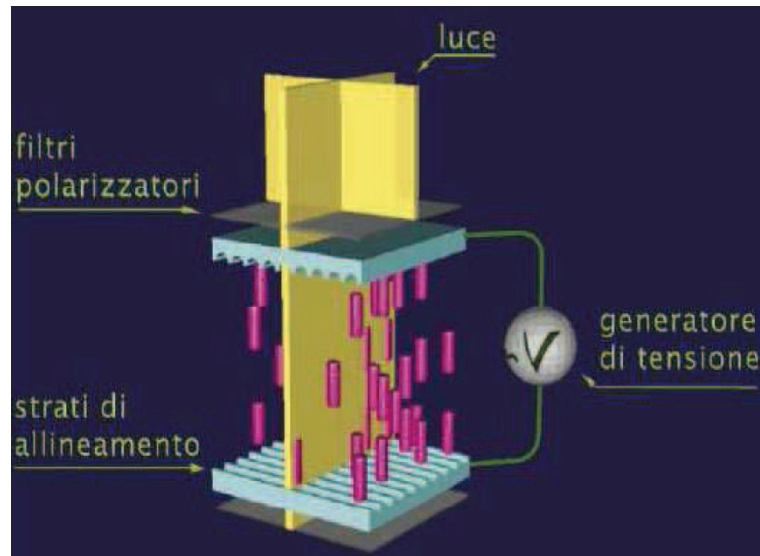


Fig. 6.2 Un campo elettrico viene applicato ai cristalli liquidi che si dispongono tutti nella medesima direzione verticale. Non vi è rotazione della polarizzazione della luce.

6.2 Display a matrice passiva e attiva

Un pannello LCD a matrice passiva può essere di tipo TN (Twisted Nematic) o DSTN (Double Super Twisted Nematic). Il pannello è formato da un insieme di strati di differenti materiali che possono essere distinti in due elementi separati (Fig 6.3):

1. Il primo elemento è formato da: un substrato di vetro con superficie in ossido di metallo che grazie alla trasparenza non compromette la qualità dell'immagine, una griglia di elettrodi necessari per attivare i singoli elementi dello schermo e da uno strato polimerico formato da solchi paralleli che permettono l'allineamento delle molecole del cristallo liquido.
2. Il secondo elemento è formato da: un substrato di vetro, uno strato di polimero munito di solchi e degli spaziatori che mantengono uniforme la distanza tra i due elementi.

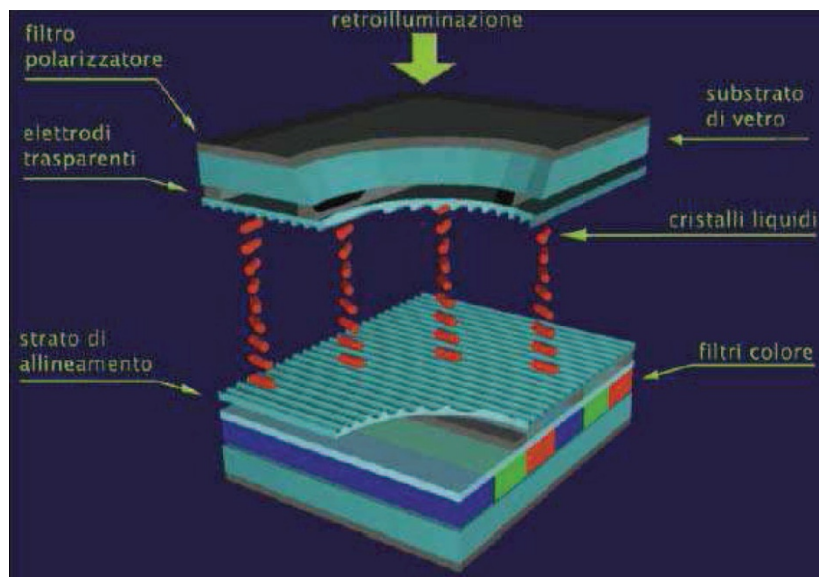


Fig. 6.3 Struttura di un pannello LCD in cui si possono osservare i due elementi che lo compongono

Queste due strutture sono saldate lateralmente tra loro per mezzo di una resina epossidica e il cristallo liquido è iniettato nell'intercapedine. Poi, il sistema viene sigillato e vengono posizionati gli strati polarizzatori esterni.

L'orientamento degli strati di allineamento varia da 90° a 270° in base alla rotazione totale del cristallo Liquido.

La retroilluminazione del pannello può avvenire tramite l'utilizzo delle CCFL (Cold Cathode Fluorescent lamps) che sono lampade a catodo freddo e vengono posizionate sui bordi superiore e inferiore del pannello oppure per mezzo di LED di potenza che possono essere bianchi, RGB (Red-Green-Blu) oppure Led blu con l'utilizzo di un foglio convertitore di luce a fosfori. La luce è poi distribuita in modo uniforme sull'intera superficie del monitor per mezzo di guide luce.

Uno schermo VGA (Video Graphics Array) è costituito da una griglia di elettrodi organizzati in righe e colonne. Per indirizzare i singoli pixel, le righe vengono attivate in sequenza, perciò ogni riga è attiva solamente per un breve periodo di tempo durante il rinfresco dello schermo.

Alcuni problemi che si riscontrano in un display a matrice passiva sono: la lentezza nella risposta degli LCD che non sono in grado di eseguire cambiamenti veloci dell'immagine e l'interferenza tra le aree dei pixel accesi e di quelli spenti appartenenti alla medesima riga o colonna causano quindi una sovrapposizione delle immagini chiamata ghosting.

Per migliorare i tempi di risposta lo schermo è organizzato in due parti in cui il rinfresco viene eseguito in modo indipendente. Questa tipologia di schermi è chiamata DSTN (Double Super Twisted Nematic). Per ottenere pannelli LCD a colori sono stati aggiunti dei filtri colorati (rosso, verde, blu) in modo tale che ad ogni pixel corrispondano tre elementi colorati. Il livello di luminanza per ciascun pixel è ottenuto variando la tensione applicata al cristallo liquido. Infatti, la posizione delle molecole del cristallo e, quindi, anche la quantità di luce che transita, è proporzionale alla tensione applicata.

Per le applicazioni multimediali in cui è importante la fedeltà cromatica, esistono delle tecniche che modificano i livelli di luminanza nel corso di tre o quattro rinfreschi consecutivi dell'immagine.

Nel display a matrice attiva o TFT (Thin Film Transistor), invece, ad ogni elemento di ciascun pixel è associato un transistor. In questo modo vengono eliminati i problemi di ghosting e di bassa velocità di commutazione: i tempi di risposta sono di circa 25 ms contro i 300 ms dei DSTN, i rapporti di contrasto vanno da 200:1 a 400:1, rispetto ai 40:1 dei DSTN e la luminanza è compresa tra 200 e 250 cd/m².

I TFT risultano essere più leggeri e veloci nelle commutazioni rispetto ai DSTN, ma hanno costi di produzione più elevati. L'intera matrice di transistor viene realizzata su un singolo wafer di silicio, perciò se delle impurità danno origine a pixel difettosi, l'intero wafer deve essere scartato.

I pixel difettosi "accesi" appaiono come degli elementi rossi, blu o verdi su fondo completamente nero, mentre i pixel "mancanti" o "morti" si vedono come neri su sfondo bianco. La presenza di pixel accesi risulta essere il difetto più frequente a causa della cortocircuitazione dei transistor. Nel 1996 viene introdotto un nuovo tipo di cristallo liquido in cui le molecole sono orientate verticalmente (VA, Vertical Aligned). Quando non vi è applicata una tensione, le molecole risultano perpendicolari al substrato e l'immagine è nera, mentre se viene applicata una tensione le molecole sono disposte orizzontalmente e l'immagine risulta bianca. Quando non vi è tensione applicata, anche le molecole in prossimità del substrato sono disposte in posizione verticale, questo fatto

migliora la qualità del nero e l'angolo di visione (140° in tutte le direzioni) ed il contrasto (fino a 300:1).

Ulteriori migliorie avvengono con l'utilizzo della tecnologia MVA (Multi – domain Vertical Alignment). Gli angoli visivi risultano maggiori (160°), il contrasto arriva a 500:1 e la luminanza è di 250 cd/m².

La durata di un pannello TFT è di circa 60 mila ore e dopo questo tempo si spegne, invece un display a raggio catodico CRT non si spegne, ma subisce nel tempo un calo della luminanza dopo 40 mila ore di funzionamento.

6.3 Struttura ottica di un pannello LCD

La struttura tipica di un LCD TFT è costituita da un pannello LCD e da una BLU (BackLight Unit, sistema di retroilluminazione). Quest'ultima è la sorgente di luce dell'LCD ed è composta da vari componenti necessari per riflettere e ridistribuire la luce emessa dalle CCFL o dai LED in modo da garantire un'illuminazione uniforme del display. Le parti che caratterizzano il modulo di retroilluminazione sono (Fig. 6.4):

- Un film riflettente
- La guida luce (nel caso la BackLight Unit utilizzi un'illuminazione di tipo “edge”)
- La sorgente luminosa
- Un film diffusore
- V-BEF, H-BEF e D-BEF

Sopra questa struttura è posizionato il pannello LCD.

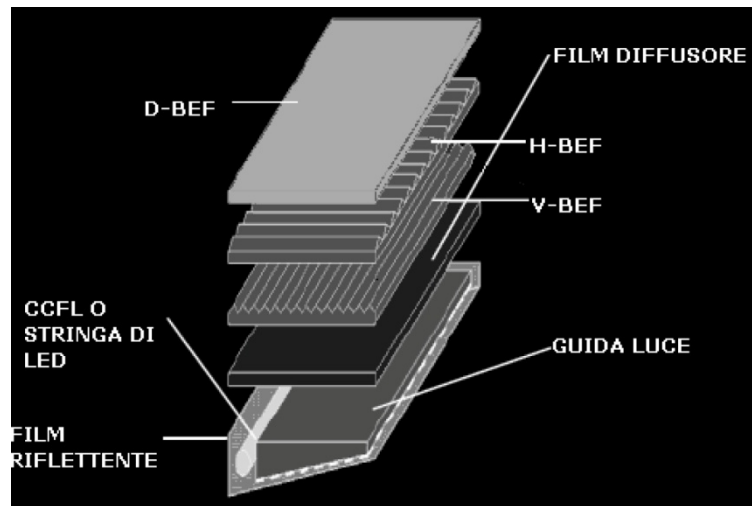


Figura 6.4 Struttura tipica del sistema di retroilluminazione di un monitor LCD TFT

Il **film riflettente** è un elemento base della BLU. La funzione di questo film è quella di riflettere e recuperare la luce che fuoriesce dalla guida luce dalla parte opposta a quella di emissione del monitor (Figura 6.5). Il materiale grezzo tipicamente utilizzato nella realizzazione del riflettore è il PET (poliestere). Vi sono due tipi di film riflettenti: un foglio riflettente bianco, chiamato Kimoto, e l'Enhanced Specular Reflector (ESR).

Quest'ultimo è un film riflettore polimerico sottile, ha una riflettività di circa il 98.5% su tutto lo spettro visibile, indipendentemente dall'angolo di incidenza. L'ESR dovrebbe essere utilizzato in combinazione con il Brightness Enhancement Films (BEF) ed il Dual Brightness Enhancement Films (DBEF) per aumentare ulteriormente l'efficienza del display. Poiché entrambi i film hanno una funzione di riciclaggio, una porzione elevata della luce avrà diverse interazioni con il riflettore nel sistema. Utilizzando un riflettore molto efficiente si avrà un guadagno di luminosità molto più elevato.

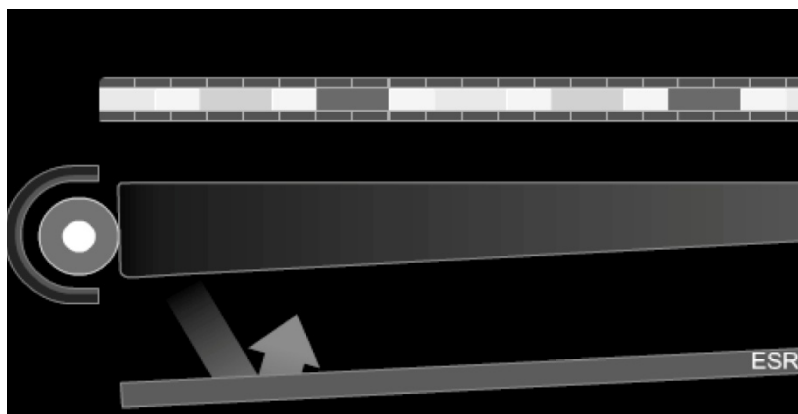


Figura 6.5 Riflessione della radiazione luminosa sull'ESR

La **guida luce** è un componente strutturale utilizzato per guidare e disperdere la luce dalla sorgente attraverso l'intera superficie frontale della BLU. Il materiale più utilizzato per realizzare questo dispositivo ottico è il PMMA (PolyMethyl MethAcrylate), che verrà analizzato in seguito. La guida luce può essere lavorata sulla superficie realizzando delle microstrutture che permettano la fuoriuscita della luce ad un'angolazione prossima alla normale alla superficie. Questo, permette di eliminare parte dei fogli ottici posizionati sopra di essa e, quindi, di ridurre i costi.

Il **film diffusore** è formato da particelle che riflettono la luce incidente in modo tale che la luce in uscita sia scatterata ad angoli casuali. E' realizzato in PET o in policarbonato ed ha lo scopo di scatterare la luce proveniente dalla guida luce per avere maggior uniformità luminosa sul monitor.

I **V-BEF e H-BEF** sono dei fogli di prismi posizionati ortogonalmente tra loro. Il BEF ha una struttura a prisma che gestisce l'angolo di uscita della luce dal pannello.

Questo dispositivo lavora per mezzo della rifrazione della luce, proveniente dalla sorgente, verso lo spettatore e riflettendo la maggior parte della luce residua nel display, dove viene riciclata (Figura 6.6). Grazie all'utilizzo di un questo film l'angolo di visualizzazione è compresso in una sola direzione, aumentando la luminosità dello schermo fino al 60%. Utilizzando due fogli incrociati a 90°, è possibile aumentare la luminosità dello schermo fino al 120%. L'angolo di visualizzazione può essere influenzato dalla geometria del prisma. I BEF devono essere usati in combinazione con il Dual Brightness Enhancement Film (DBEF) e con l'Enhanced Specular Reflector (ESR), per aumentare ulteriormente l'efficienza del display. Lo scopo è quello di ottimizzare la luminosità in asse del display.

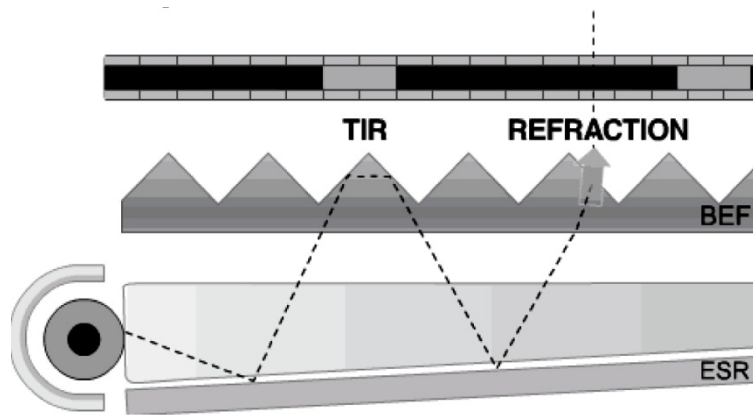


Figura 6.6 Andamento della radiazione luminosa con l'ausilio di un BEF. Si notano i fenomeni di riflessione interna totale e di rifrazione

Analizziamo più in dettaglio il comportamento dei BEF. Innanzitutto, la luce incidente viene trasmessa all'angolo desiderato per il 36,8%, il 5,1% viene perso perché la radiazione viene trasmessa ad un angolo troppo elevato, mentre il flusso luminoso rimanente viene riciclato per il 46,3% e riflesso da un altro prisma per l'11,8%. Dalla figura 6.7 è possibile vedere il percorso della radiazione. Il guadagno, G , che si ottiene attraverso l'uso del BEF è dato da:

$$G = \frac{\text{Potenza totale}}{\text{Potenza senza il BEF}} = t + RR't + (RR')^2t + \dots$$

Dove t è la parte di radiazione incidente che viene trasmessa dal BEF all'angolo desiderato, R è la parte di luce riflessa e R' è la frazione di radiazione riflessa dalla cavità con una perdita $L_c = 1 - R'$. E' possibile scrivere il guadagno nel modo seguente:

$$G = \frac{1}{(1 - RR')}$$

Dopo 5 riflessioni si ottiene in uscita dal sistema ottico munito di BEF, ben il 99% di guadagno (Figura 6.8).

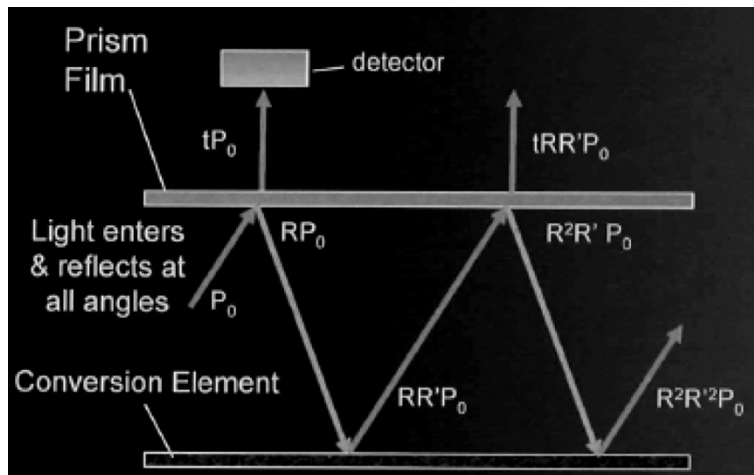


Figura 6.7 Andamento della radiazione in presenza di un BEF sopra la guida luce

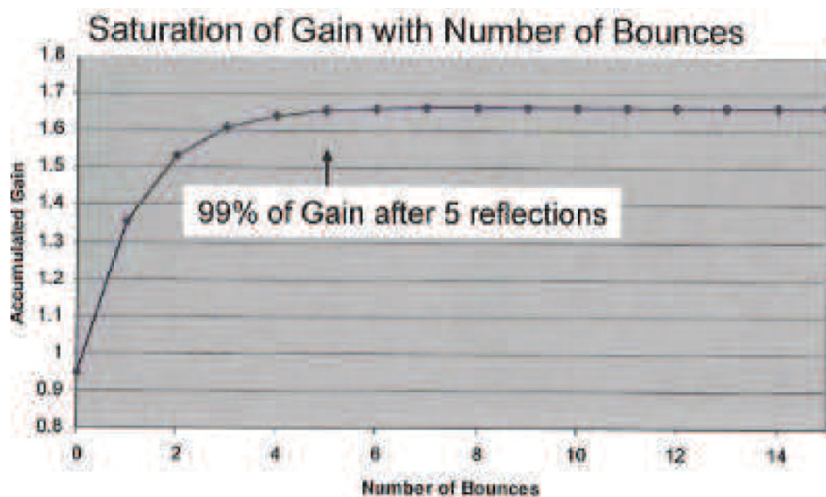


Figura 6.8 Guadagno in uscita dal sistema ottico munito di BEF dopo varie riflessioni

Il **Dual Brightness Enhancement Films** (DBEF) è un polarizzatore riflettente. I polarizzatori riflettenti gestiscono la luce nello schermo trasmettendo una polarizzazione e riflettendo le altre all'interno del display (Figura 6.9). Questa luce, che dovrebbe essere assorbita dal polarizzatore posteriore del cristallo liquido ($\pm 50\%$), viene riciclata, aumentando l'importo complessivo di luce che esce dal display. Lo schermo risulta più luminoso senza incidere sull'angolo di visualizzazione.

Un'alternativa al D-BEF, che ha un costo molto elevato, è l'uso di un altro film diffusore nei pannelli LCD dai 32 ai 40 pollici.

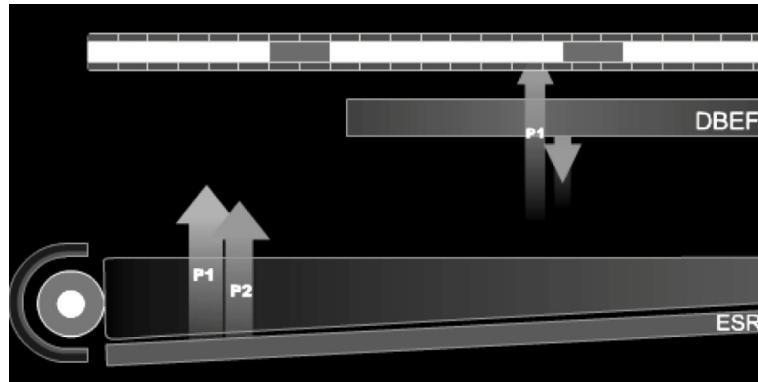


Figura 6.9 Mostra il passaggio attraverso il DBEF di un'unica polarizzazione, mentre l'altra viene riflessa

6.4 Retroilluminazione nei pannelli LCD

I pannelli LCD possono essere di tipo riflessivo, perché non generano la luce, ma modulano la radiazione incidente esterna che ricevono frontalmente o che li attraversa, o trasflettivi ossia che utilizzano una sorgente di illuminazione propria.

I display trasflettivi sono muniti di una sorgente luminosa posta sul retro del pannello (BLU, BackLight Unit). Esistono diversi modi di generare la luce nella BLU mediante l'utilizzo di:

- CCFL
- UFL CON FOSFORI REMOTI
- LED BIANCHI
- LED BLU CON FOSFORI REMOTI

6.4.1 Retroilluminazione a CCFL

Per molti anni e nella maggior parte dei casi la luce è stata fornita da una lampada fluorescente a catodo freddo, CCFL, e attraverso un sistema di diffusione della luce, questa era distribuita in modo uniforme sul retro del pannello. Il sistema necessario per rendere la

luce uniformemente distribuita era costituito da un foglio riflettente, una guida luce e uno stack ottico (diffusore, due fogli di prismi e diffusore) (Figura 6.10).



Figura 6.10 Sistema per la retroilluminazione di un pannello LCD. La sorgente luminosa utilizza CCFL

Se le dimensioni del pannello aumentano oltre i 15 pollici o si richiede luminanza superiore alle 100-200 cd/m², vengono utilizzate più CCFL, posizionate su più lati della guida luce.

Se invece i pannelli richiedono una luminanza ancora più elevata ed hanno dimensioni maggiori di 20 pollici, viene realizzata una matrice di lampade che viene posizionata sul retro del pannello, senza l'utilizzo della guida luce, formando quindi una BackLight diretta (Direct BLU).

Questo aumenta sia l'efficienza che la massima intensità luminosa del sistema.

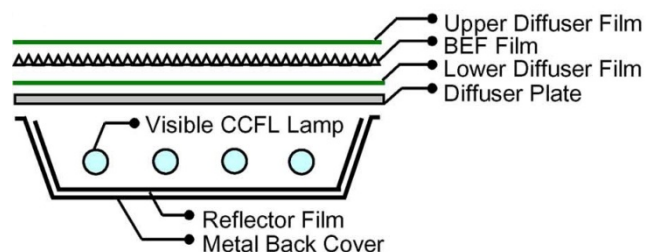


Figura 6.11 Direct Back Light Unit con lampade CCFL

Le CCFL sono lampade di dimensioni compatte che emettono raggi UV con lunghezza d'onda di 253-254 nm. L'emissione avviene nel momento in cui una corrente di elettroni percorre una miscela composta da gas rari e vapori di mercurio. La radiazione che fuoriesce passa attraverso i fosfori che sono depositati sulla superficie interna del tubo e viene trasformata in radiazione luminosa nello spettro del visibile.

6.4.2 Retroilluminazione a UFL con fosfori tricromatici

In alternativa all'illuminazione a CCFL si è cercata una soluzione che adotta delle lampade identiche alle CCFL ma che emettono verso l'esterno raggi UV in quanto prive dei fosfori depositati sulla superficie interna del tubo; la radiazione luminosa è convertita in radiazione con spettro nel visibile grazie ad un foglio di fosfori remoti tricromatici, (Remote Phosphor Converter RPC), formato rispettivamente da fosforo rosso di $Y(P,V)O_4 : Eu^{2+}$ di lunghezza d'onda 620 nm, fosforo verde di $BaMg_2 Al_{10} O_{17} : Eu^{2+}, Mn^{2+}$ di lunghezza d'onda 515nm e fosforo blu di $Sr_5(PO_4)_3Cl : Eu^{2+}$ di lunghezza d'onda 450nm, che viene messo assieme al pacchetto ottico come mostrato in figura.

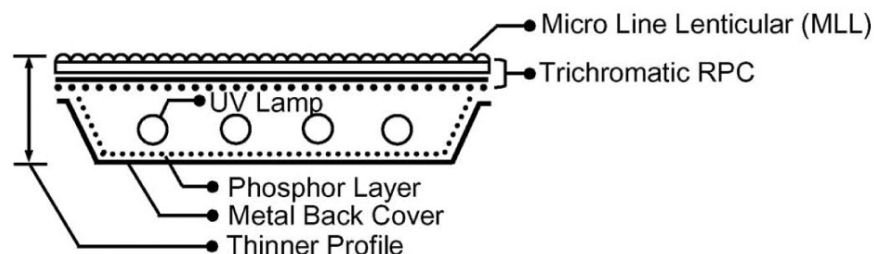


Figura 6.12 Direct Back Light Unit con UV Lamp e fosfori tricromatici

La configurazione con UFL e RPC ha dimostrato avere un elevati valori del coefficiente di resa cromatica CRI e di luminanza e una diffusione della luce molto più uniforme rispetto alle lampade CCFL come mostrato nella seguente figura.

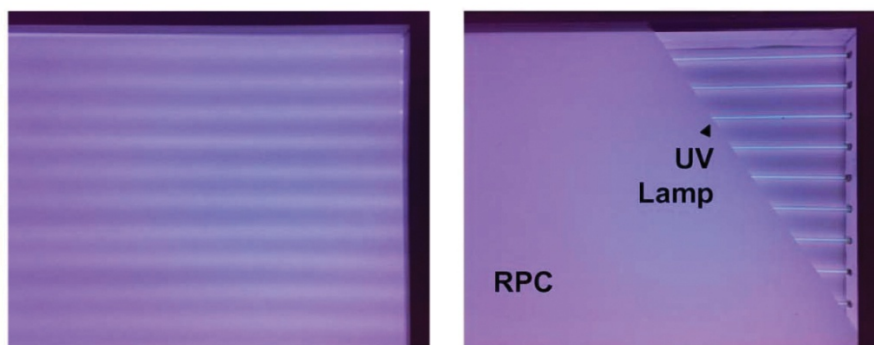


Figura 6.13 Confronto tra il sistema diffusore con CCFL e diffusore con UV Lamp e RPC

Ciò nonostante si sono preferite altre sorgenti luminose per la retroilluminazione dei pannelli LCD a causa dei seguenti svantaggi legati all'uso di questi tipi di lampade:

- Lo spettro della luce emessa è carente della componente relativa al rosso a causa della scarsa efficienza di conversione della banda del rosso
- Necessitano di tensioni di alimentazione alternate elevate: è utilizzato un inverter per aumentare la tensione di alimentazione disponibile nella maggior parte delle applicazioni
- Il tempo di vita delle CCFL o UFL è limitato
- Sono fragili dal punto di vista meccanico
- Contengono mercurio che è vietato dalla normativa RoHS
- Sono facilmente influenzabili dalla temperatura ambiente

6.4.3 Retroilluminazione a LED

Oggigiorno, i LED sono i più utilizzati per la retroilluminazione dei pannelli LCD perché rispetto alle CCFL o UFL hanno maggiore potenza ottica emessa ed efficienza luminosa e spettro di colori migliore dal punto di vista qualitativo.

La struttura del sistema di retroilluminazione che utilizza i LED è sostanzialmente uguale a quello con CCFL in cui la lampada è sostituita con una fila di LED o con più file di LED se è richiesta una elevata luminosità.

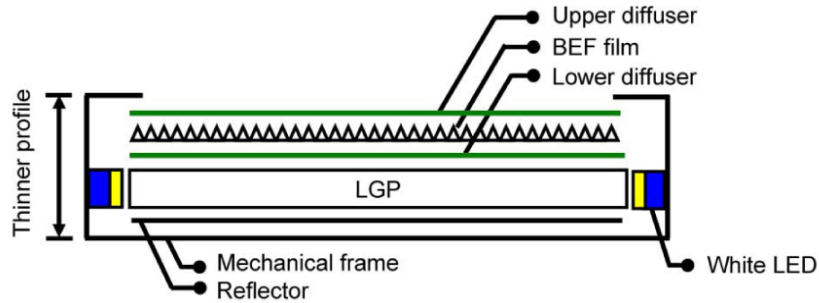


Figura 6.14 LED bianchi posto ai lati della guida luce

Per applicazioni esterne con dimensioni che superano i 32 pollici, si sono realizzati display privi di guida luce: una matrice di LED viene posizionata direttamente sul retro del pannello (Direct BLU) e la luce viene poi diffusa e polarizzata in modo opportuno.

Anche se successivamente sono sorte delle problematiche legate all'uso della direct BLU a causa dell'aumento del costo legato alla retroilluminazione (ad esempio le dimensioni elevate della PCB) e del numero elevato di componenti che rende critica la dissipazione del calore, le prestazioni di luminanza risultano molto elevate ed i sistemi con guida luce trovano difficoltà nel competervi.

Le motivazioni quindi che portano all'utilizzo dei LED al posto delle CCFL sono:

- Aumentare la luce emessa dal pannello grazie all'utilizzo di sensori
- Eliminare le problematiche legate alla presenza del mercurio
- Aumento del tempo di vita medio del sistema in applicazioni ad elevata luminanza
- Facilità nell'ovviare a guasti sul sistema di retroilluminazione

Per applicazioni di elevata luminanza il LED aumenta il tempo di vita medio del sistema infatti attraverso sistemi di controllo che elaborano dati provenienti da sensori di temperatura, luminosità dell'ambiente e del pannello è possibile variare la corrente con cui

alimentare le stringhe di LED durante il funzionamento del monitor. La vita del LED è variabile, perché dipende dalla temperatura di giunzione.

Se la luminosità dell'ambiente in cui è posto il display è molto elevata, per esempio perché il display è posizionato frontale ad una fonte luminosa o al sole se è un display outdoor, è possibile aumentare la corrente fornita alla Back Light Unit per aumentare la luminosità del pannello e permettere così la visualizzazione delle immagini.

Questo causa però un aumento della temperatura di giunzione e quindi un abbassamento della vita totale. In ogni caso per la maggior parte della giornata la luminosità richiesta sarà inferiore a quella necessaria nelle ore più soleggiate. Dimensionando correttamente il sistema di dissipazione è possibile garantire un tempo di vita elevato dei LED durante tutto il periodo di funzionamento dell'applicazione.

Un altro vantaggio della tecnologia a LED sta nella maggiore facilità nell'ovviare a guasti sul sistema di retroilluminazione.

Organizzando in modo corretto la posizione dei LED fra le varie stringhe, in caso una di queste si spegnesse, è possibile aumentare il flusso luminoso emesso dalle stringhe adiacenti e attraverso dei filtri diffusori garantire uniformità e luminanza accettabili sul pannello.

1. Retroilluminazione a led bianchi

Come si è già detto, i LED bianchi con tecnologia fosfori sono costituiti da un LED chip la cui regione attiva è coperta da una resina epossidica contenente cristalli di fosfori. I led maggiormente utilizzati nella retroilluminazione dei display sono costituiti da un LED chip blu con resina di fosfori gialli. (Figura sotto).

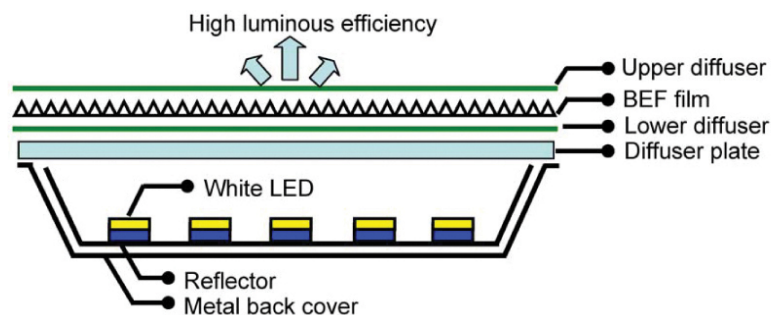


Figura 6.15 Direct Back Light Unit formata da LED bianchi formati da LED chip blu con fosfori gialli

Mentre i fosfori sono racchiusi all'interno del package del LED chip, una porzione significativa della luce blu emessa dal LED viene sparpagliata, riflessa all'indietro dai cristalli di fosfori, assorbita dal LED chip e dunque persa. Inoltre, l'elevata temperatura di funzionamento del LED causa la tempra termica, che riduce l'efficienza di radiazione luminosa dell'intero LED.

2. Retroilluminazione a fosfori remoti

La tecnologia a fosfori remoti, come dice la parola stessa, ha luogo quando i fosfori sono separati e posti distante dal LED chip.

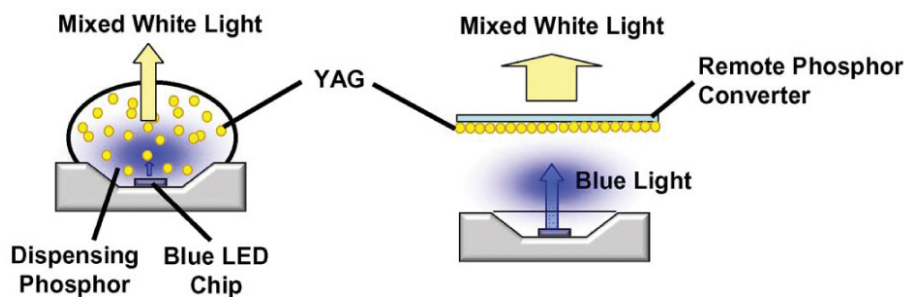


Figura 6.16 Differenza d'implementazione dei fosfori gialli: a sinistra LED bianco ottenuto con fosfori depositi sopra un LED chip blu, a destra LED blu con fosfori remoti

Figura 1 dei due tipi di led(blu +fosfori e blu con fosfori remoti) documento pdf: Planar Lighting....

Uno dei vantaggi che risulta subito evidente è quello di poter estrarre una porzione di luce che prima era riflessa all'indietro verso il LED chip dai cristalli di fosfori intrappolati nella resina.

Il fotone o la porzione di luce che viene riflessa all'indietro dai cristalli di fosfori ora rimbalza contro l'ESR o il Kimoto che riveste tutta l'area della matrice che sta attorno ai LED, viene riflessa e viene nuovamente presentata al foglio di fosfori; qui il fotone colpisce i cristalli di fosfori che eccitandosi convertono il fotone blu incidente in luce bianca oppure rimbalza nuovamente verso la matrice di LED della BackLight Unit e dà il via ad un altro processo di riflessione.

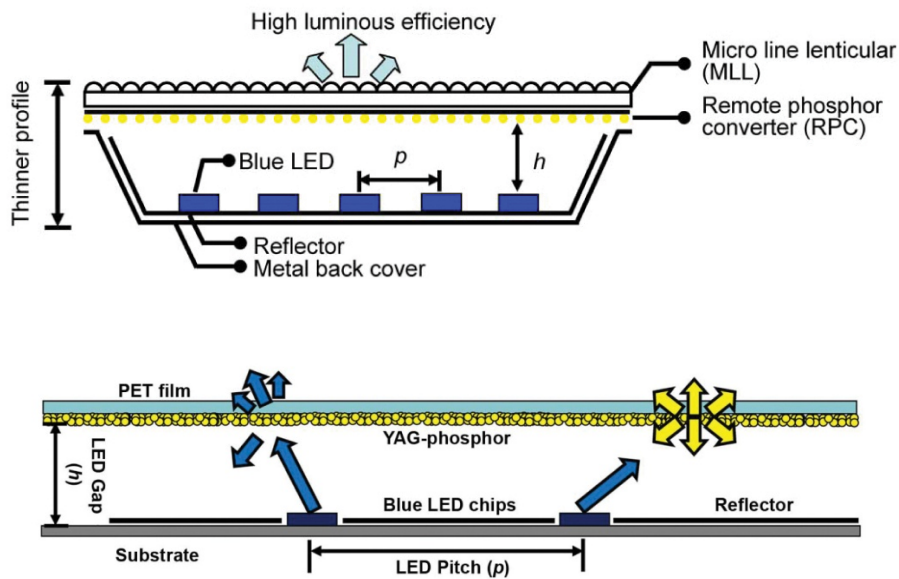


Figura 6.17 Direct Back Light Unit con tecnologia fosfori remoti: le riflessioni vengono non colpiscono il LED chip blu ma la pellicola riflettente che ricopre la superficie

Come mostrato nella figura, (nome della figura che ora è quella sopra) i fosfori remoti si presentano sotto forma di un foglio plastico contenente i fosfori e che viene posto all'interno dello stack ottico del display. Per il processo di produzione di tali fogli e per le loro caratteristiche morfologiche si rimanda all'introduzione del capitolo 7.

7. Caratterizzazione LED blu e bianchi

In generale un dispositivo elettronico può essere caratterizzato tramite le sue proprietà elettriche. Un dispositivo emettitore di luce invece non viene caratterizzato attraverso sole misure elettriche, ma anche attraverso misure ottiche, finalizzate all'analisi dello spettro, della potenza ottica di uscita e dell'efficienza del dispositivo.

In questo lavoro si sono studiati, mediante principalmente misure di caratterizzazione ottica, due tipologie di LED Bianco e due tipologie di LED Blu. Di tutte le misure svolte, cruciale si è dimostrato essere il setup adottato relativamente alle misure stesse al fine di un corretto studio dell'affidabilità dei dispositivi.

I parametri delle misure sono spesso affetti da effetti casuali che nel tempo possono distorcere il risultato: soprattutto quando i parametri in gioco sono molti, questi possono essere influenzati dalle condizioni ambientali. La ripetibilità è perciò una delle principali caratteristiche delle misure, ed è definita come la probabilità che due misure fatte con lo stesso strumento sullo stesso dispositivo coincidano. Il setup di cui sopra infatti consiste: nella connessione tra strumento e dispositivo, nella posizione del dispositivo e ovviamente nelle condizioni ambientali, quali ad esempio temperatura e umidità.

In questo capitolo viene fatta una introduzione alle misure, vengono descritti i componenti analizzati e le misure effettuate, i setup di misura con i rispettivi strumenti, la teoria che sta alla base delle misure stesse e le condizioni di stress dei componenti e i risultati.

7.1 Introduzione alle misure

Durante questo lavoro di tesi si sono presi in esame due tipologie di LED Bianco e due tipologie di LED Blu che qui chiameremo del tipo 1 e del tipo 2.

I LED del primo tipo, sia bianchi che blu, fanno parte della categoria Middle Power LED mentre i LED della tipologia 2 sono costruiti su una base di carburo di silicio e per le loro caratteristiche sono definiti degli High Power LED. Strutturalmente i LED facenti parte alla stessa tipologia sono identici, quello che cambia è la resina epossidica posta sopra la regione attiva del chip LED per ottenere luce blu piuttosto che luce bianca.

Per ogni tipo si sono analizzati 6 campioni per un totale quindi di 12 LED Bianchi e 12 LED Blu; su due di essi si sono svolte le misure elettriche e ottiche iniziali ad ogni step di corrente deciso, mentre sui restanti 4 si sono svolte le misure con valori di corrente a metà e a fine range per confermare che i LED fossero tutti identici.

Le misure elettriche dei dispositivi per ragioni di praticità sono state svolte in concomitanza alle misure ottiche.

Ovviamente tutti i LED sono stati identificati ponendo sul retro del loro supporto in MCPCB, che verrà analizzato in seguito, un numero. Ogni LED in questo modo è inconfondibile con gli altri sia durante lo stress sia durante le misure.

Prima di procedere con le misure, i LED sono stati montati su delle piastrine MCPCB (Metal Core PCB) amichevolmente chiamate Star per la loro forma che ricorda la forma stilizzata di una stella. Queste piastrine sul lato superiore presentano delle Solder Pad; solitamente quelle al centro permettono la saldatura del LED sulla star e quelle lungo i bordi di eseguire l'alimentazione del LED ed eventualmente i collegamenti in serie tra più LED durante le successive prove sotto stress.

Dal punto di vista strutturale e meccanico le due tipologie di LED, sia dei Blu che dei Bianchi, presentano misure diverse dei piedini dunque la star su cui saldarli dovrà presentare le Solder Pad centrali che rispettino tali misure.

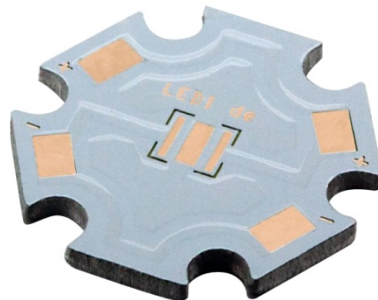


Figura 7.1 Immagine di una MCPCB (star)

Per eseguire la saldatura si è dapprima stesa sulle Solder Pad centrali una pasta saldante. Successivamente è stata pinzata la star tramite una pinza apposita e posta sopra la bocca di un fornellino a convezione; al raggiungimento dei 138°C la pasta diventa allo stato liquido e a questo punto è stato posto a contatto il LED facendo attenzione alla posizione del catodo che va posizionato sulle Pad con segno meno delle star.

Sulle Solder Pad lungo i bordi stati saldati dei reofori utili per l'alimentazione durante le misure mediante strumenti appositi.

7.2 Caratteristiche dei dispositivi

In questa sezione vengono descritte le tipologie dei LED rispettivamente Bianchi e Blu che sono oggetto di stress. Di seguito sono riportati dati tecnici di tipo elettrici che ottici.

LED TIPO 1

LED BIANCHI

I Middle Power LED Bianchi, della tipologia 1, hanno le seguenti caratteristiche:

CHARACTERISTICS	Minimum Value	Typical Value	Maximum Value	Unit
Color Temperature (Tc)	5000		8300	°K
Luminous Flux (@150mA)		50		lm
Radiant Flux (@150mA)	160			mW
Thermal Resistance (junction to solder point)		11		°C/W
Viewing Angle (FWHM)		120		Degree
Color Rendering Index (CRI)		80		
DC Forward current		150	175	mA
Reverse Voltage			-5	V
Forward Voltage (@150mA)		3.2	3.4	V
LED junction temperature			150	°C

Figura 7.2 Caratteristiche LED bianchi tipo 1

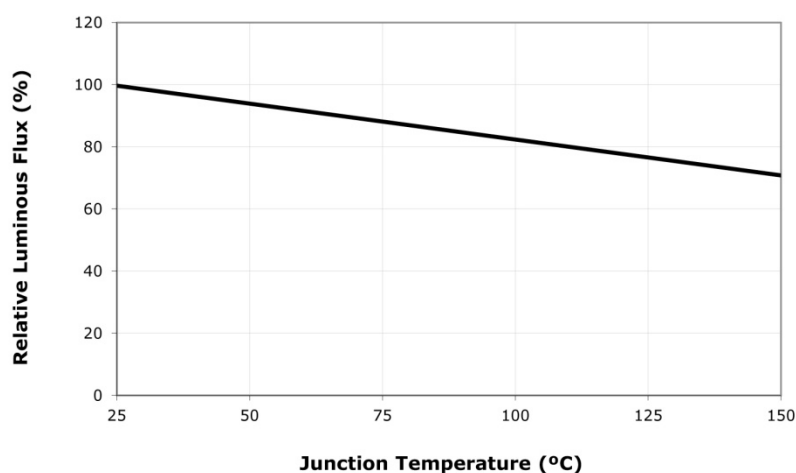


Figura 7.3 Flusso luminoso relativo in funzione della temperatura di giunzione

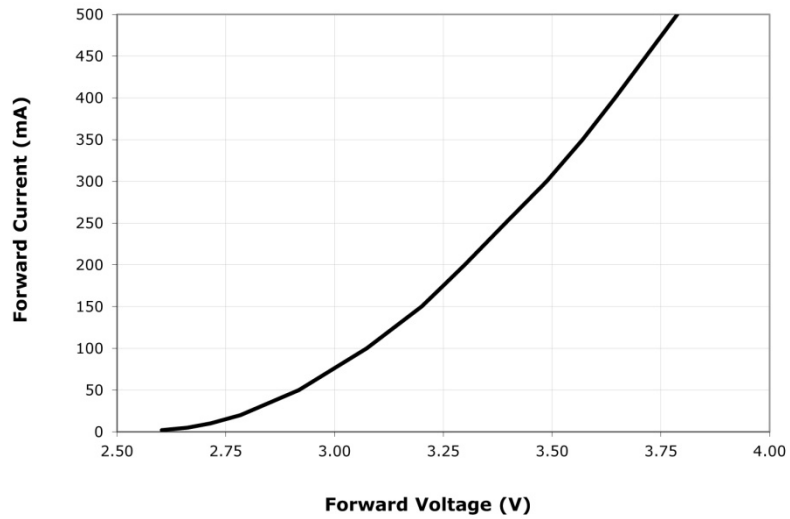


Figura 7.4 Caratteristica I-V

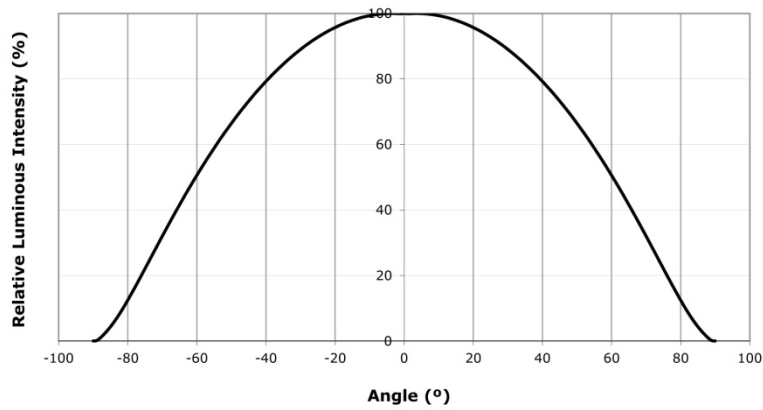


Figura 7.5 Intensità luminosa in funzione dell'angolo

LED BLU

I LED Blu del tipo 1, come detto, fanno parte della categoria Middle Power LED e le loro caratteristiche optoelettroniche vengono riportate nella seguente tabella:

CHARACTERISTICS	Minimum Value	Typical Value	Maximum Value	Unit
Dominant Wavelength Range	450		465	nm
Radiant Flux (@150mA)	175			mW
Thermal Resistance (junction to solder point)		11		°C/W
Viewing Angle (FWHM)		125		Degree
Color Rendering Index (CRI)	85-90			
DC Forward current		350		mA
Reverse Voltage			-5	V
Forward Voltage (@150mA)		3.2		V
LED junction temperature			150	°C

Figura 7.6 Caratteristiche LED blu tipo 1

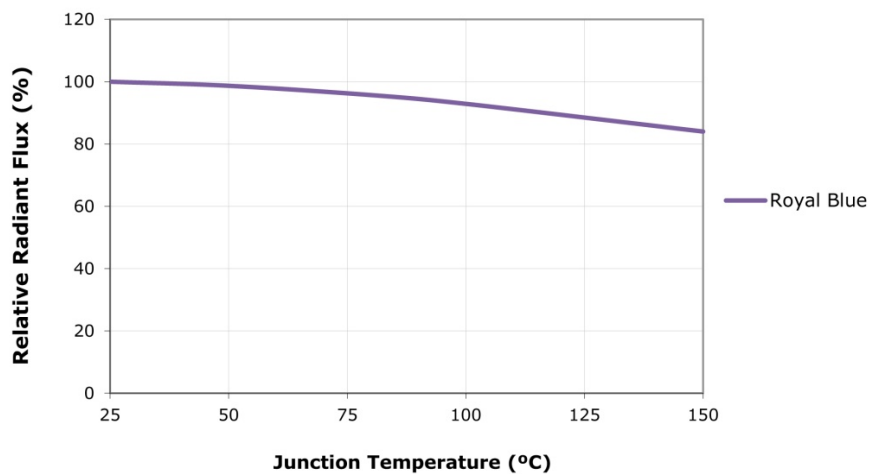


Figura 7.7 Flusso Radiante in funzione della temperatura di giunzione

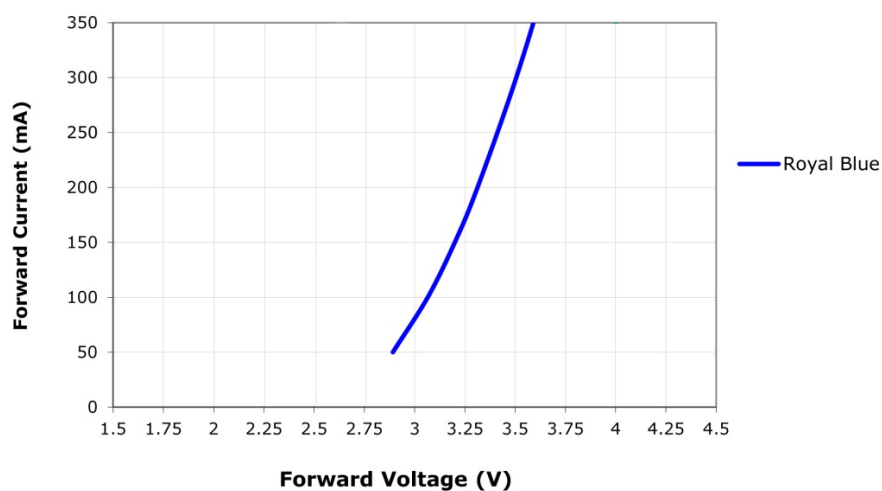


Figura 7.8 Caratteristica I-V

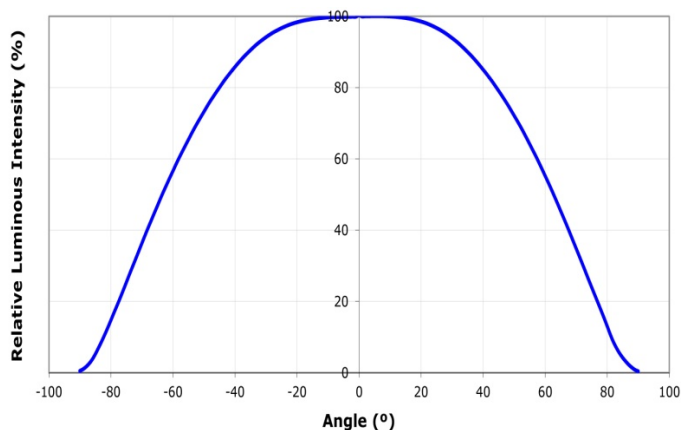


Figura 7.9 Intensità luminosa in funzione dell'angolo

LED TIPO 2

LED BIANCHI

I LED Bianchi del tipo 2 presentano i dati optoelettrici contenuti nella seguente tabella:

TABELLA DATI TECNICI XTE BIANCHI

CHARACTERISTICS	Minimum Value	Typical Value	Maximum Value	Unit
Color Temperature (Tc)	6000		6500	°K
Luminous Flux (@350mA)	150			lm
Radiant Flux (@150mA)	230			mW
Thermal Resistance (junction to solder point)		5		°C/W
Viewing Angle (FWHM)		115		Degree
Color Rendering Index (CRI)		85		
DC Forward current			1500	mA
Reverse Voltage			-5	V
Forward Voltage (@150mA)		2.85	3.4	V
LED junction temperature			150	°C

Figura 7.10 Caratteristiche LED bianco tipo 2

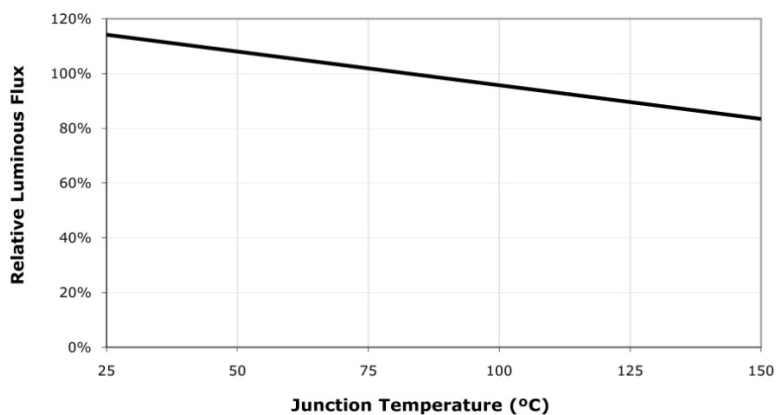


Figura 7.11 Flusso luminoso in funzione della temperatura di giunzione

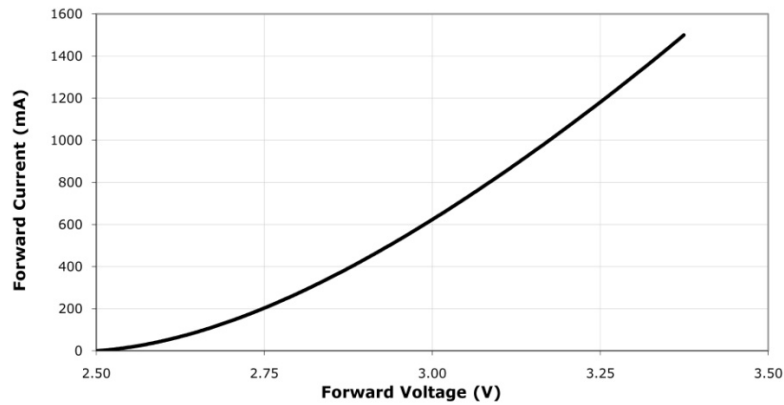


Figura 7.12 Caratteristica I -V

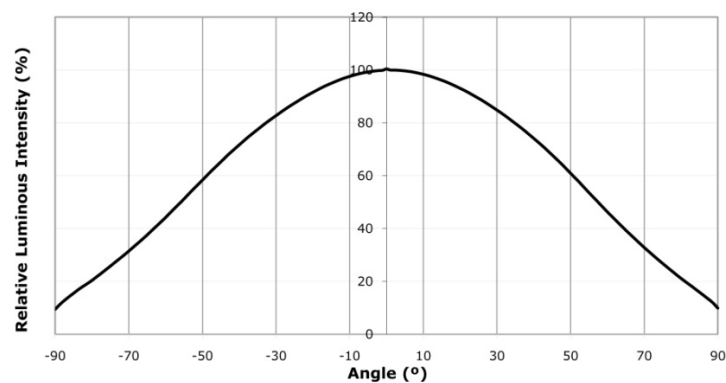


Figura 7.13 Intensità luminosa in funzione dell'angolo

LED BLU

Gli High Power LED Bianchi invece hanno i seguenti dati optoelettronici:

CHARACTERISTICS	Minimum Value	Typical Value	Maximum Value	Unit
Dominant Wavelength Range	450		455	nm
Luminous Flux (350mA)		20		
Radiant Flux (@150mA)	550			mW
Thermal Resistance (junction to solder point)		5		°C/W
Viewing Angle (FWHM)		140		Degree
Color Rendering Index (CRI)	70			
DC Forward current			1500	mA
Reverse Voltage			-5	V
Forward Voltage (@350mA, 85°C)		2.85	3.4	V
LED junction temperature			150	°C

Figura 7.14 Caratteristiche LED blu tipo 2

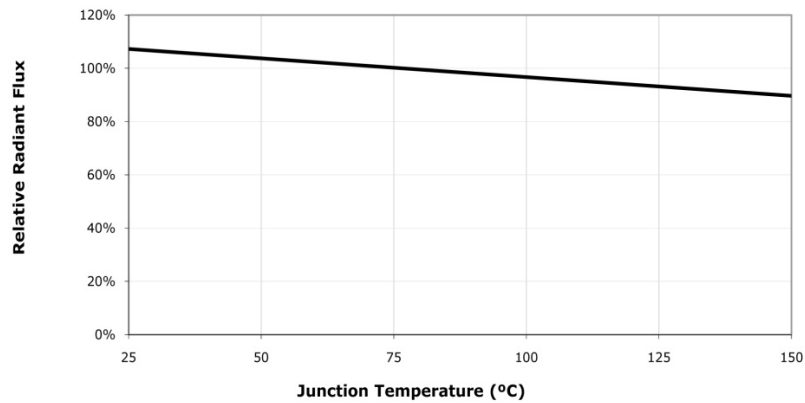


Figura 7.15 Flusso Radiante in funzione della temperatura di giunzione

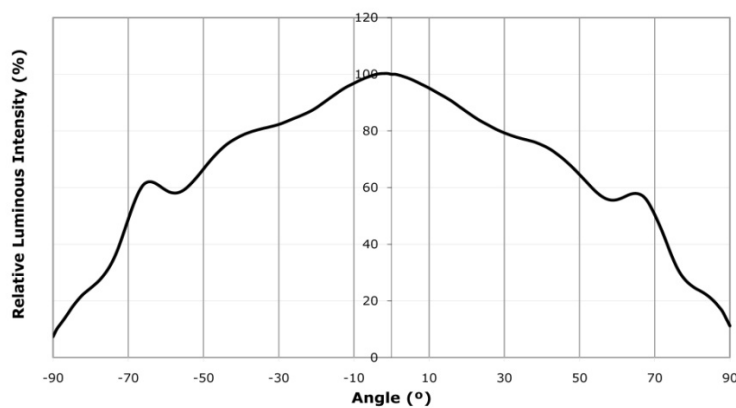


Figura 7.16 Intensità luminosa in funzione dell'angolo

7.3 Misure elettriche iniziali

Durante questo lavoro di tesi non si è svolta una vera e propria caratterizzazione elettrica dei dispositivi ma, all'accensione del dispositivo durante le misure con strumentazione ottica, si sono fatte semplicemente delle misure di tensione corrispondenti a determinati step di corrente per verificare la veridicità delle curve date nel data sheet.

Polarizzazione diretta: l'applicazione di una tensione diretta ai capi della giunzione comporta un piegamento del diagramma a bande e quindi la generazione di una corrente dovuta alla deriva e alla diffusione di elettroni e lacune. Il comportamento di una giunzione polarizzata viene descritto dalla seguente equazione:

$$I_F = A_{pn}(J_{diff} + J_{NR}) + A_{sur}J_{sur}$$

dove A_{pn} è l'area della giunzione, mentre A_{sur} è l'area superficiale esterna. La corrente che scorre attraverso la giunzione può essere divisa in tre diverse componenti:

- corrente di diffusione
- corrente di generazione/ricombinazione
- corrente superficiale di ricombinazione

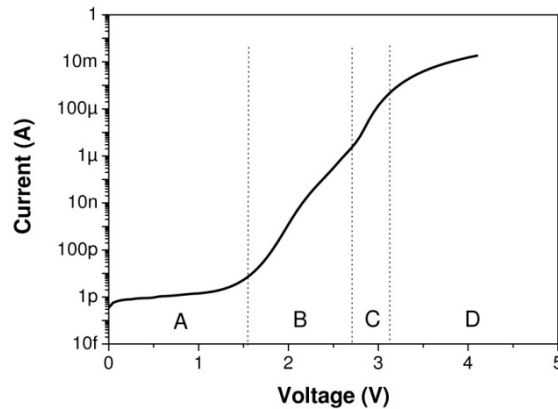


Figura 7.17 Componenti della corrente di giunzione di un LED

Come si può vedere dalla figura sopra si notano quattro diverse regioni e relativamente a ogni regione un particolare effetto conduttivo:

- regione A: domina la corrente di ricombinazione superficiale con densità

$$I_{SUR} = I_{SO} \left[\exp\left(\frac{eV}{K_B T}\right) - 1 \right]$$
 a basse tensioni, è presente solo nei semiconduttori composti dal gruppo III-V;

- regione B: chiamata corrente di tunnel degli elettroni e dovuta al processo di tunnel attraverso l'eterostruttura;
- regione C: aumentando la tensione diretta applicata, la corrente di diffusione domina

$$I_{diff} = A_{const} \exp\left(\frac{eV}{2K_B T}\right);$$

- regione D: quando la densità di corrente diventa sufficientemente alta un fenomeno di saturazione diventa visibile. Tale fenomeno viene associato alle perdite ohmiche

dovute alla resistenza serie $I = \frac{\Delta V_D}{r_S}$, comunque anche se la resistenza serie è trascurabile il meccanismo di alta iniezione ha luogo. La concentrazione di

portatori minoritari diventa simile a quella dei maggioritari, per cui la densità di corrente diviene:

$$A_{const} = \exp\left(\frac{eV}{2K_B T}\right).$$

Setup di misura: dal momento che le misure elettriche iniziali sui dispositivi si sono svolte in concomitanza con le misure ottiche, la strumentazione utilizzata risulta più o meno la stessa di quella per le misure ottiche con l'aggiunta di pochi strumenti.

Lo schema di principio per la misura tensione-corrente iniziale dei dispositivi è mostrato nella figura seguente; il LED viene posto nel LED Holder, un supporto apposito per eseguire le misure ottiche, mediante il quale è possibile alimentarlo.



Figura 7.18 LED Holder

Si è usato un alimentatore Hameg Triple Power Supply ed un ulteriore alimentatore della KEITHLEY utilizzato però come amperometro. Dal momento che le caratteristiche tensione-corrente per i LED analizzati sono effettuate a correnti relativamente ridotte, tali per cui le cadute di tensione sui cavi sono trascurabili, si sono effettuate misure a due terminali avendo cura di mantenere inalterato il setup di misura.

Per la misura della tensione al momento dell'accensione del dispositivo si è usato un tester (modello tester).

Nonostante il tempo impiegato per singola misura non duri più di 10-15 secondi massimo, tra uno step di corrente e il successivo si è aspettato un tempo di circa 2-3 minuti necessario per permettere al componente di raffreddarsi ed eseguire così tutte le misure supponendo che la temperatura del LED stesso sia sempre quella ambiente.

Di seguito vengono elencate le misure svolte:

LED Bianco

Tipo 1: LED_1 e LED_2 misure da 25mA a 150mA @step di 25mA

LED da _3 a _6 misure @50mA e 100mA;

Tipo 2: LED_1 e LED_2 misure da 50mA a 700mA @step di 50mA;

LED da _3 a _6 misure @350mA e 700mA;

LED Blu

Tipo 1: LED_1 e LED_2 misure da 25mA a 150mA @step di 25mA;

LED da _3 a _6 misure @50mA e 100mA;

Tipo 2: LED_1 e LED_2 misure da 50mA a 500mA @step di 50mA;

LED da _3 a _6 misure @350mA e 500mA;

Di seguito sono riportati i grafici delle caratterizzazioni I-V @ 0h dei LED in esame:

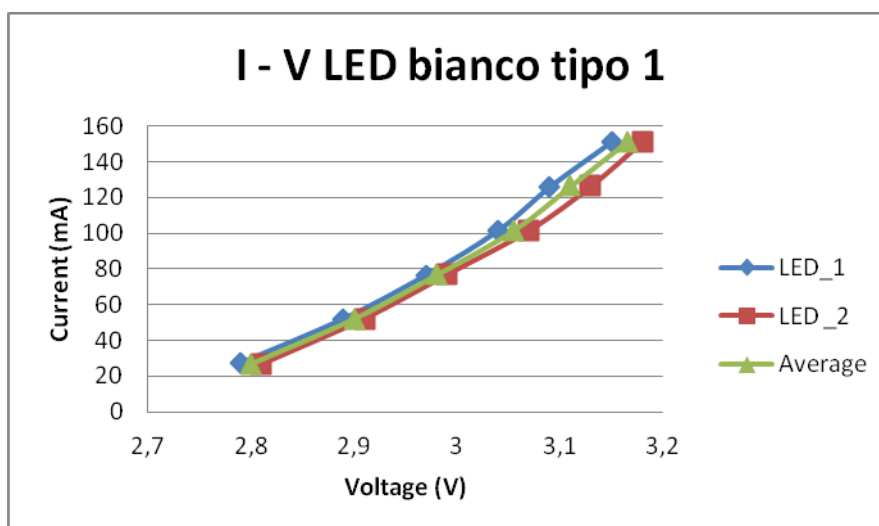


Figura 7.19 LED Bianco tipo 1

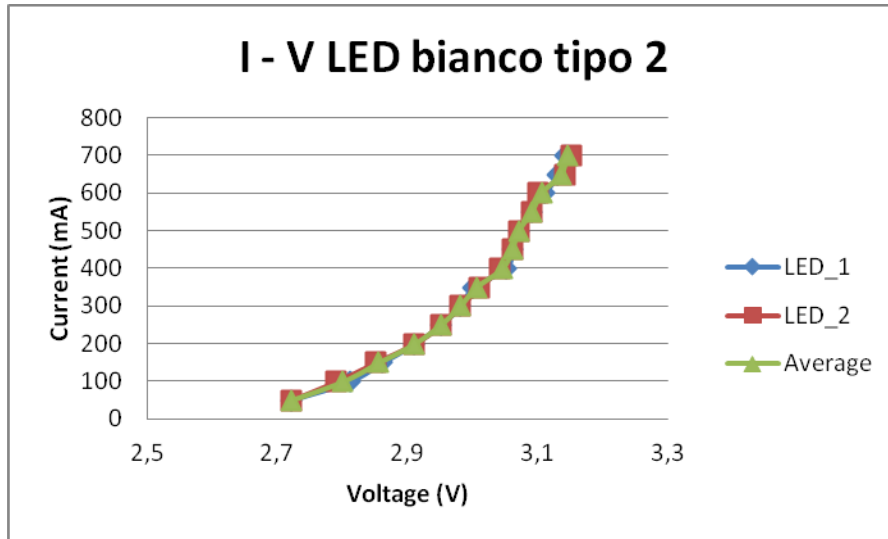


Figura 7.20 LED Bianco tipo 2

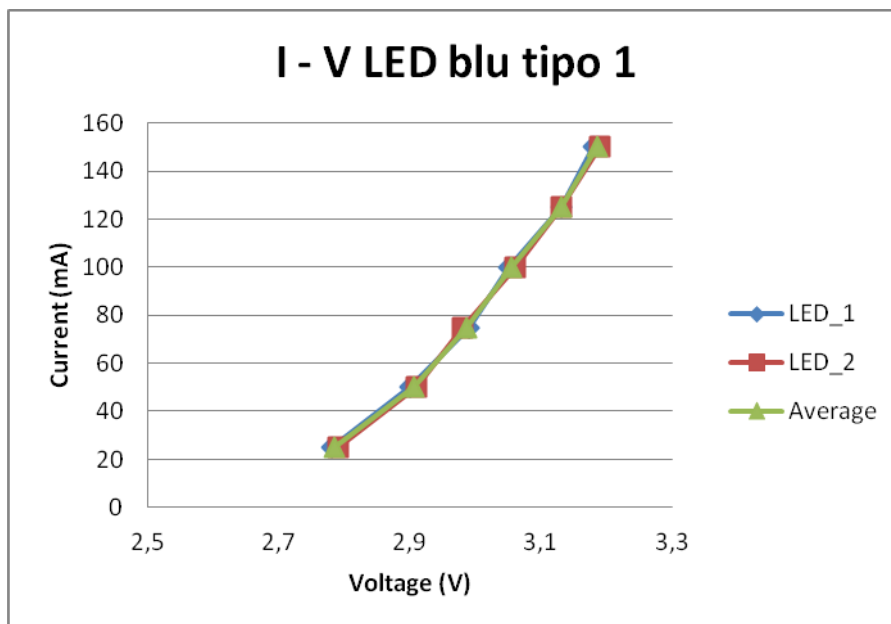


Figura 7.21 LED Blu tipo 1

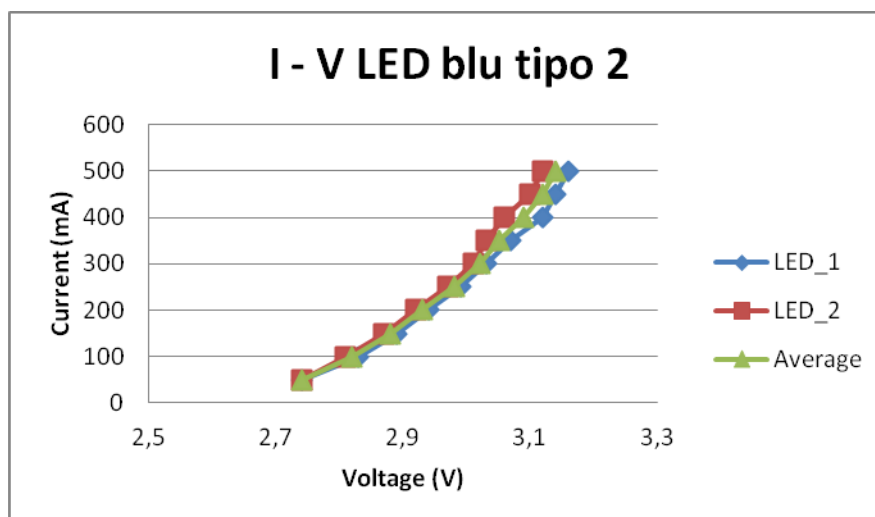


Figura 7.22 LED Blu tipo 2

7.4 Misure ottiche iniziali

Come già menzionato, sugli stessi due campioni su cui si sono eseguite le misure elettriche iniziali si sono svolte contemporaneamente le misure ottiche di Flusso Luminoso Totale ad ogni step di corrente e di spettro con correnti a metà e fine range e successivamente utilizzando un dispositivo di misura diverso, ma dello stesso gruppo di strumentazione, si sono svolte le misure goniometriche con correnti specifiche a metà e a fine range di corrente.

Le misure di potenza ottica-corrente sono una serie di misure che permettono di stabilire il legame tra la potenza ottica emessa dal dispositivo e la corrente o la potenza fornita al dispositivo stesso.

Teoria L-I: le misure di potenza ottica al variare della corrente iniettata nel dispositivo permettono di valutare l'andamento relativo del rendimento dell'efficienza quantica esterna, ovvero il rapporto tra la potenza ottica emessa dal LED e la corrente iniettata:

$$\eta_{el,rel} = \frac{P_O}{I_F}$$

Le misure dello spettro, oltre a fornire informazioni sull'intensità, da informazioni anche sulla lunghezza d'onda di emissione.

Le misure goniometriche invece permettono di vedere la distribuzione spaziale dell'intensità luminosa rispetto all'angolo, se inteso di guardare lateralmente il componente su un lato.

Setup di misura: il gruppo di strumentazione utilizzato per le misure ottiche dei LED è il Multichannel Spectroradiometer OL 771 della Optronic Laboratories dotato di proprio software di misura e di due componenti principali: una sfera integratrice da 6.7 pollici e un fotogoniometro.

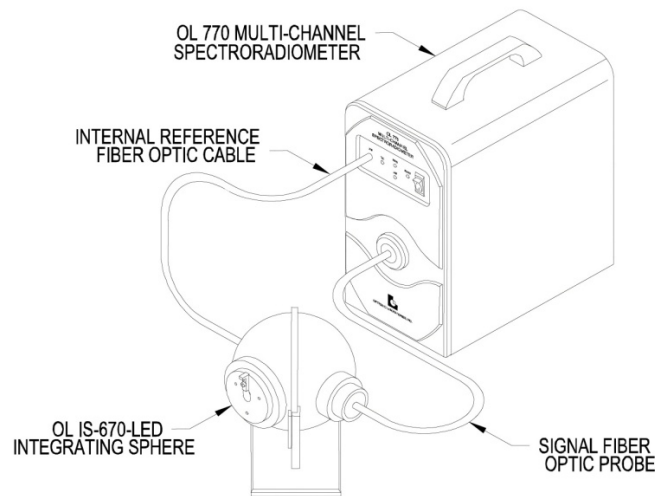


Figura 7.23 Collegamento sfera integratrice e strumento di misura OL 771

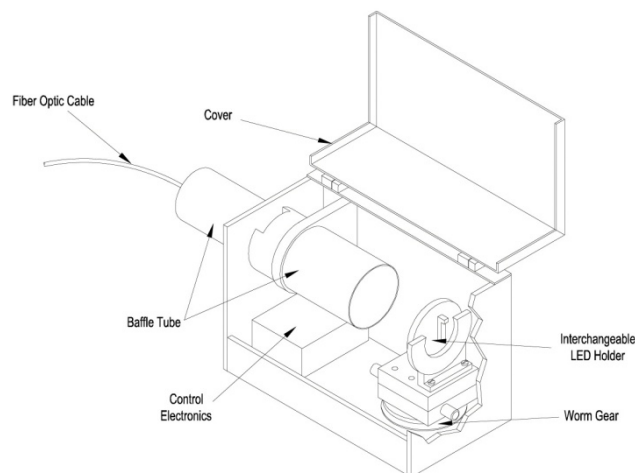


Figura 7.24 Foto goniometro

Il Multichannel Spectroradiometer viene collegato ad un calcolatore su cui è installato il software di misura in grado di interagire direttamente con la Sfera Integratrice o con il

Fotogoniometro rispettivamente per eseguire misure di Flusso Luminoso Totale (TLF) ,di Spettro e di Distribuzione Spaziale dell'intensità luminosa.

Una *sfera integratrice* (o *sfera di Ulbricht*) è una delle apparecchiature più utilizzate per la misura di grandezze fotometriche; si tratta di una sfera cava con superficie interna perfettamente diffondente che consente la riflessione totale della luce che può entrare attraverso una piccola fessura. Le misure vengono effettuate attraverso un foto rivelatore fissato dietro una piccolissima fessura presente sulla superficie della sfera; il rivelatore è schermato con una superficie diffondente al fine di evitare che i raggi luminosi oggetto di misurazione possano incidere direttamente su di essa, falsando così i risultati. Per come è realizzata la sfera, la fessura attraverso cui passano le radiazioni luminose è a tutti gli effetti un corpo nero, che assorbe totalmente la radiazione incidente, senza rifletterla.

Prima della misura in sfera, per ogni tipologia di LED, si è fatta la calibrazione dello strumento necessaria per permettere al software di eliminare, durante la misura del flusso, l'auto assorbimento indotto dall'introduzione in sfera del LED con la rispettiva star, che come accennato prima è diversa a seconda del tipo di LED.

Il *foto goniometro* (o *fotometro direzionale*) è costituito da una fotocellula che effettua le misure dell'intensità luminosa in tutte le direzioni dello spazio, con particolare cadenza angolare, mediante variazione relativa della posizione del LED Holder rispetto al sensore foto rivelatore.

Durante la misura con questi due strumenti, il LED rimane fissato al LED Holder, e solo quest'ultimo viene spostato e fissato al suo supporto in ciascuno dei due strumenti.

Il circuito di alimentazione dunque rimane quello descritto per le misure elettriche iniziali che qui si omette di ripetere.

Quanto piuttosto alla strumentazione del Multichannel Spectroradiometer OL 771, di seguito vengono riportate le figure della sfera integratrice, del foto goniometro e dell'intera strumentazione ottica utilizzata nelle misure dei LED.

LED Bianco

Tipo1

Sfera Integratrice: LED_1 e LED_2 misure di TLF da 25mA a 150mA @step di 25mA;

misure di Spettro @ 50mA e 100mA;

LED da _3 a _6 misure di TLF @ 50mA e 100mA;

misure di Spettro @ 50mA e 100mA;

Fotogoniometro: LED_1 e LED_2 misura @ 100mA;

Transiente: LED_1 e LED_2 misura @ 100mA;

Tipo 2

Sfera Integratrice: LED_1 e LED_2 misure di TLF da 50mA a 700mA @step di 50mA;

misure di Spettro @ 350mA;

LED da_3 a _6 misure di TLF @ 350mA e 700mA;

misure di Spettro @ 350mA;

Fotogoniometro: LED_1 e LED_2 misure @350mA;

Transiente: LED_1 e LED_2 misura @350mA;

LED Blu

Tipo 1

Sfera Integratrice: LED_1 e LED_2 misure di TLF da 25mA a 150mA @step di 25mA;

misure di Spettro @ 50mA e 100mA;

LED da _3 a _6 misure di TLF @ 50mA e 100mA;

misure di Spettro @ 50mA e 100mA;

Fotogoniometro: LED_1 e LED_2 misura @ 100mA;

Transiente: LED_1 e LED_2 misura @ 100mA;

Tipo 2

Sfera Integratrice: LED_1 e LED_2 misure di TLF da 50mA a 500mA @step di 50mA;

misure di Spettro @ 350mA e 500mA;

LED da_3 a _6 misure di TLF @ 350mA e 500mA;

misure di Spettro @ 350mA e 500mA;

Fotogoniometro: LED_1 e LED_2 misura @ 350mA;

Transiente: LED_1 e LED_2 misura @ 350mA;

Di seguito sono presentati i grafici di Flusso Luminoso - Corrente per i LED bianchi e di Potenza Ottica – Corrente per i LED blu:

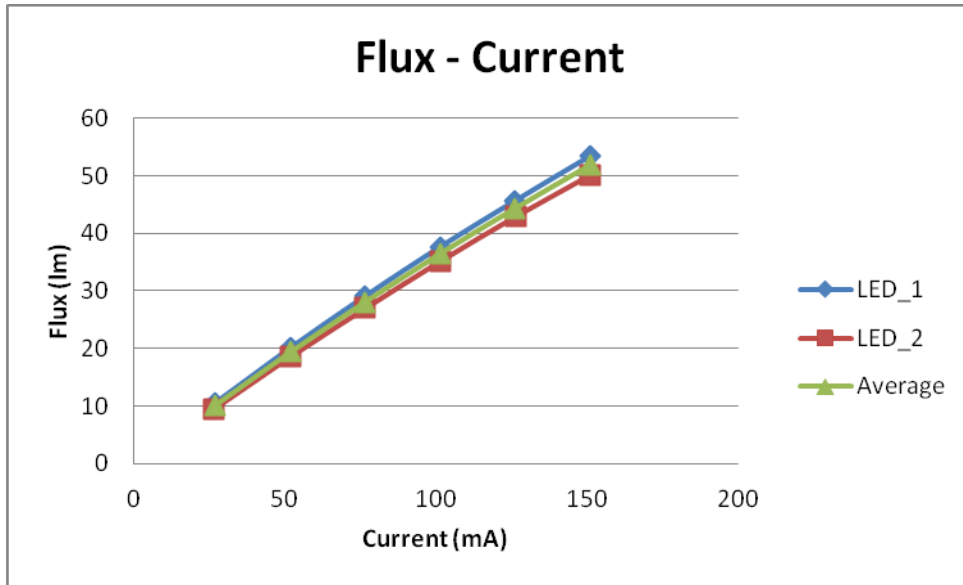


Figura 7.25 LED Bianco tipo 1

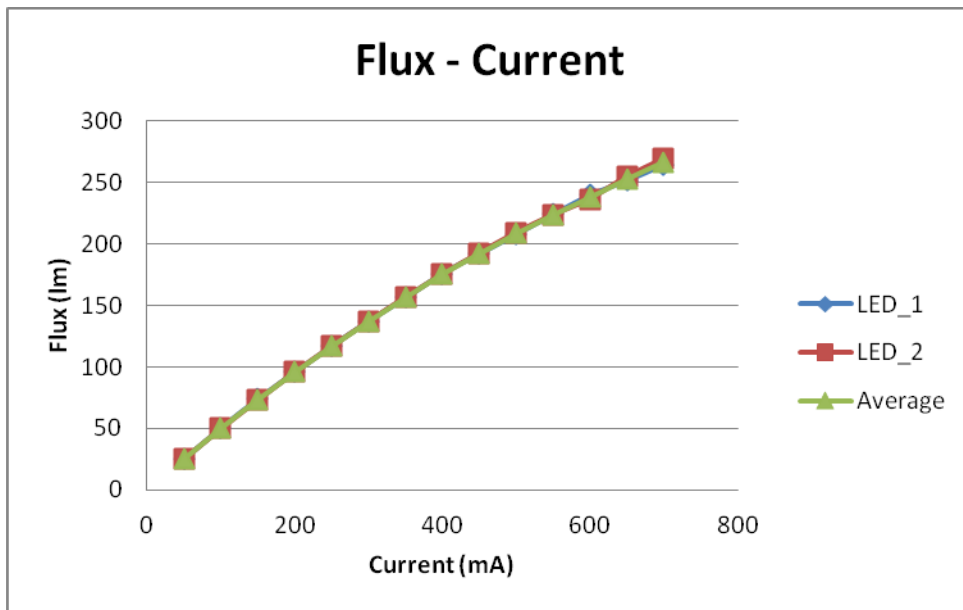


Figura 7.26 LED Bianco tipo 2

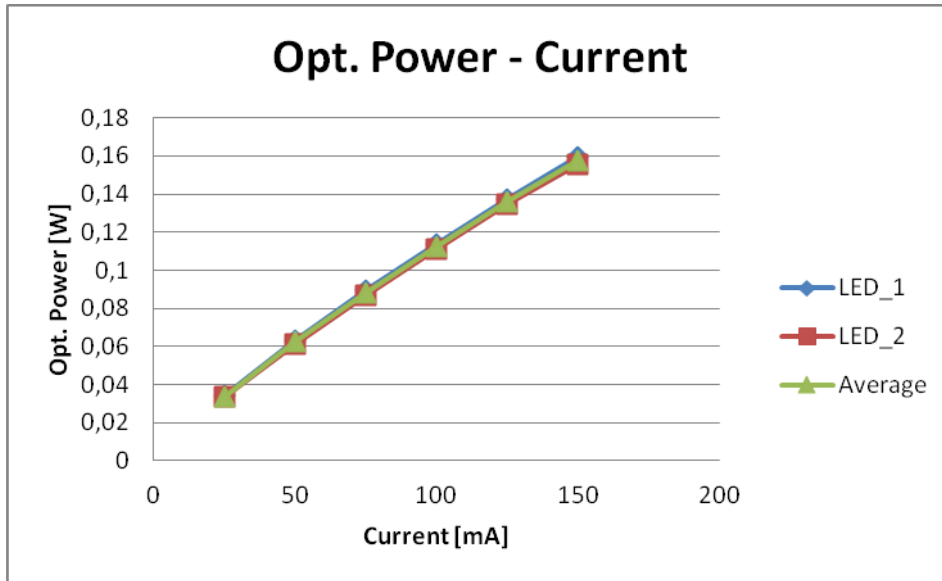


Figura 7.27 LED Blu tipo 1

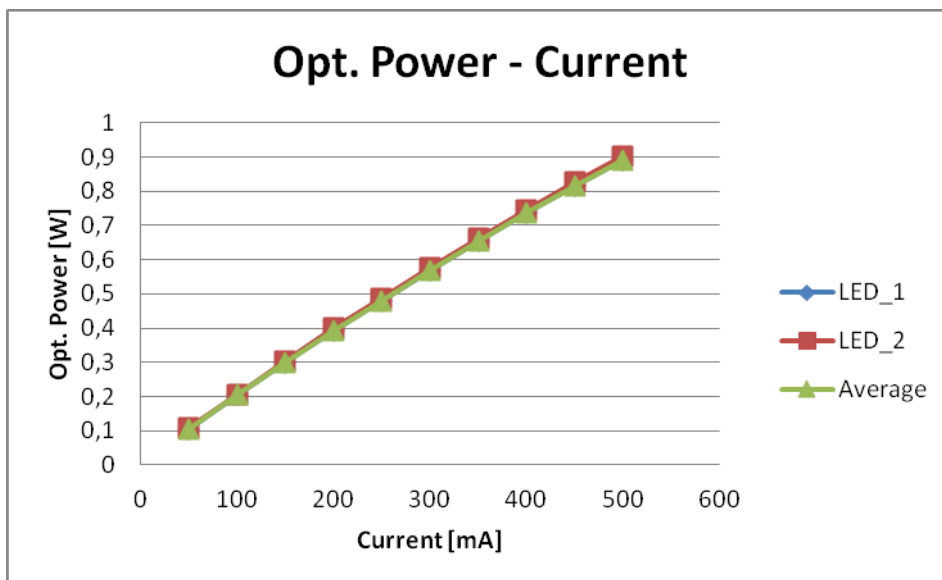


Figura 7.28 LED Blu tipo 2

Di seguito invece sono riportati gli spettri dei LED:

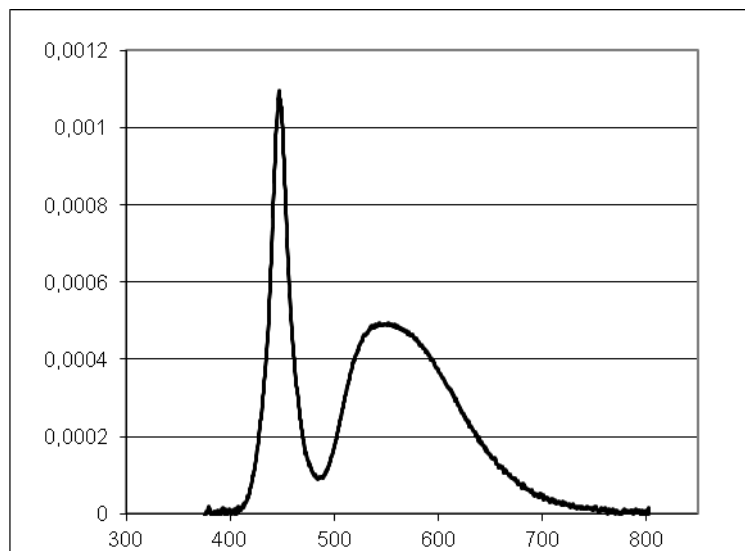


Figura 7.29 Spettro @100mA LED Bianco tipo 1

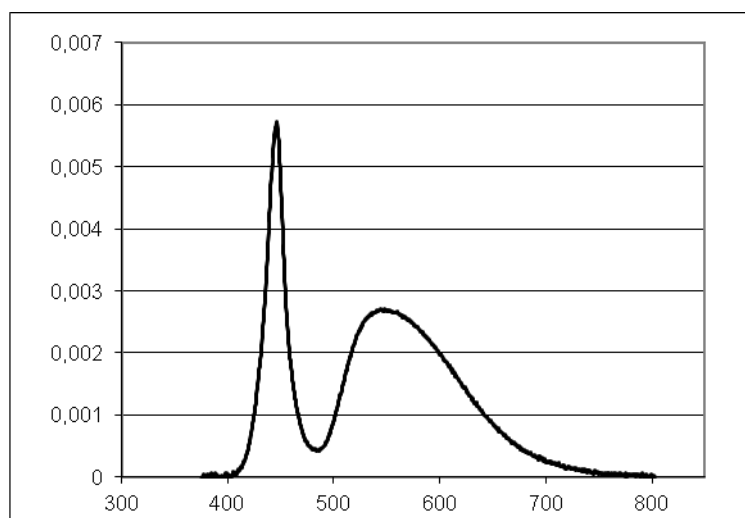


Figura 7.30 Spettro @350mA LED Bianco tipo 2

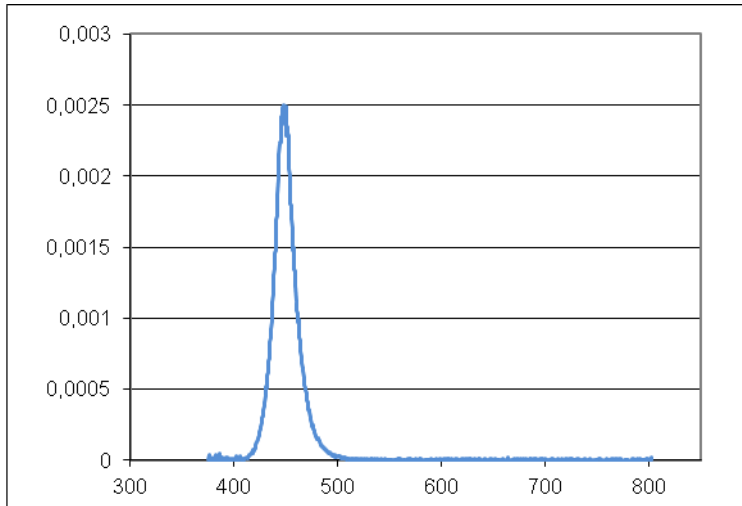


Figura 7.31 Spettro @100mA LED Blu tipo 1

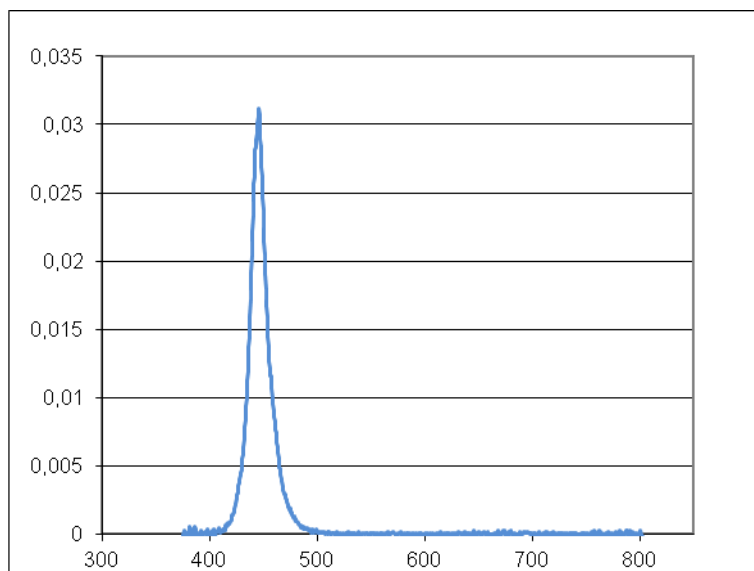


Figura 7.32 Spettro @350mA LED Blu tipo 2

7.5 Stress dei componenti

7.5.1 Premessa

Obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di verificare l'affidabilità dei componenti presi in esame.

Si è quindi svolta sui componenti una sorta di *Prova Accelerata* volta ad osservare soprattutto il degrado delle caratteristiche ottiche come la diminuzione di flusso luminoso oppure un cambiamento delle coordinate cromatiche, tutte causate dalla temperatura che si raggiunge durante il normale funzionamento del display.

Definizione di Prova Accelerata: prova nella quale l'intensità della sollecitazione applicata è scelta in modo da eccedere quella stabilità alle condizioni di riferimento, allo scopo di ridurre il tempo necessario per osservare l'effetto della sollecitazione sull'oggetto, oppure di accentuare questo effetto in un dato tempo.

La prova accelerata consiste dunque nel scegliere un meccanismo di guasto (o degrado) dopo di che il tipo di stress che lo accelera.

I meccanismi di guasto di molti componenti elettronici sono attivati dall'aumento della temperatura, perciò aumentare la temperatura è un metodo molto comune di realizzare una prova accelerata.

Per i LED sono molti fattori che sono stati indicati come responsabili del degrado. Gli effetti più rilevanti sono:

1. Formazione di difetti all'interno del reticolo cristallino in grado di aumentare i processi di ricombinazione non radiativa ;
2. Variazione delle caratteristiche elettriche dei contatti ohmici ;
3. Degrado delle proprietà cromatiche ;

Esistono varie tecniche per studiare le cause di questi meccanismi, quello che è difficile fare però, è trovarne una che permetta di analizzare ogni forma di degrado in maniera separata dalle altre.

I metodi principalmente utilizzati per la caratterizzazione di un LED durante una prova accelerata consistono nell'effettuare in contemporanea agli stress delle misure di tipo ottico, elettrico e in alcuni casi termico in modo da verificare lo stato del dispositivo al variare del tempo.

La temperatura, come detto, interviene anche nel degrado delle proprietà cromatiche dei dispositivi e ciò che ha spinto allo studio dell'influenza della temperatura su di esse è stato notato sui LED Bianchi.

La temperatura, infatti, è in grado di degradare lo strato di fosfori depositato sopra la regione attiva, annerisce la lente se non addirittura crea delle microfratture.

L'intensità emessa dallo strato di fosfori eccitati ad una determinata lunghezza d'onda in funzione della temperatura [18] è del tipo:

$$I(T) = \frac{I(0)}{\left[1 + A \exp\left(\frac{-\Delta E}{K_B T}\right)\right]}$$

in cui:

- $I(0)$ intensità emessa a 0°K
- ΔE energia di attivazione oltre la quale si attiva il processo di spegnimento termico
- A parametro di Arrhenius

Per avere un esempio di tipo grafico, basti notare come in *Figura 5.23* l'intensità dello spettro inizi a calare all'aumentare della temperatura.

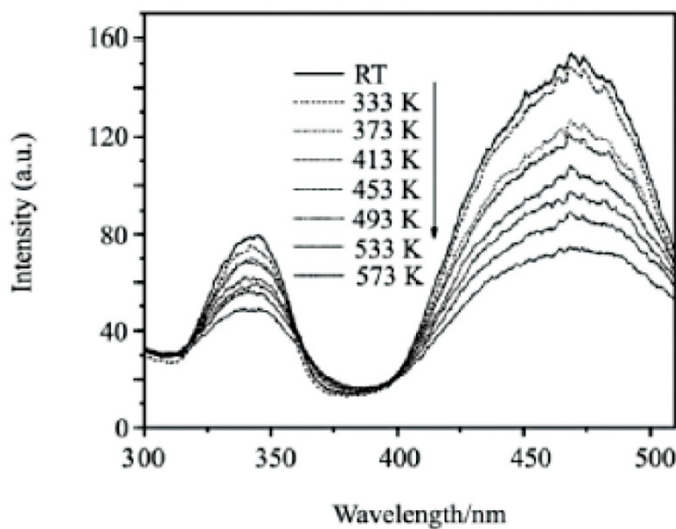


Figura 7.33 Calo di efficienza dei fosfori in funzione della temperatura

In base a queste considerazioni, si può affermare che all'aumentare della temperatura di giunzione di un LED blu, lo strato di fosfori tende a calare la sua efficienza. Se poi il

dispositivo viene stressato in temperatura per un certo tempo, tali fosfori tendono a degradarsi con una cinetica diversa rispetto a quello della regione attiva cambiando di conseguenza la cromaticità della radiazione emessa.

Prendendo in esempio un LED bianco realizzato con questa tecnologia di fosfori, è possibile notare (vedi *Figura 7.33*) come il picco del giallo, normalizzato rispetto al picco del blu, tenda a calare d'intensità con l'aumentare di ore di stress.

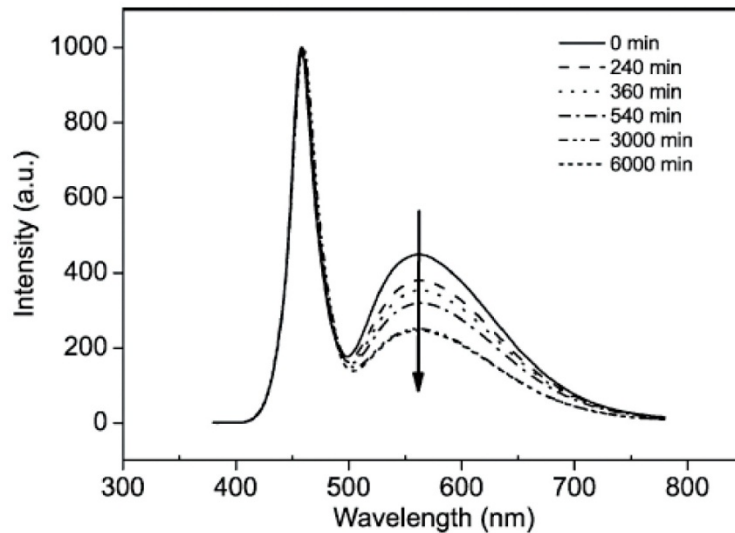


Figura 7.34 Variazione del giallo emesso dai fosfori rispetto al picco del blu

Questo effetto di degrado porta ad avere un bianco con una componente del blu sempre maggiore rispetto a quella gialla e quindi una Temperatura Colore sempre più *fredda*.

7.5.2 Prove di stress e misure

Nella fattispecie, il fattore di stress scelto è quello di tipo Ambientale, cioè di temperatura. A tale scopo è stato eseguito uno stress di temperatura costante, ponendo tutti i LED, alimentati (accesi) ad una corrente specifica, all'interno di una camera climatica chiamata MTBF.

Tutti i LED con le loro rispettive MCPCB sono stati dapprima fissati ad un dissipatore termico di alluminio, ordinati in colonne per tipologie e colore, ad una distanza l'uno dall'altro calcolata con l'ausilio di una termo camera, in modo tale che in seguito al

surriscaldamento del dissipatore durante la polarizzazione dei LED, essi non provochino l'un con l'altro una mutua influenza termica.

I LED appartenenti alla stessa colonna, tutti collegati in serie tra di loro, sono stati collegati ad un alimentatore in modo che su ognuno scorresse una corrente uguale a quella scelta per la prova di stress.

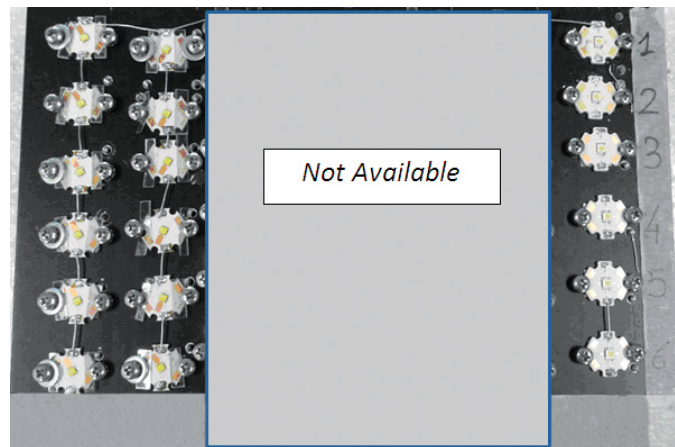


Figura 7.35 Dissipatore con LED bianchi sotto stress



Figura 7.36 Dissipatore con LED blu sotto stress

La scelta dei parametri di stress, come la temperatura ambiente della MTBF a cui effettuare lo stress e la corrente di polarizzazione dei LED è stata scelta non a caso, ma

seguendo delle specifiche. I parametri a cui sono state effettuate le prove di stress sono riportati qui di seguito:

- $T_{\text{amb MTBF}} = 45^{\circ}\text{C}$
- Corrente di polarizzazione dei Middle Power LED: 100mA
- Corrente di polarizzazione degli High Power LED: 350mA
- Tempo di stress: continuativo

Innanzitutto riguardo alla temperatura si può dire che la scelta dei 45°C come temperatura a cui eseguire lo stress è stata suggerita da un compromesso in base a ciò che interessa all'azienda, ossia:

- Temperatura ambiente massima di funzionamento dei monitor
- Temperatura di funzionamento dei LED all'interno dei monitor

In questo modo si raggiunge una temperatura per i LED che va oltre a quella che si crea all'interno del display durante il normale funzionamento, dunque si potranno osservare gli effetti di degrado che si manifestano in tempi più brevi come vuole la prova accelerata.

Il tempo di stress continuativo invece è dettato dal fatto che i LED saranno poi sottoposti ad una polarizzazione continua durante il normale funzionamento all'interno del display, nel senso che il display sono progettati per funzionare h24.

Per quanto riguarda invece la corrente di polarizzazione durante lo stress, i valori sono stati scelti perché sono prossimi ai valori di corrente con cui vengono alimentati i LED una volta montati nel display, e per tali valori si raggiungono i valori di luminanza richiesti per la classificazione dei display. Quindi con i Middle Power LED alimentati a 100mA si raggiungono nel display valori di luminanza pari a $400\text{-}500\text{ cd/m}^2$ specifici degli Standard Brightness mentre gli High Power LED polarizzati a 350mA permettono di avere valori di luminanza degli High Brightness superiori a 500cd/m^2 .

Per tenere monitorato lo stress dei componenti si è proceduto facendo le medesime misure eseguite per le misure iniziali, i cui modi, parametri e strumenti usati per le misure si omette di ripeterli per non essere petulanti.

Un'accortezza non indifferente da mantenere è quella di attendere un tempo dal momento in cui si tolgono i LED dalla camera MTBF, necessario al raffreddamento dei LED in modo da eseguire le misure sempre a temperatura ambiente così che da non introdurre errori di misure a causa della temperatura diversa del dispositivo.

Ad ogni modo di seguito sono riportati i valori messi a confronto tra le due tipologie di LED (blu e bianchi) delle misure della potenza ottica e dell'efficienza.

7.6 Risultati

Di seguito sono riportati i grafici derivanti dalle misure durante le prove di stress dei LED.

LED Tipo 1

LED Bianco

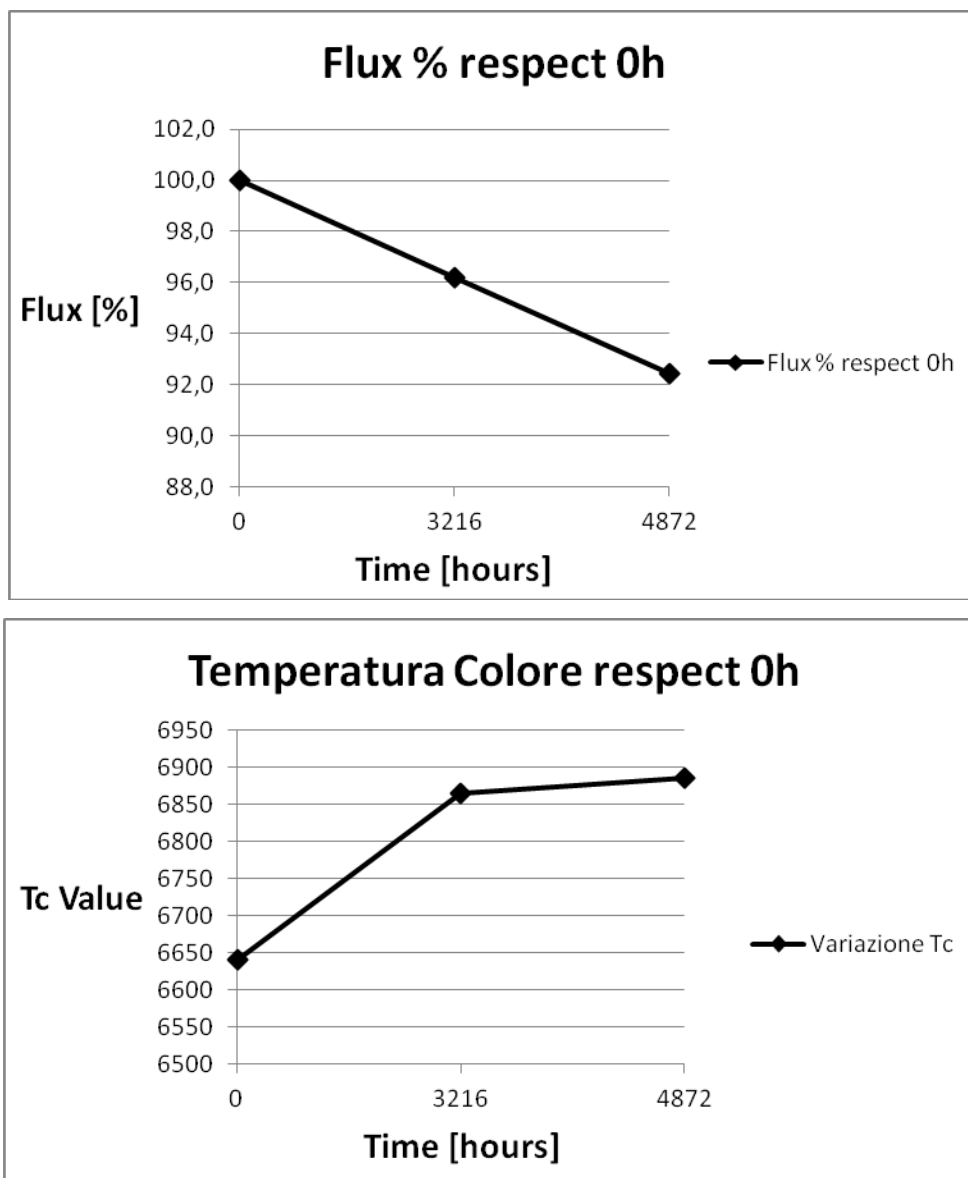


Figura 7.37 Andamento del flusso luminoso e della Temperatura di Colore

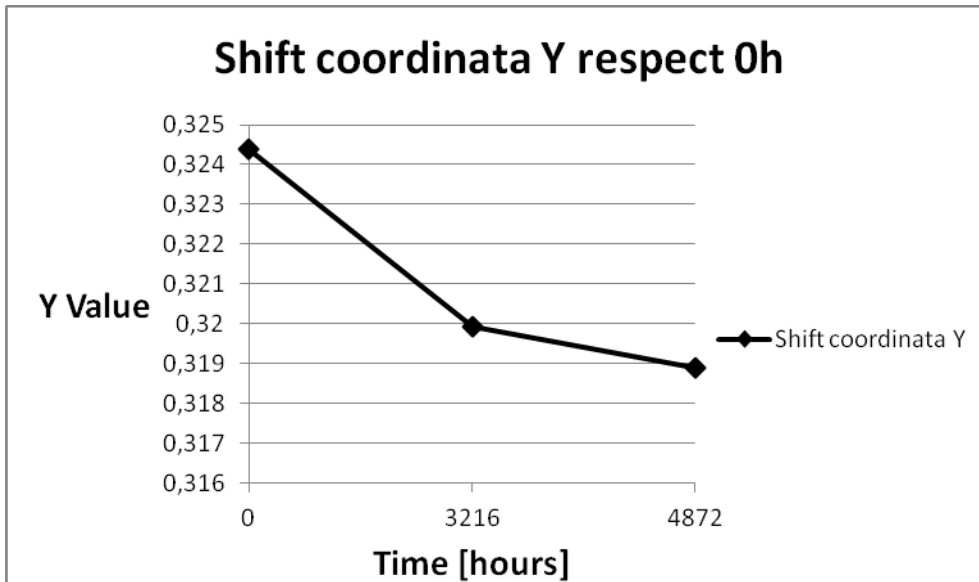
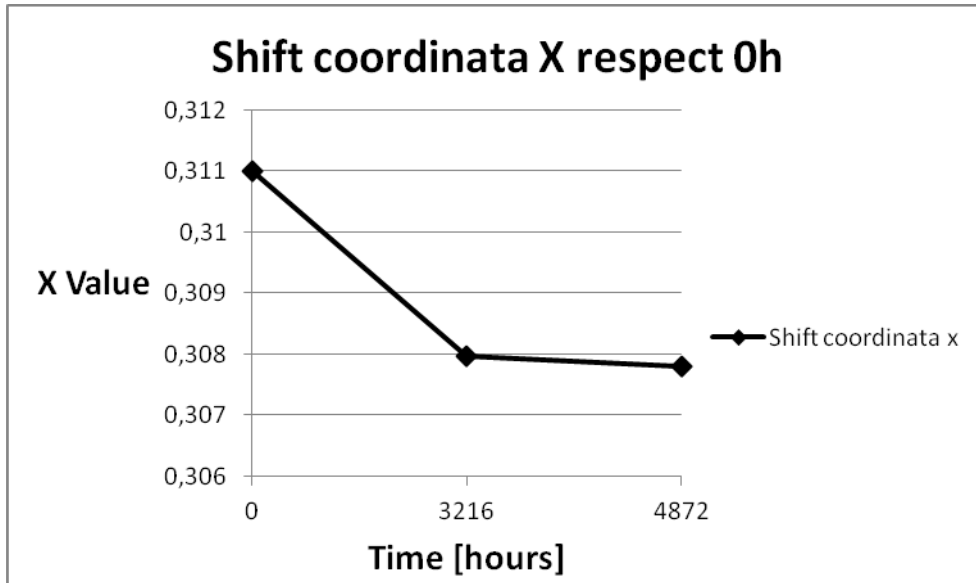


Figura 7.38 Andamento delle coordinate cromatiche

LED Blu

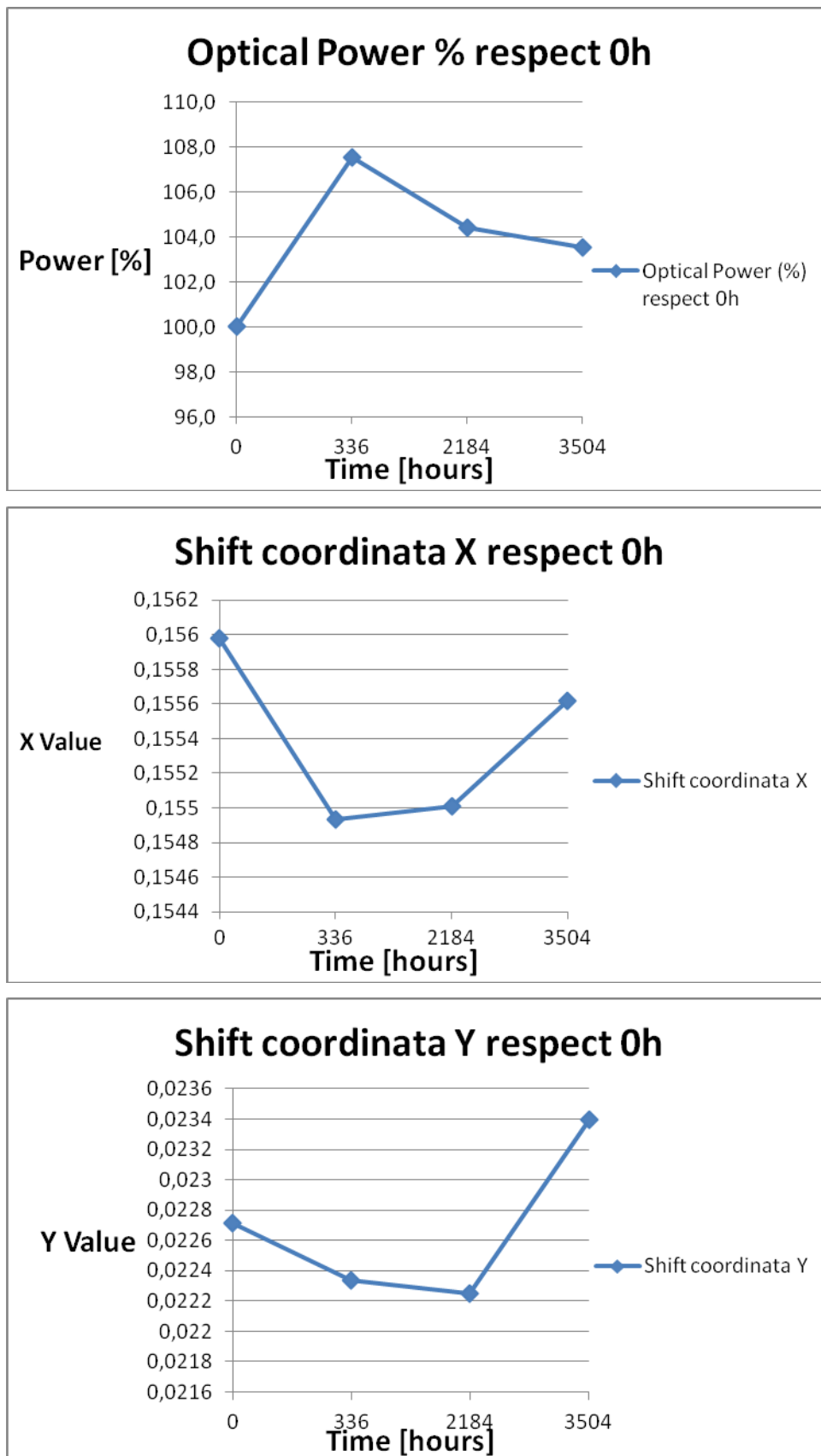


Figura 7.39 Andamento della Potenza ottica e delle coordinate cromatiche

LED Tipo 2

LED Bianco

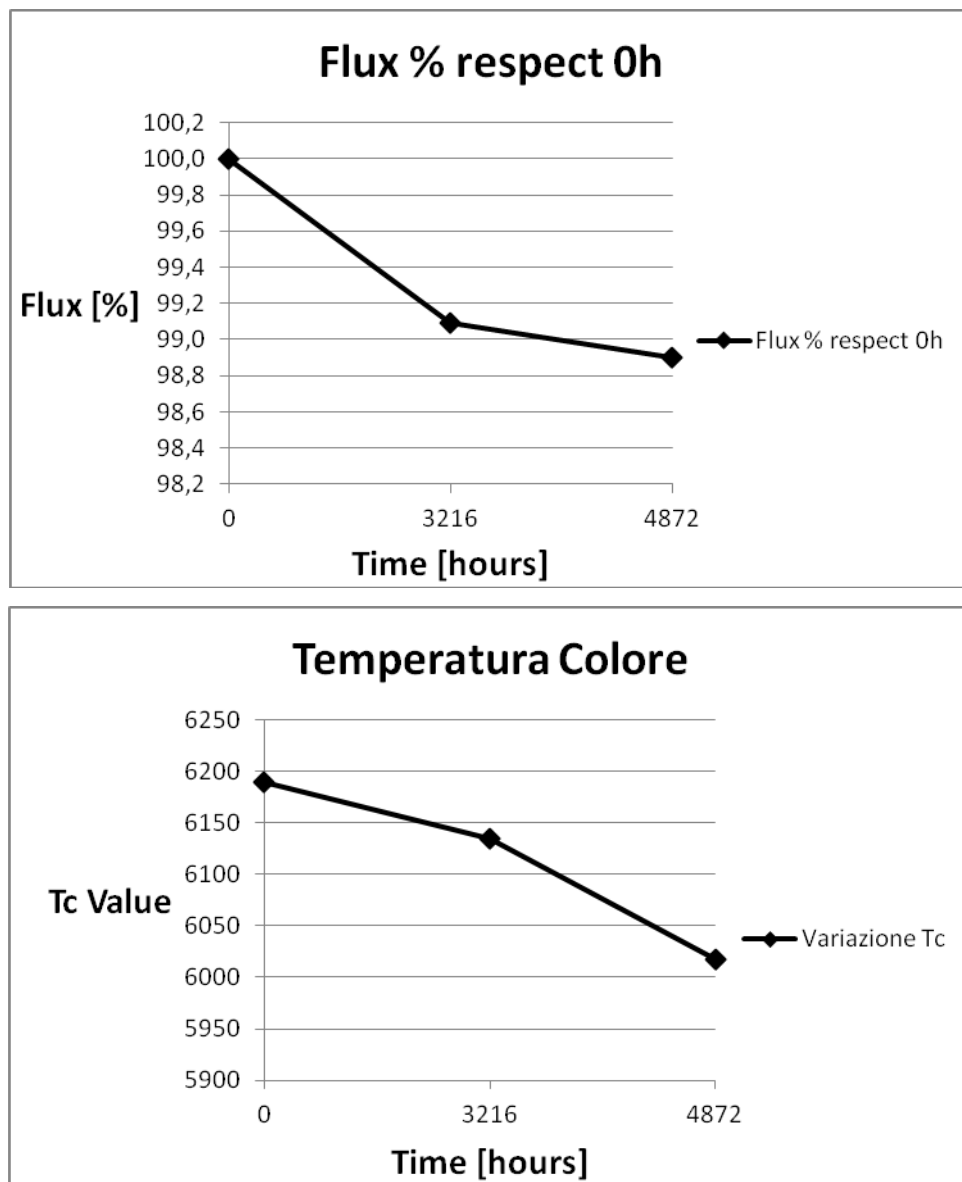


Figura 7.40 Andamento del Flusso luminoso e della Temperatura Colore

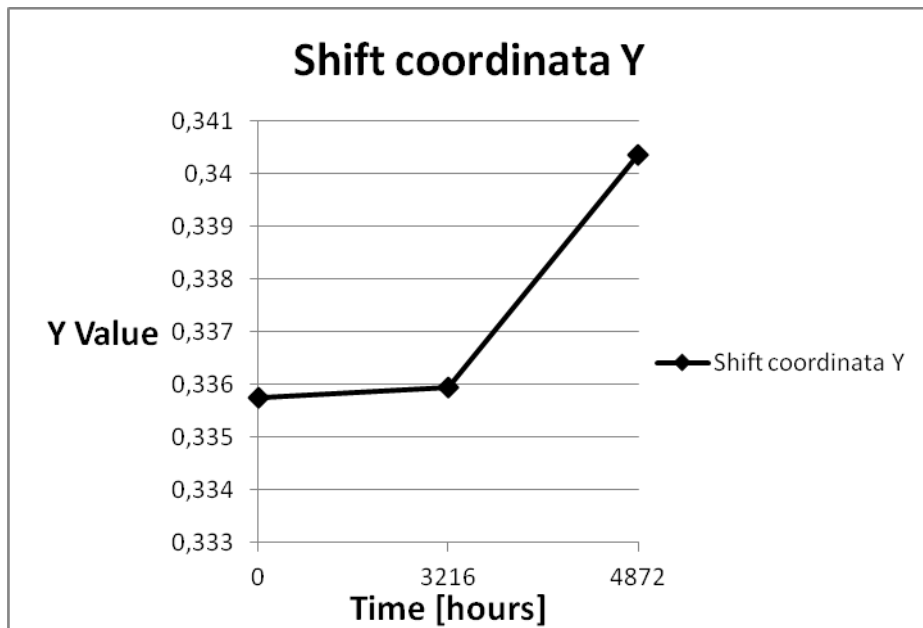
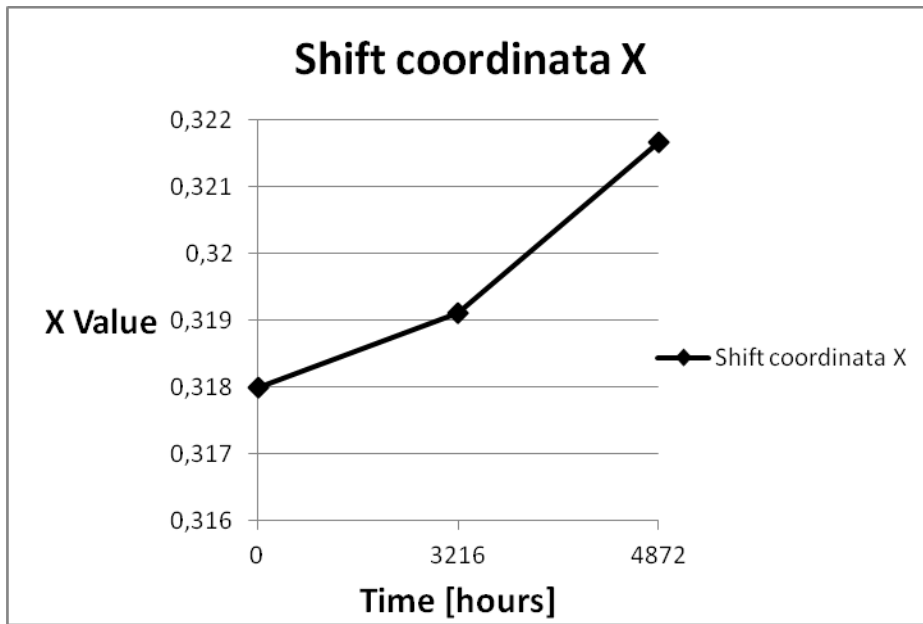


Figura 7.41 Andamento delle coordinate cromatiche

LED Blu

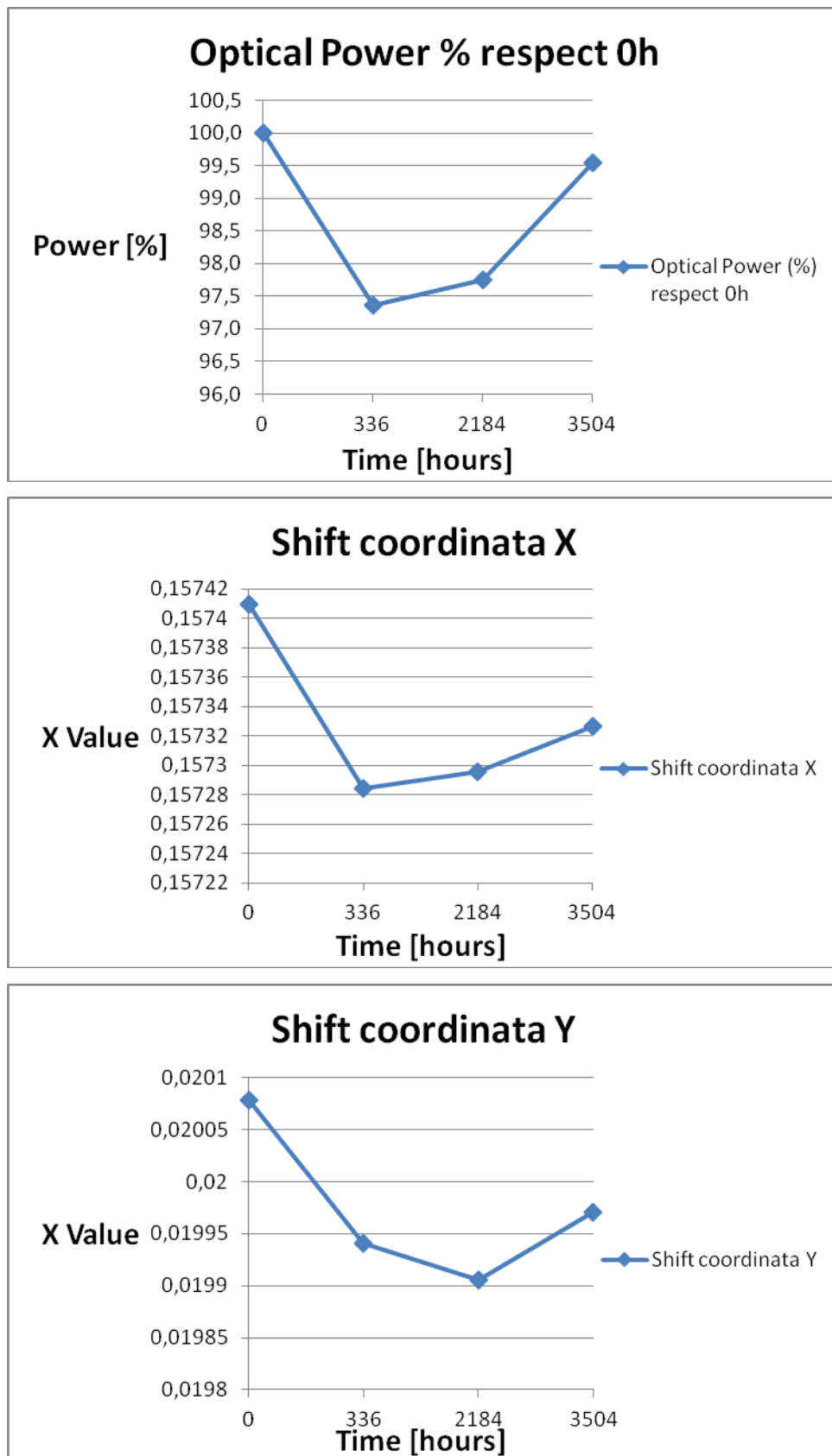


Figura 7.42 Andamento della Potenza ottica e delle coordinate cromatiche

8. Caratterizzazione dei fogli di fosfori

A differenza dei LED la cui caratterizzazione è stata trattata nel precedente capitolo, i fogli di fosfori possono essere caratterizzati solamente dal punto di vista ottico, in quanto essi svolgono la funzione di convertitore della radiazione luminosa incidente in altre lunghezze d'onda visibili.

Il processo di produzione dei fogli permette di avere il fosforo depositato su una superficie con più precisione e, in aggiunta, una diffusione della luce più naturale grazie al fatto che la luce riflessa viene riciclata da una superficie di fosfori più estesa.

Giocando inoltre sullo spessore del foglio di fosfori usato, si possono ottenere Temperature di Colore più omogenee ed intrinseche al foglio.

Anche per le misure sui campioni di fogli il setup è di fondamentale importanza e consiste principalmente nella posizione del campione rispetto allo strumento di misura e ovviamente trattandosi di misure ottiche, nelle condizioni ambientali quindi oltre alla temperatura entra in gioco anche il fattore del disturbo luminoso.

In questo capitolo vengono dapprima descritti il metodo di produzione dei fogli e ne vengono date le caratteristiche generali, vengono poi descritti i campioni presi in esame e le misure effettuate su di essi, i setup di misura, la strumentazione utilizzata e vengono descritti i tipi di stress eseguiti sui campioni di fogli.

8.1 Processo di produzione dei fogli e loro caratteristiche generali

Come detto più volte, i fosfori remoti qui analizzati si presentano sottoforma di un foglio, la cui funzione è identica ai fosfori depositati sul LED chip ossia quella di convertire la luce incidente derivante da un LED blu in altre lunghezze d'onda visibili e dare quindi la sensazione di luce bianca.

Nella seguente figura (Figura 8.1) vengono mostrate appunto le lunghezze d'onda che entrano in gioco, in blu ovviamente è tracciato lo spettro della lunghezza d'onda del LED blu mentre in rosso abbiamo lo spettro di emissione dato dall'abbinamento foglio di fosfori gialli e LED blu.

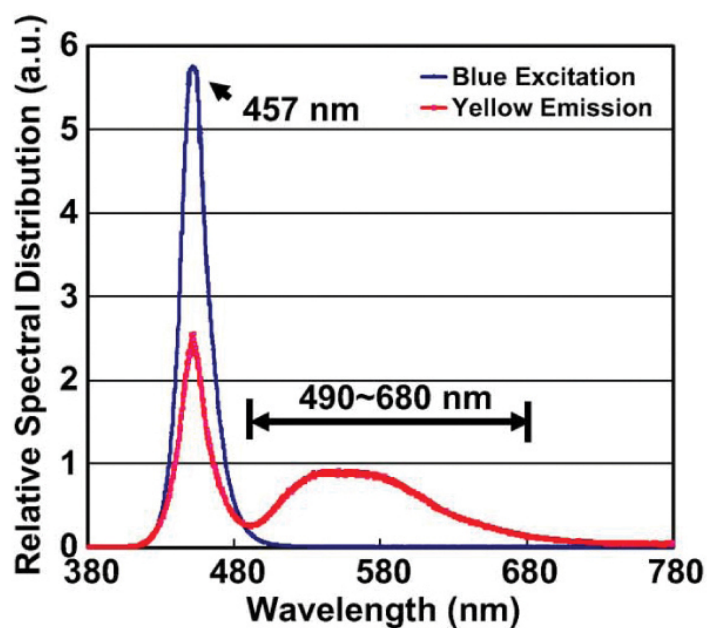


Figura 8.1 Spettro di emissione del LED blu e del sistema LED blu con fosfori remoti gialli

Dal punto di vista del metodo di fabbricazione di questi fogli di fosfori si può dire che il processo non è molto differente da quello per la preparazione della resina epossidica presente nei LED blu.

Dapprima la polvere di fosfori viene miscelata assieme ad un legante a base siliconica ed un solvente organico per formare una resina.

Mentre nei LED bianchi questa resina viene applicata direttamente nella cavità del package, al di sopra della regione attiva di un LED chip blu, nella fabbricazione dei fogli di fosfori viene colata e successivamente stesa in un film di polietilene tereftalato (PET). Successivamente la resina aderisce al substrato plastico e viene ricoperta da un ulteriore film di PET per formare così un foglio di fosfori.

Un processo semplificato di preparazione è mostrato nella seguente figura:

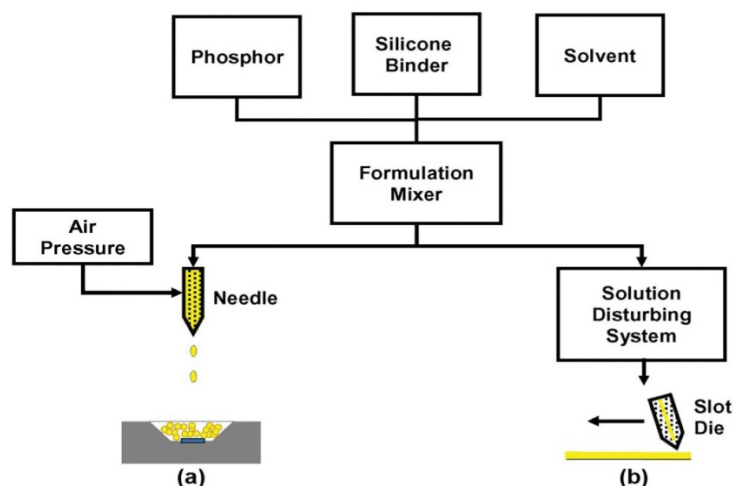


Figura 8.2 Processo di preparazione della resina epossidica: a) deposizione sopra un LED chip blu, b) stesura sopra un film di PET per la produzione del foglio di fosfori remoti

Il risultato del processo dunque è un foglio plastico semirigido abbastanza delicato in quanto anche una piccola piegatura fa sì che si formi all'interno un difetto dei fosfori, cioè un microscopico spostamento della resina che può causare un mutamento della riflessione o trasmissione dell'onda luminosa incidente.

Ovviamente se la superficie del display è grande piccoli difetti del foglio di fosfori sono praticamente impercettibili ma se le dimensioni del display sono contenute come quelli da 15 pollici, questi difetti possono diventare rilevanti per la corretta trasmissione e conversione della luce.

Tuttavia, all'interno dei fogli di fosfori, essendoci come già anticipato, una polvere di fosfori, si trova una morfologia irregolare dei fosfori e piena di vuoti che fanno sì che la radiazione incidente venga trasmessa in modo diffuso (Figura 8.3).

Quindi, il foglio di fosfori potrebbe venire usato simultaneamente come convertitore di lunghezze d'onda e come diffusore.

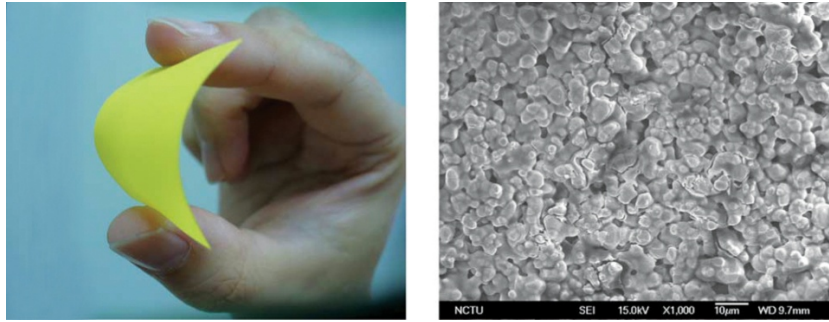


Figura 8.3 Foglio di fosfori: a sinistra come si presenta il foglio di fosfori, a destra la sua morfologia interna vista con il microscopio elettronico

Le particelle di fosfori presenti all'interno del foglio hanno dimensione media di circa 7.5 μm e i fogli, che hanno spessore che varia dai 10 ai 40 μm , permettono di controllare la temperatura di colore in un range che va dai 3000°K ai 9500°K.

8.2 Caratteristiche dei campioni di fogli e introduzione alle misure

I campioni presi in esame sono stati prelevati da un foglio di fosfori di dimensioni abbastanza grandi ma ovviamente per ragioni pratiche di misure e stress, il lavoro di studio si è svolto su dei campioni di forma rettangolare di dimensioni di circa 6cm x 4cm.

I campioni prelevati sono appartenenti a 3 tipologie differenti di fogli che qui chiameremo di tipo A, B e C rispettivamente. I primi due campioni sono formati da uno strato di fosfori interposto tra due fogli di PET (Polietilene tereftalato) e variano tra di loro per la concentrazione di fosfori presente (e quindi spessore); il terzo tipo C invece oltre che variare per la concentrazione di fosfori presente, differisce dai precedenti anche per il substrato plastico su cui sono stesi i fosfori che in questo caso è di PMMA (PolyMethyl MethAcrylate).

Le caratteristiche generali sono riportate di seguito:

Foglio Tipo A: spessore 12 μm (PET)

Foglio Tipo B: spessore 14 μm (PET)

Foglio Tipo C: spessore 3mm (PMMA).

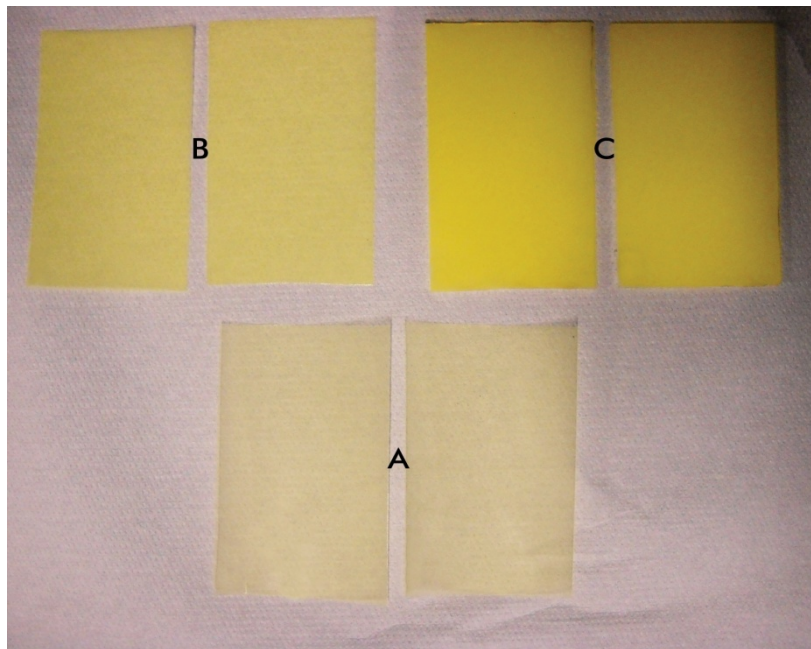


Figura 8.4 Le 3 tipologie di fogli di fosfori oggetto di studio sotto stress

Per ogni tipologia di foglio sono stati prelevati 2 campioni in quanto su ognuno di essi sono state eseguite due prove di stress differenti e tutti i campioni di fogli sono stati identificati ponendo una sigla che identifica la lettera appartenente alla tipologia del campione e il tipo di stress a cui sono sottoposti.

Per eseguire le misure sui campioni di fogli per in seguito constatare un ipotetico degrado dal punto di vista ottico sono state costruite su una basetta di alluminio due strutture per simulare l'intera struttura di un display

Per ogni campione si sono svolte misure a 3 diverse correnti e per ogni corrente si sono fatte le misure ponendo sopra al diffusore della struttura prima solamente il campione di foglio e successivamente il campione con sopra un piccolo pannello LCD a TFT dotato dei propri filtri ottici in modo da ottenere una caratterizzazione anche di sistema.

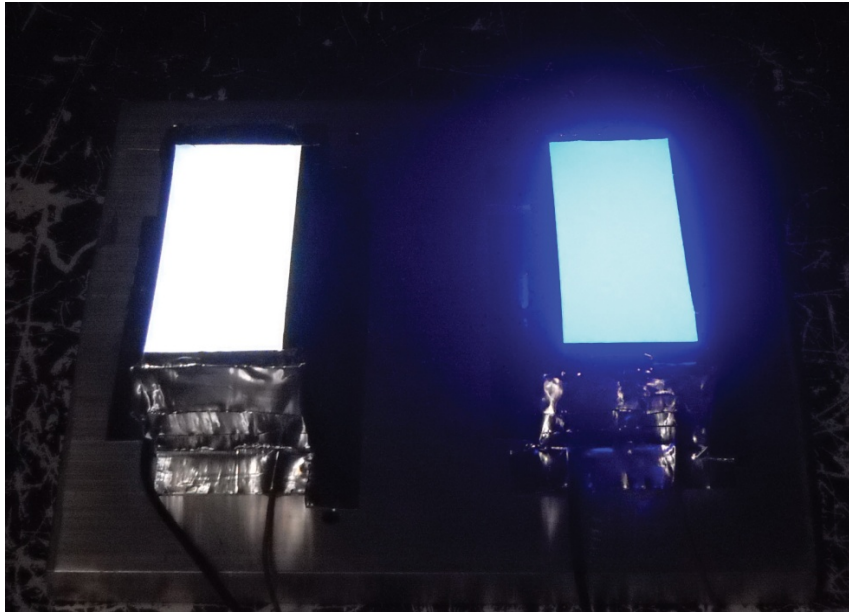


Figura 8.5 Le 2 strutture a LED bianchi e a LED blu che simulano le Back Light Unit usate per le misure

8.3 Misure ottiche iniziali

Le misure ottiche eseguite sui campioni di fogli di fosfori, al fine di farne una caratterizzazione ottica, sono state mirate per analizzare l'andamento della distribuzione spettrale del flusso luminoso emesso, per calcolare la temperatura di colore e le coordinate cromatiche del sistema formato dai LED blu più i fosfori remoti.

Le misure dello spettro, come già detto, oltre a fornire informazioni sull'intensità, da informazioni anche sulle lunghezze d'onda di emissione.

Setup di misura: per queste misure, come detto, il setup è di fondamentale importanza essendo delle misure ottiche svolte in modo differente rispetto a quelle per la caratterizzazione dei LED: mentre le misure su quest'ultimi sono state svolte ponendo il componente all'interno della struttura dello strumento (sfera integratrice e foto goniometro), chiusa e isolata dall'ambiente esterno, ora le misure sui campioni di fosfori vengono eseguite in un ambiente non isolato come può essere una stanza, dove possono esserci fonti luminose di disturbo.

A tal proposito quindi, le misure svolte su questi campioni di fogli sono state eseguite all'interno di una Dark Room (stanza buia) caratterizzata dall'avere le superfici dei muri,

pavimento, soffitto e di qualsiasi cosa al suo interno colorate di nero per evitare le riflessioni di una ipotetica fonte luminosa di disturbo. Ovviamente le misure sono state svolte al buio in modo che l'unica fonte luminosa percepita dagli strumenti sia quella della basetta su cui vengono appoggiati i campioni di fogli. Inoltre sono state sempre tenute a memoria sia la posizione della basetta sia degli strumenti di misura, montati su un apposito supporto, per permettere di avere lo strumento sempre al centro e in posizione ortogonale rispetto alla superficie del foglio da misurare.

Da punto di vista pratico le strutture costruite sulla basetta sono una con Back Light Unit costituita da LED Bianchi della tipologia High Power LED, l'altra con LED Blu della stessa tipologia. Sopra la BLU sono stati posti dei diffusori proprio per simulare la prima parte di stack ottico di un display come mostra la figura.

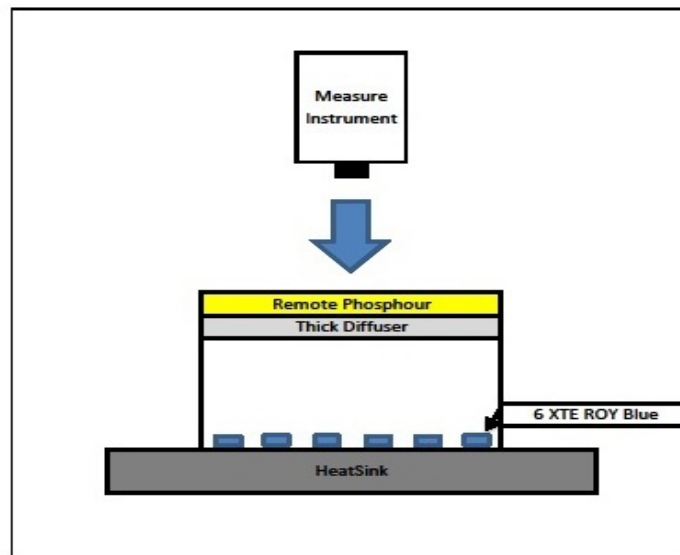


Figura 8.6 Struttura per misure dei campioni senza TFT

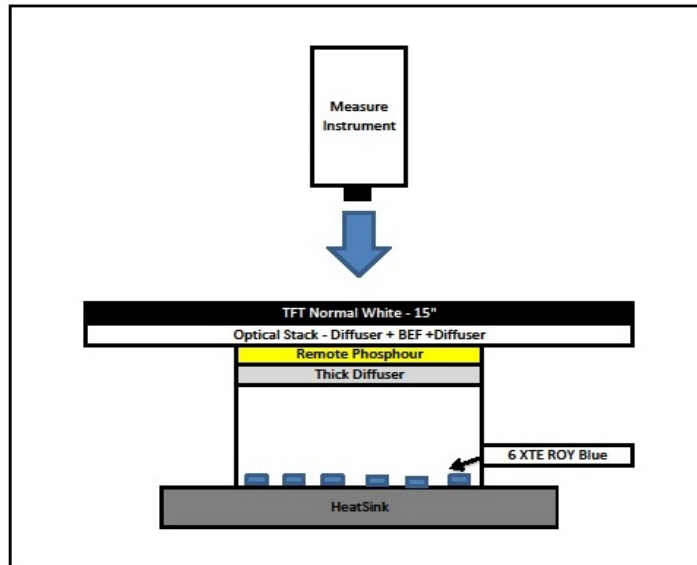


Figura 8.7 Struttura per misure dei campioni con TFT

I LED delle due strutture sono stati alimentati a 25V a 3 diverse correnti con un alimentatore HQ Power.

Per svolgere queste misurazioni si sono utilizzati strumenti ottici molto delicati e molto costosi. Si tratta di uno *Spettrometro* e un *Video Fotometro* dotati di proprio software di misura abbastanza intuitivo. Per eseguire le misure sono stati montati su un supporto apposito in modo da avere il loro l'obiettivo rivolto verso il foglio di fosfori in modo ortogonale.

Lo *Spettrometro* utilizzato è della JETI Technische Instrumente GmbH; esso è uno spettro radiometro a banda larga, ossia permette di misurare una gamma di lunghezze d'onda in un range molto esteso che va dagli UV agli IR, da 250nm a 1000nm.

Mediante il software di misura permette di ricavare parametri come la temperatura di colore, coordinate cromatiche, luminanza, lunghezza d'onda dominante e di visualizzare lo spettro della radiazione misurata con un intervallo di 1nm.

Il *Video Fotometro* LMK 98-4 è uno strumento adatto alla misura di corpi luminosi e la tecnologia di misurazione del colore di cui è dotato lo rendono eccezionale per l'analisi e il controllo delle caratteristiche di resa del colore per monitor e display di elevata qualità. Lo strumento infatti acquisisce delle immagini e poi con il software, di cui è dotato, è possibile controllare l'uniformità dell'illuminazione, controllare la resa dei colori, ricavare valori di luminanza e di coordinate cromatiche in tutti i punti dell'immagine acquisita.

Immagini dello Spettroradiometro e del Video Fotometro vengono rispettivamente mostrate in Figura 8.8 e 8.9 .



Figura 8.8 Spettroradiometro JETI



Figura 8.9 Video Fotometro LMK 98-4

Su ogni campione di foglio di fosfori, con valori di corrente di 100mA, si sono eseguite due misure con lo Spettroradiometro JETI, una solamente con il campione e l'altra ponendo sopra al campione il pannello LCD a TFT. Le due misure si sono eseguite puntando l'obiettivo dello strumento al centro del campione.

Con il Video Fotometro LMK invece si sono svolte misure a 100mA, 150mA e 200mA e per ogni valore di corrente si sono eseguite 2 misure, delle quali, la prima ponendo sopra la struttura a LED blu solamente il foglio campione, la seconda posizionando il foglio e il pannello LCD a TFT. Essendo uno strumento che analizza immagini, il Video Fotometro è stato posizionato in modo da rilevare tutta l'area illuminata del campione, in modo che esso desse i valori delle misure di luminanza, radianza e coordinate cromatiche calcolati come media sull'area interessata.

Preventivamente alle misure sui campioni la struttura con i LED blu è stata accesa per far raggiungere ai LED la temperatura di regime, in modo tale che la dalla prima misura in poi, la temperatura dei LED e quindi la loro potenza ottica emessa fosse costante.

Le misure effettuate sui campioni vengono così riassunte:

JETI misure @100mA su:

- Campione A 85°C
- Campione A UV
- Campione B 85°C
- Campione B UV
- Campione C 85°C
- Campione C UV

LMK misure @100mA, 150mA e 200mA su:

- Campione A 85°C
- Campione A UV
- Campione B 85°C
- Campione B UV
- Campione C 85°C
- Campione C UV

Per non diventare troppo petulanti, s'intende che le misure sopra elencate siano state svolte, per ogni campione, sia con che senza il pannello LCD a TFT.

8.4 Stress dei fogli

Un ulteriore obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di verificare l'affidabilità di questi fogli di fosfori ed eseguire su di essi delle Prove Accelerate sfruttando due fattori di stress di natura Ambientale, identici a quelli che si possono presentare una volta che i fogli vengo effettivamente montati su un display che implementi questa tecnologia di retroilluminazione.

I meccanismi di stress scelti sono:

1. stress di temperatura costante @85°C
2. stress di raggi UV costante

I 3 campioni di fogli destinati allo stress termico sono stati posti in un forno Heraeus a 85°C costanti mentre i 3 campioni sottoposti ai raggi UV sono stati depositati all'interno di una camera Solar Master all'interno della quale c'è una lampada particolare che simula i raggi UV solari.



Figura 8.10 Forno per le prove di stress in temperatura @85°C



Figura 8.11 La camera UV per la prova di stress sotto raggi UV

Ciò che ha portato alla scelta di questi due tipi di stress, a differenza dello stress scelto per i LED, è dovuto al fatto che un display posto a temperature ambiente elevata oppure esposto al sole potrebbe raggiungere valori di temperature interne non troppo distanti da 85°C e potrebbe inoltre essere interessato dai raggi UV che entrano attraverso l'involucro di vetro esterno e si riflettono nello stack ottico, tra il pannello LCD e i filtri.

Tutto questo potrebbe portare a un cambiamento delle caratteristiche intrinseche dello strato di fosfori oppure a un deterioramento del materiale con cui i fogli sono ricoperti.

Le prove di stress, eseguite in modo continuativo per simulare il caso peggiore di un display esposto al sole e in funzionamento continuo (h24) sono state eseguite proprio per ricercare la possibilità che questi fogli sottoposti a questi due fattori ambientali possano cambiare le loro proprietà.

Periodicamente sono state svolte delle misure, identiche alle stesse misure iniziali svolte prima dell'avvio dello stress, volte proprio alla ricerca di possibili cambiamenti quali calo della luminanza, shift delle coordinate cromatiche o della temperature di colore della luce uscente dal foglio di fosfori oppure cambiamento nella distribuzione della luminosità.

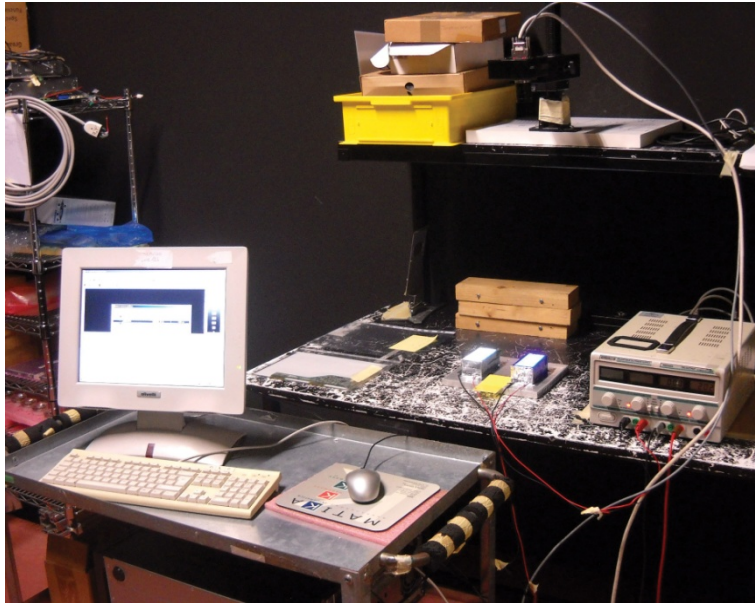


Figura 8.12 Setup di misura

Un aspetto di cui è stato tenuto conto nelle misure è stato di considerare l'off set della misura della struttura a LED blu: si è notato che alimentando i LED blu alla stessa corrente ed eseguendo una misura con lo spettroradiometro o con il video fotometro, i valori d'intensità variano da una misura all'altra; molto probabilmente questo è dovuto all'alimentatore che, nonostante sul suo display indichi lo stesso valore, non eroga ogni volta esattamente la stessa corrente e ciò si manifesta in una differenza di intensità prodotta dai LED rilevata dallo strumento.

Per tenere conto di questo fatto, e per riuscire dunque a discriminare una variazione di intensità causata solamente dai campioni stressati, prima di cominciare con le misure sui campioni di fogli è stata eseguita la misura dei LED blu, e considerato questo valore pari al 100% del valore di intensità. I valori derivanti dalle misure sui campioni sono stati poi corretti con un coefficiente che tiene conto di questo fattore di errore.

8.5 Risultati

I risultati vengono dunque tabellati in valori percentuali, un modo utile anche all'azienda per capire l'andamento delle caratteristiche dei campioni, sia della luminanza e radianza sia delle coordinate cromatiche della luce bianca che è rilevata dagli strumenti.

I grafici vengono presentati per ogni campione di foglio sotto stress.

Vengono presentati solo i grafici relativi alle misure con TFT in quanto l'aggiunta di quest'ultimo non fa variare le misure, infatti viene inteso con un filtro ulteriore, e quindi in tutto lo spettro delle radiazioni esso agisce provocando un calo uniforme della luminanza in tutto lo spettro.

Di seguito sono riportati gli andamenti dello spettro e delle misure di luminanza corrette ed espresse in percentuale durante lo stress.

Campioni A:

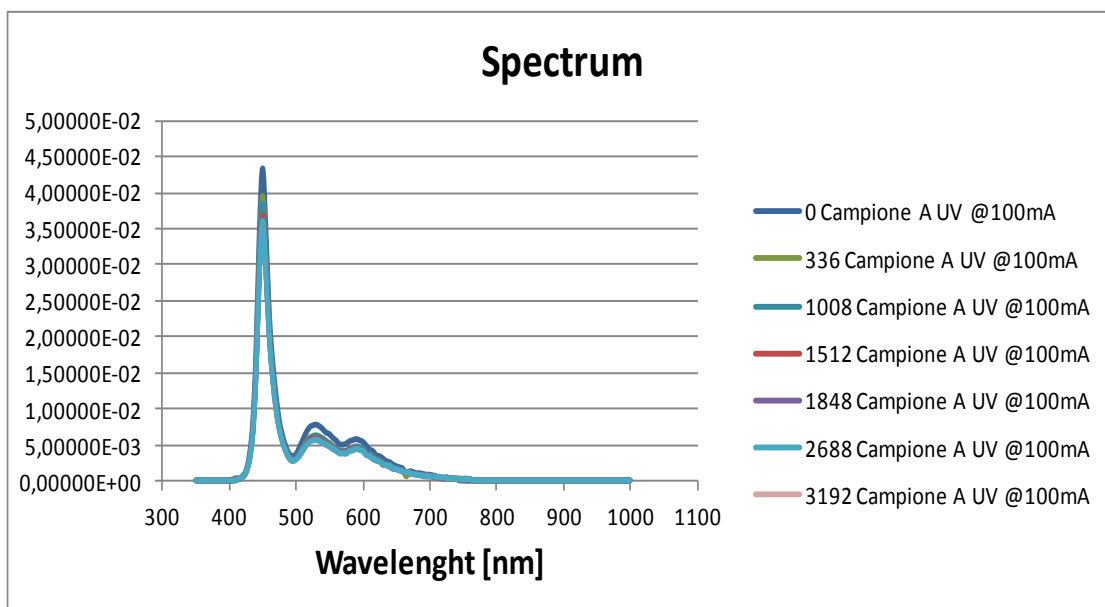


Figura 8.13 Andamento Spettro Campione A UV

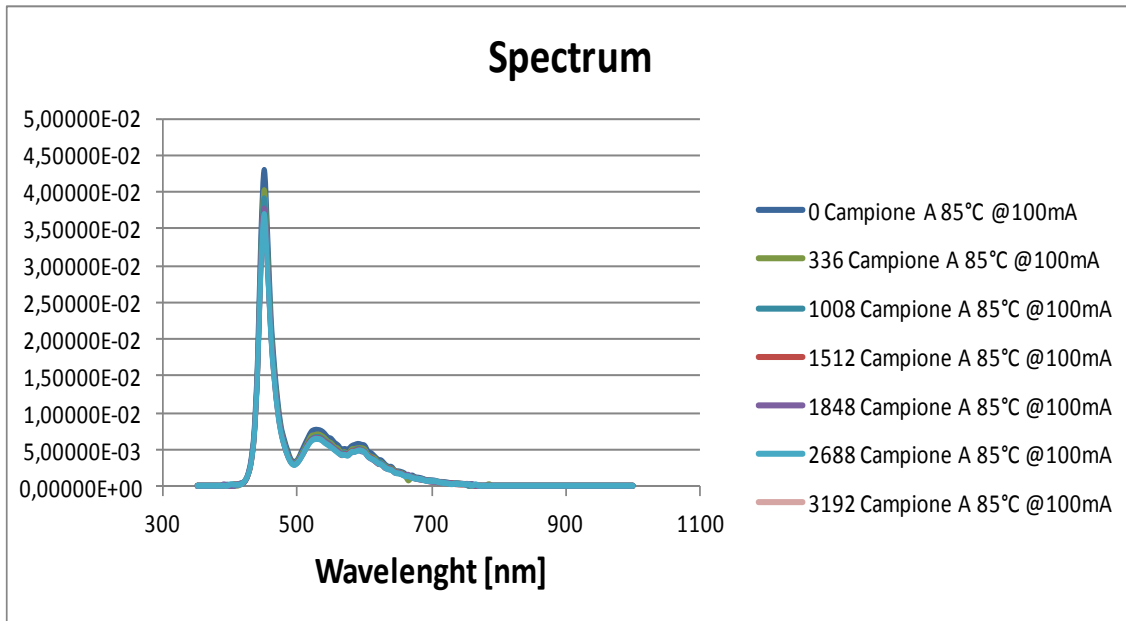


Figura 8.14 Andamento Spettro Campione A 85°C

Campioni B:

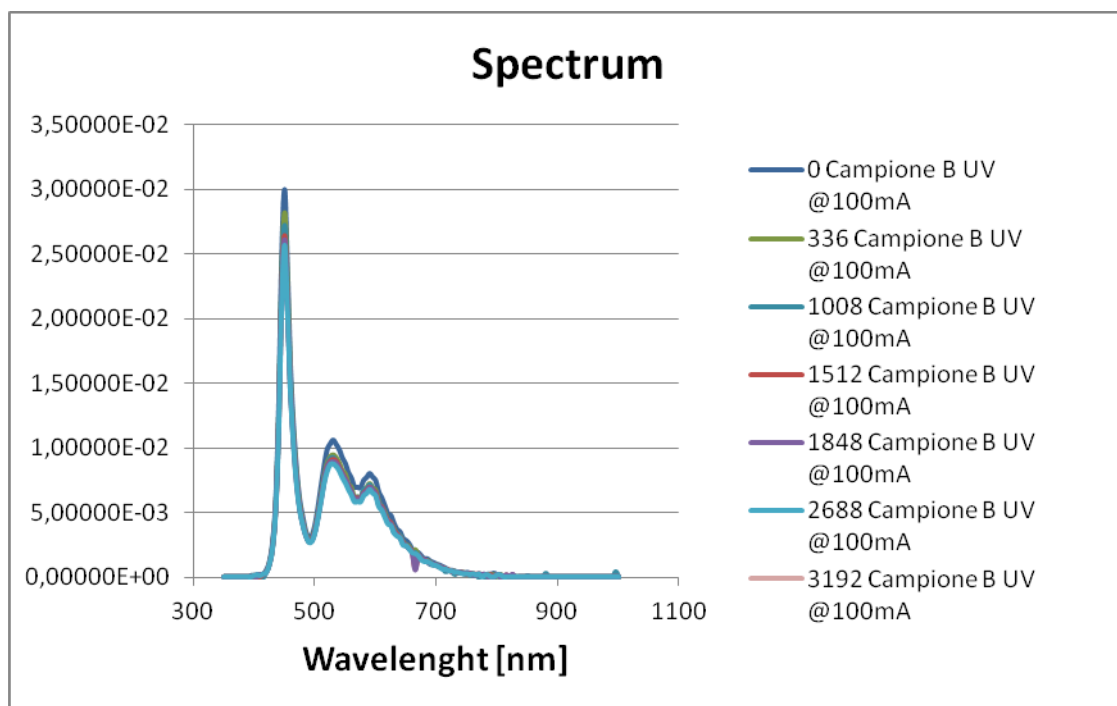


Figura 8.15 Andamento Spettro Campione B UV

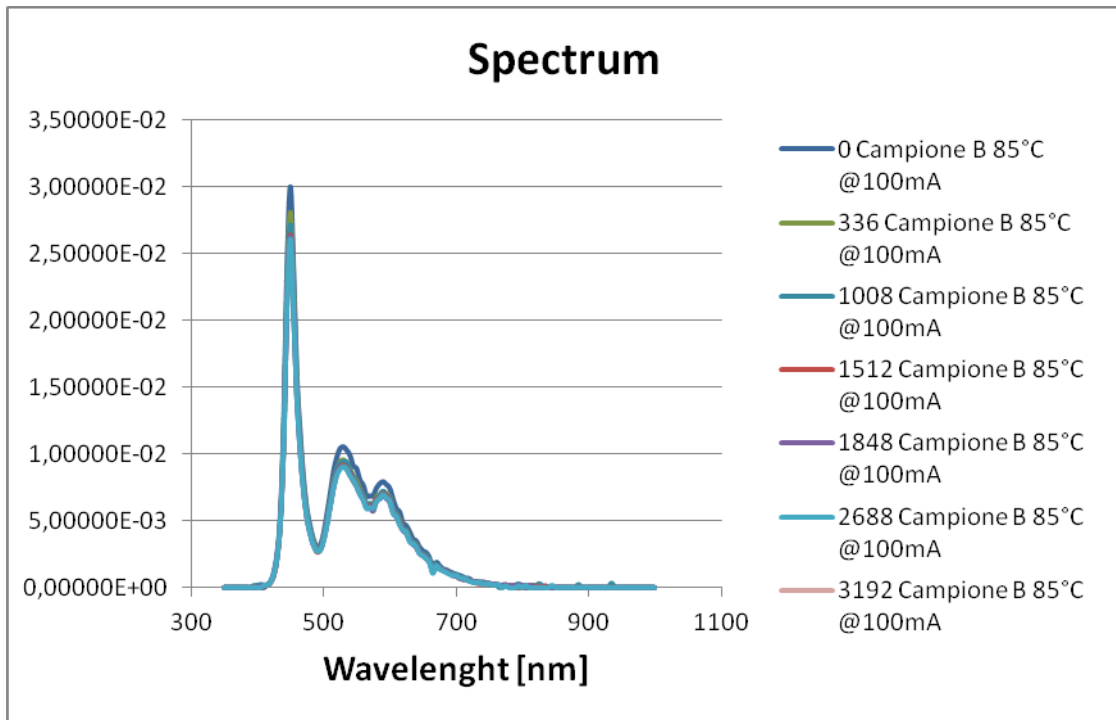


Figura 8.16 Andamento Spettro Campione B UV

Campioni C:

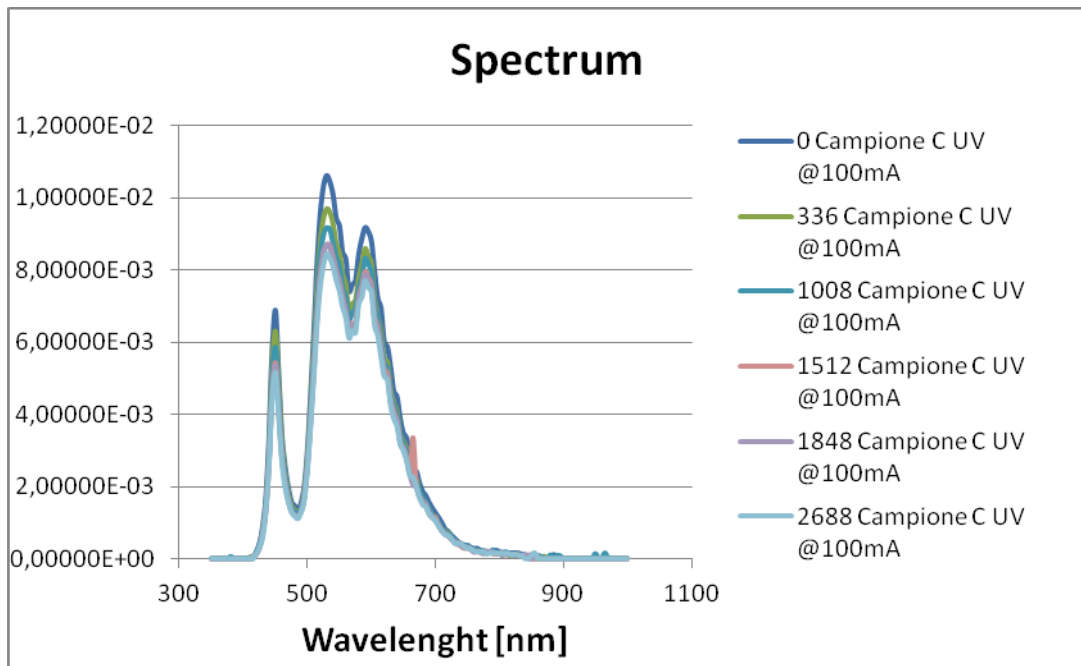


Figura 8.17 Andamento Spettro Campione C UV

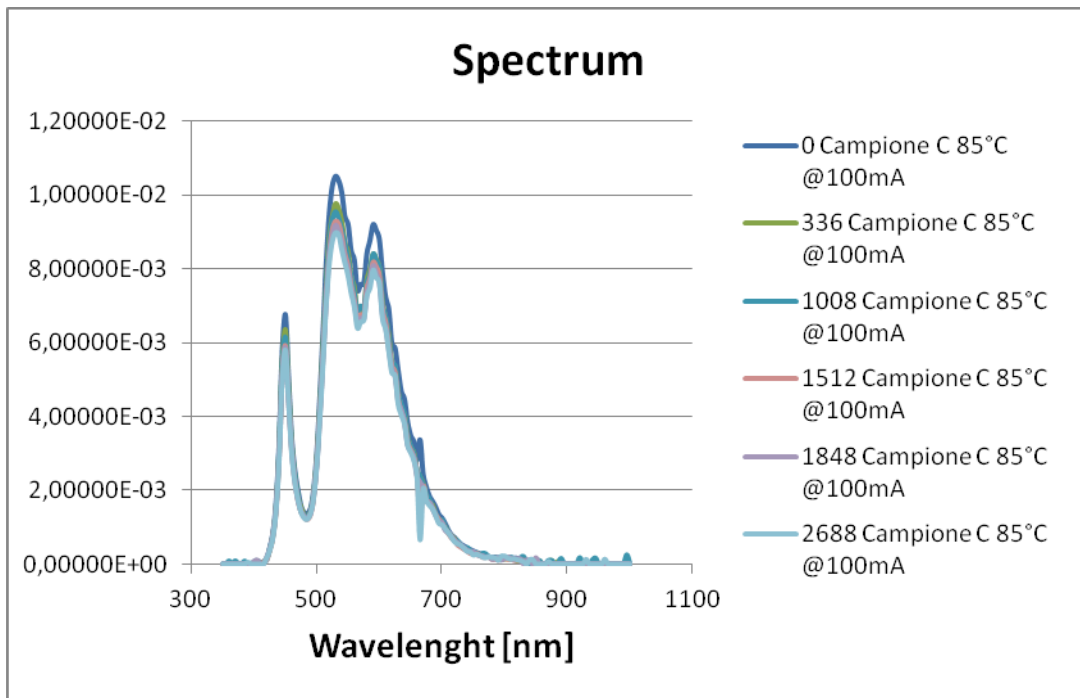
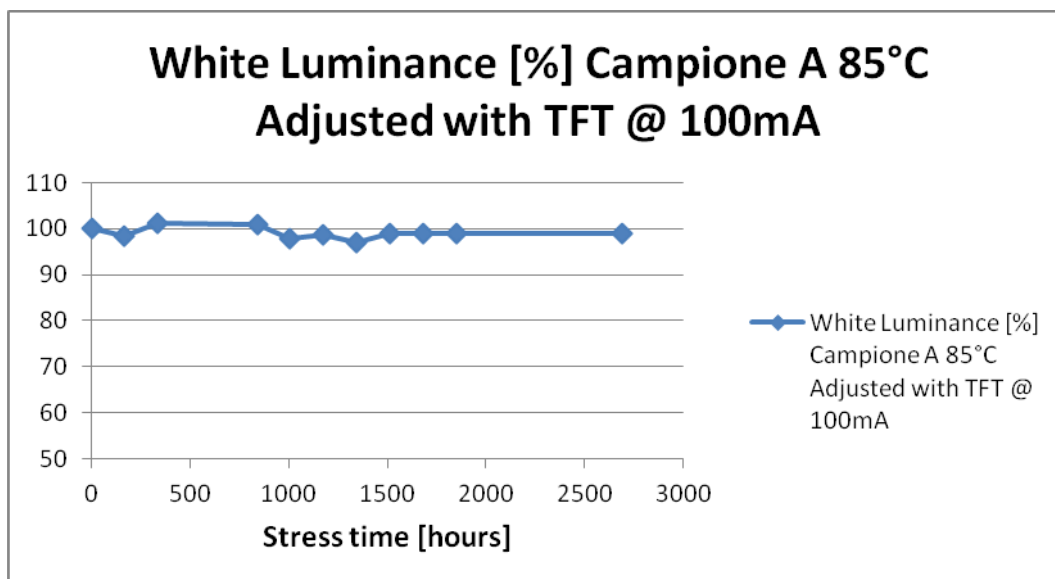


Figura 8.18 Andamento Spettro Campione C 85°C

Di seguito sono riportate le misure della luminanza in valore percentuale corrette rispetto al valore della luminanza della sorgente blu.

Campioni A @100mA:



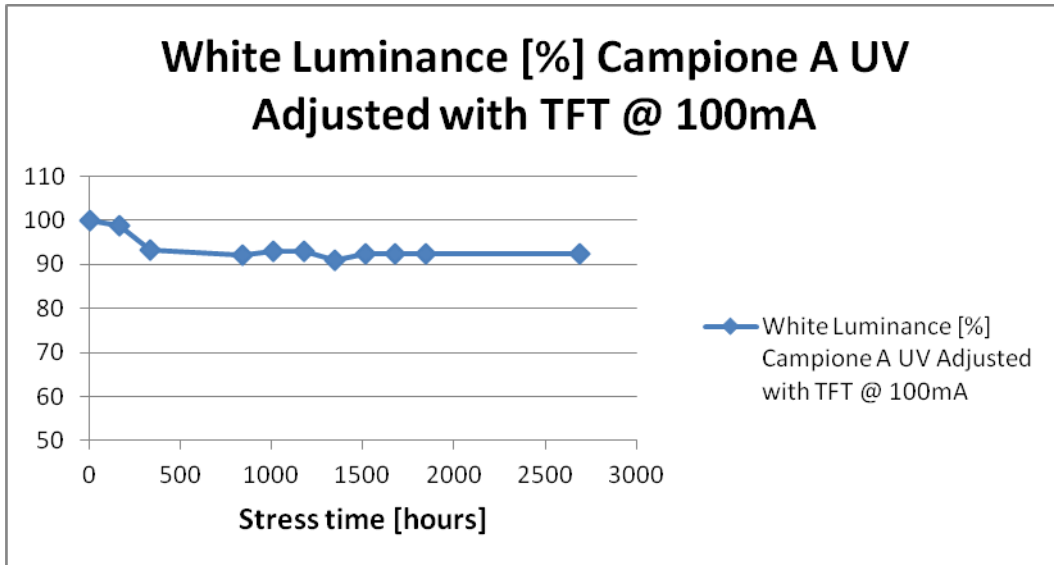
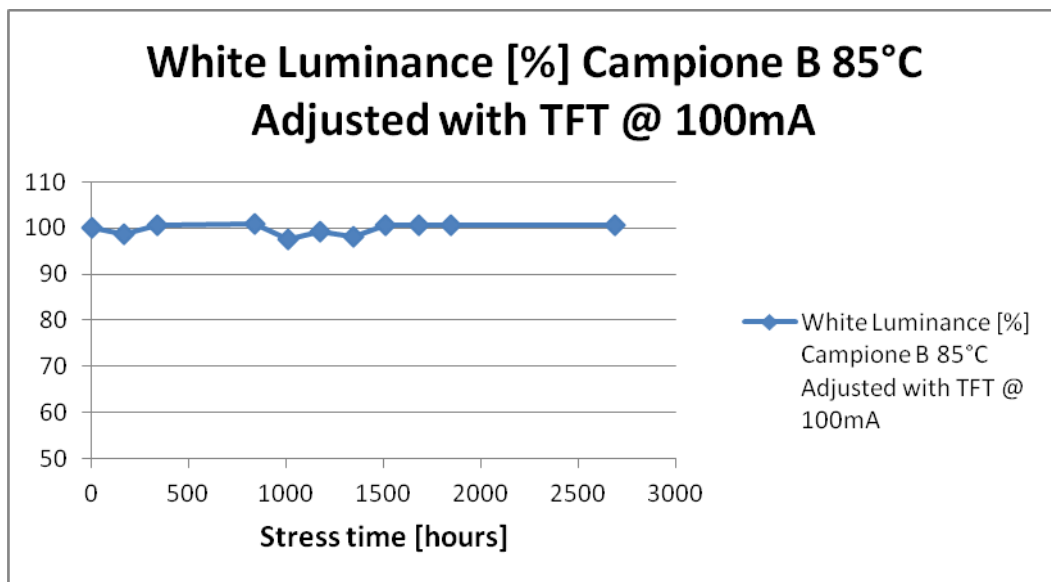


Figura 8.19 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni A

Campioni B @100mA:



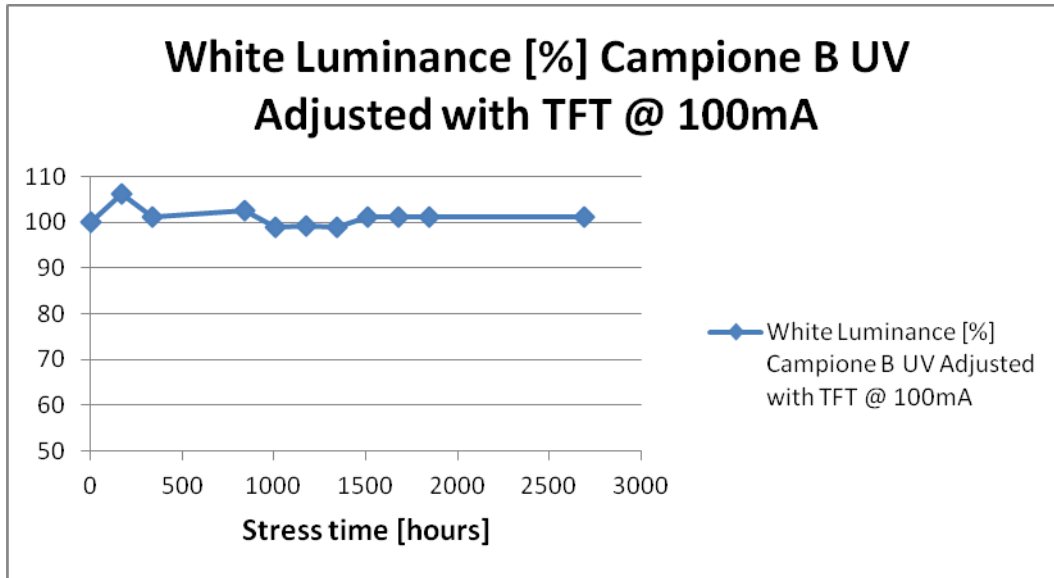
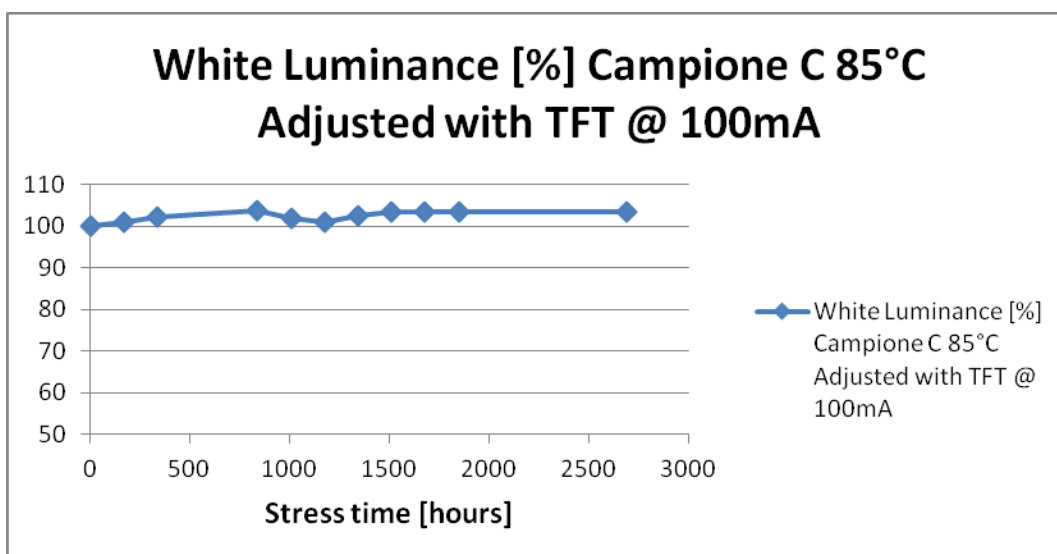


Figura 8.20 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni B

Campioni C @100mA:



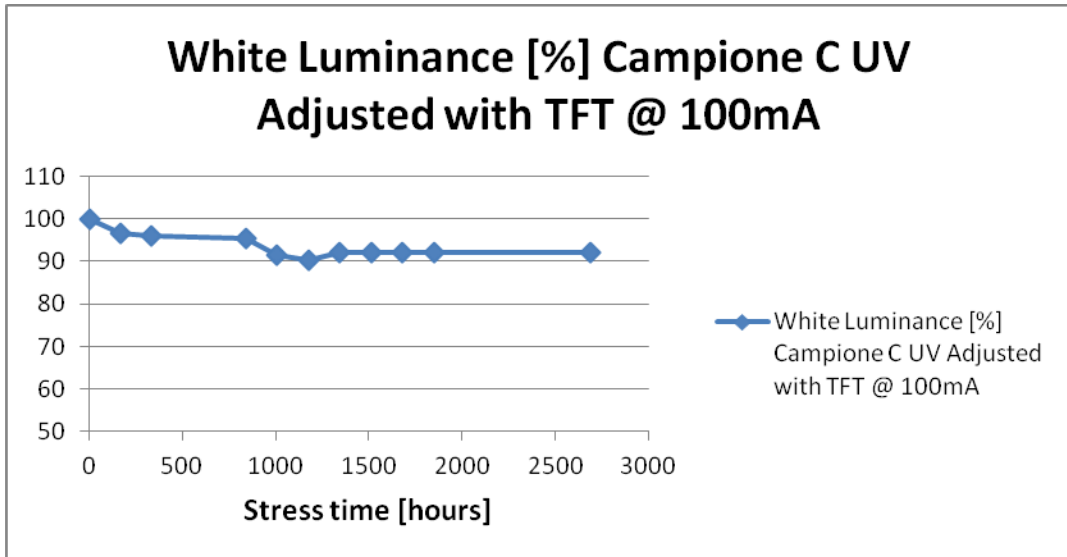
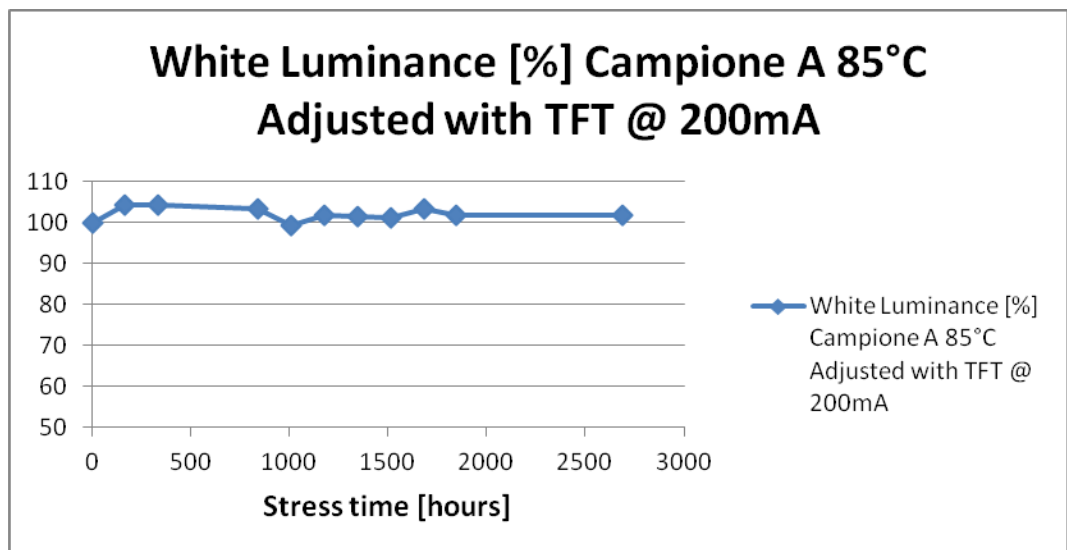


Figura 8.21 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni C

Campioni A @200mA:



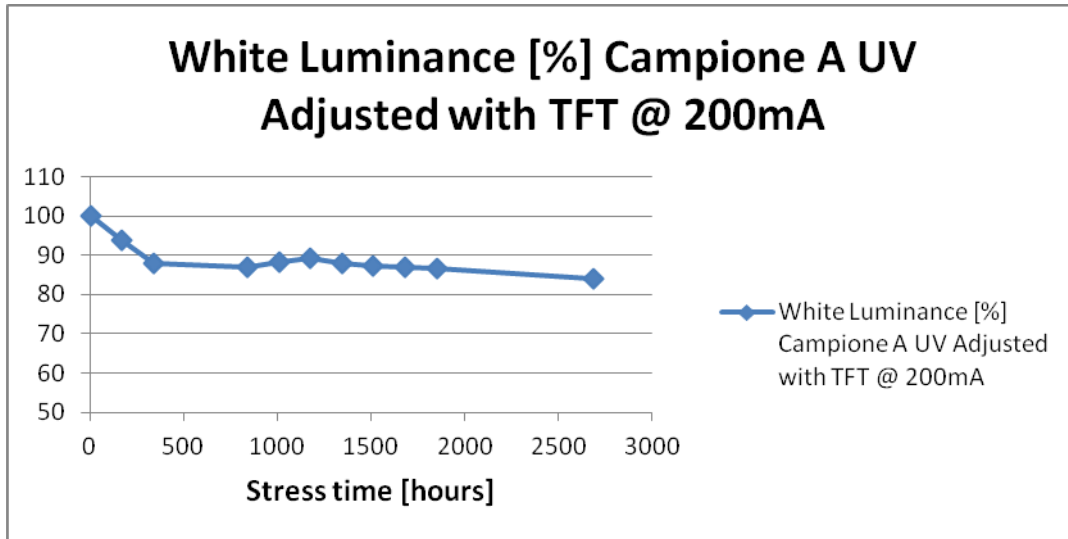
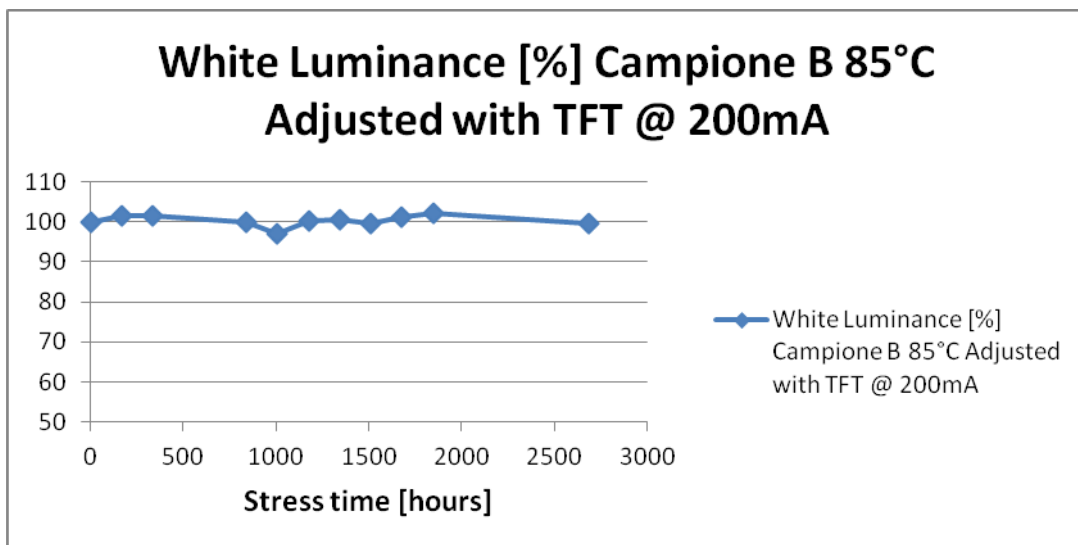


Figura 8.22 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni A

Campioni B @200mA:



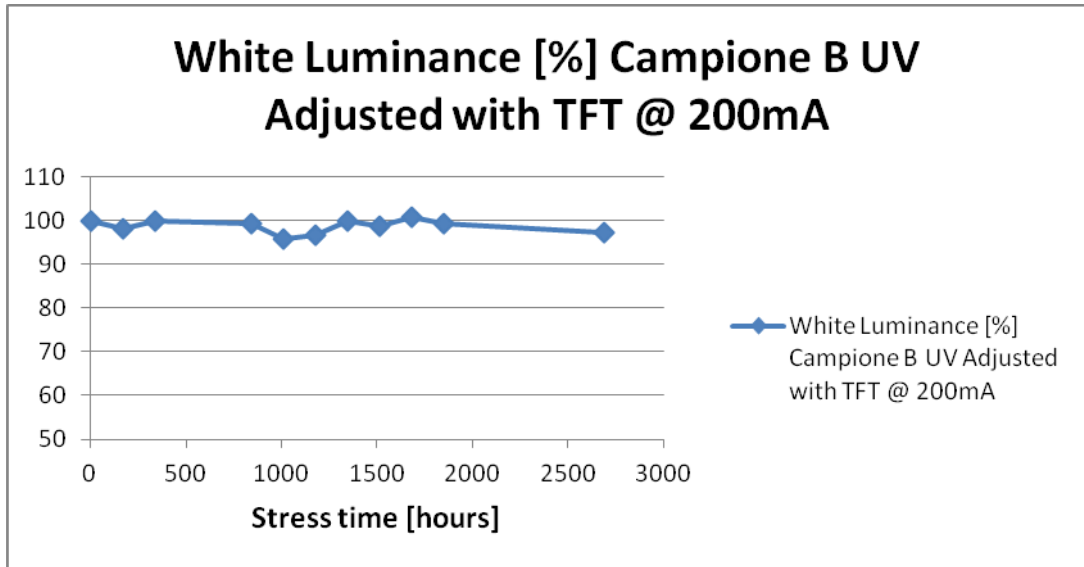
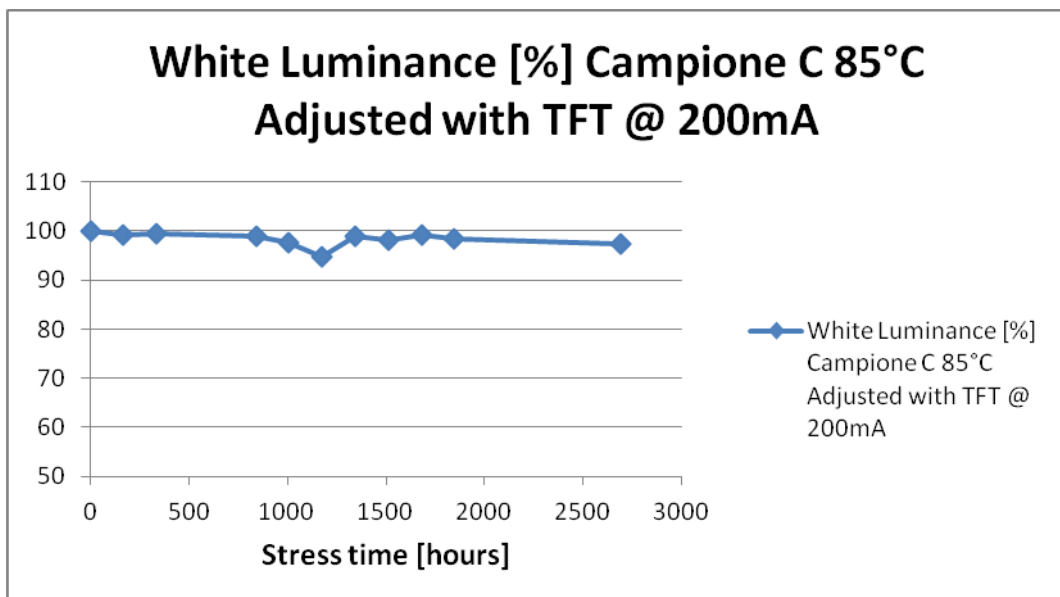


Figura 8.23 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni B

Campioni C @200mA:



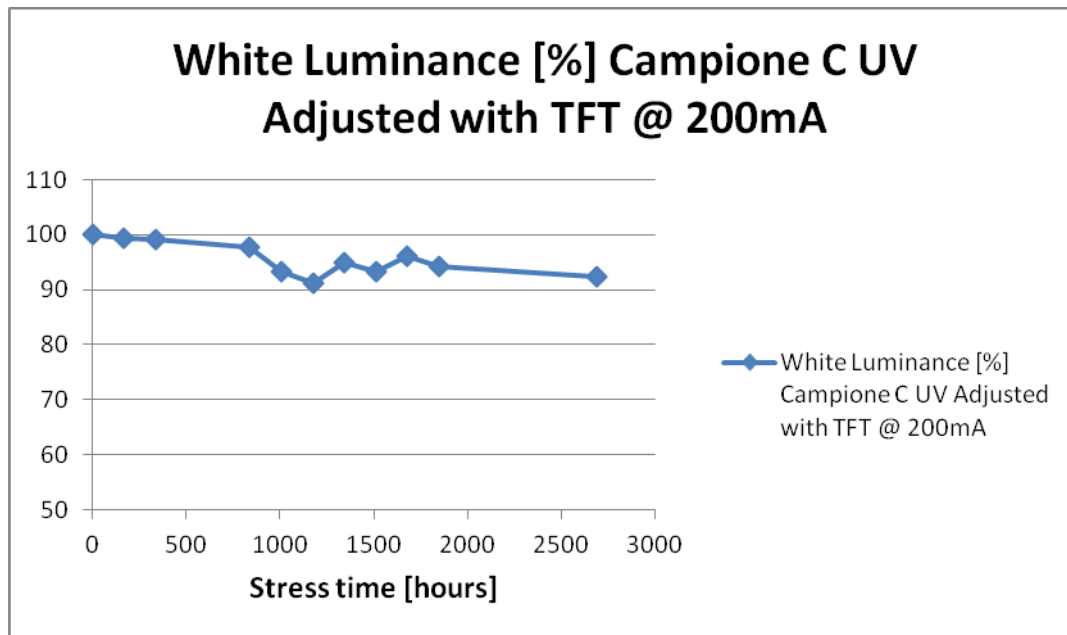


Figura 8.24 Andamento durante lo stress della luminanza dei campioni C

Dai grafici e dalle misure si evince che i campioni stressati a 85°C non hanno un calo di luminanza ne se misurati a 100mA ne a 200mA.

Risulta abbastanza evidente invece che i campioni stressati sotto i raggi UV hanno subito un calo del loro potere di conversione; in particolare i campioni A e C hanno perso circa 8 punti percentuale della luminanza @100mA mentre risulta più marcata la perdita quando stressati ad una corrente di 200mA, in cui si raggiungono valori del 15% per il campione A e del 9% per il campione C.

Il campione B insomma si dimostra essere il più robusto non dimostrando significative variazioni di luminanza. Questo può derivare dal fatto che il foglio B è più spesso rispetto al foglio A ed è strutturato in modo diverso rispetto al foglio C.

9. Implementazione display a LED da 32’’

Ultimo obiettivo di questo lavoro, per chiudere il cerchio, è stato quello di implementare le due tecnologie viste, LED bianchi e LED blu con fosfori remoti. Per fare questo si sono conglobate le due tecnologie di retroilluminazione in un unico Display da 32 pollici in modo da avere dal punto di vista visivo subito un paragone.

Si è trattata di un’operazione non semplice e che ha portato alla luce alcune problematiche dal punto di vista meccanico e strutturale del display fortunatamente risolte con qualche accortezza e con qualche idea ingegnosa.

Prima di tutto, si è cominciato con lo smontare un display in disuso, togliendo le parti che non sarebbero servite per il raggiungimento dello scopo, “spogliando” il display strato per strato, smontando il vetro protettivo frontale, il pannello LCD a TFT per arrivare alla parte d’interesse rappresentata dallo stack di filtri ottici e dalla Back Light Unit.

Queste due parti del display infatti sono le parti più delicate in quanto si va a lavorare proprio su di esse, su una per inserire un foglio di fosfori assieme ai filtri e sull’altra per sostituire la MCPCB di LED bianchi con quella di LED blu.

Siccome è stato un lavoro molto pratico e poco teorico, saranno descritti i passi del lavoro svolto accompagnati da delle immagini che chiariscono i punti cruciali.

Successivamente saranno descritte il tipo di misure che si sono eseguite sul display per operare un confronto ottico tra le due tecnologie.

9.1 Smontaggio e modifica del display

Come anticipato, si è cominciato smontando il display per arrivare alla parte dove si sarebbe dovuti intervenire, ossia la back light unit e lo stack di filtri ottici.

Per prima cosa si è intervenuti smontando metà della MCPCB a su cui sono montati i LED bianchi del tipo 2 sostituendola con quella a LED blu del tipo 2.

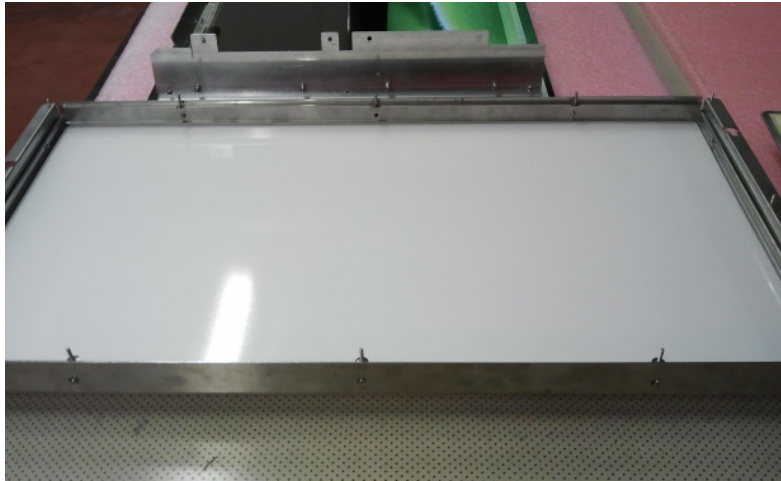


Figura 9.1 Smontaggio del display

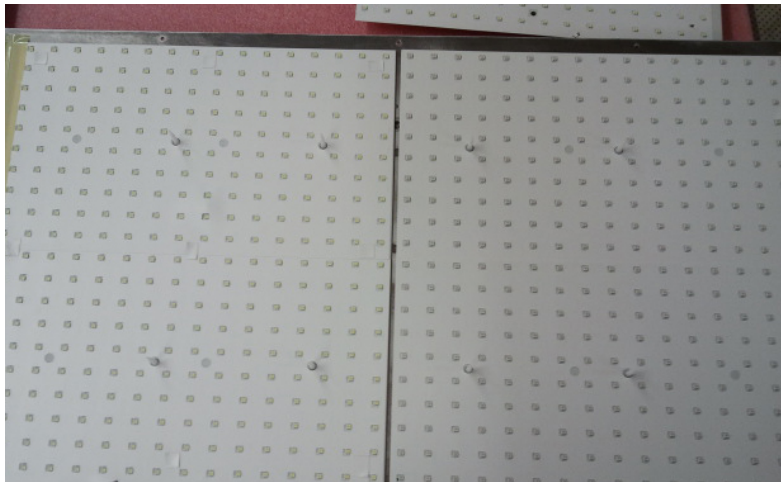


Figura 9.2 Immagine PCB con a sinistra LED bianchi e a destra LED blu

Successivamente si sono ricoperte tutte le parti interne della “camera” formata dallo spazio presente tra la MCPCB e il diffusore in PET oltre il quale si trovano i filtri ottici; si è usato il film riflettente bianco, chiamato Kimoto, in modo evitare di avere superfici metalliche scoperte che potrebbero riflettere la luce in modo strano e si è creata così una “camera” bianca dove la luce viene riflessa in modo uniforme.

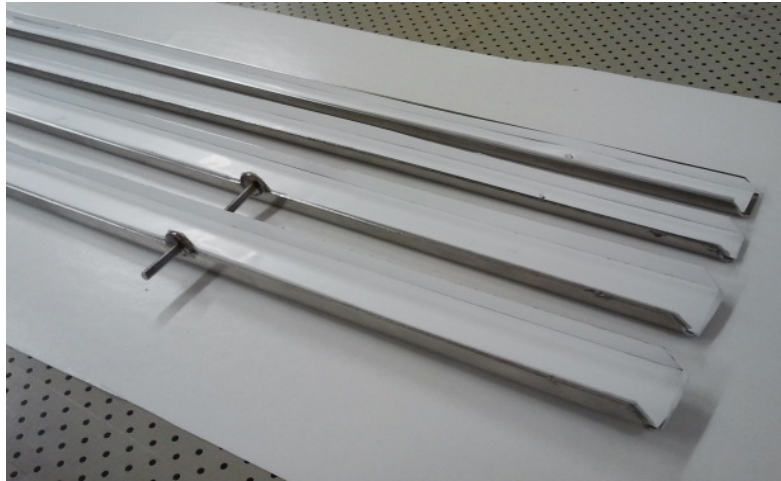


Figura 9.3 Rivestimento con Kimoto della struttura interna per fissare i filtri ottici

Un nodo cruciale di questo lavoro è stato quello di creare una struttura che facesse da divisorio tra le due back light unit che ora sono sia a LED bianchi che a LED blu.

Infatti avendo sostituito metà dei LED bianchi con LED blu, non appena essi vengono accesi, ci si trova ad avere una camera unica con interferenza tra luce bianca e luce blu.

Per ovviare a questo inconveniente ed avere così una divisione tra le due back light unit, si è costruito un divisorio in cartone anch'esso rivestito di Kimoto che è stato inciso per poter permettere l'incastro con la struttura che fa da camera per la back light unit.



Figura 9.4 Il divisorio in cartone anch'esso rivestito con Kimoto

Dopo aver perfezionato la sagoma di questo divisorio e ovviato alle piccole interferenze di luce bianca e blu dovute agli interspazi tra il divisorio in cartone e la struttura della MCPCB, si è intervenuti sulla parte di filtri ottici, ritagliando dei campioni di fogli di fosfori e ponendoli all'interno dello stack.

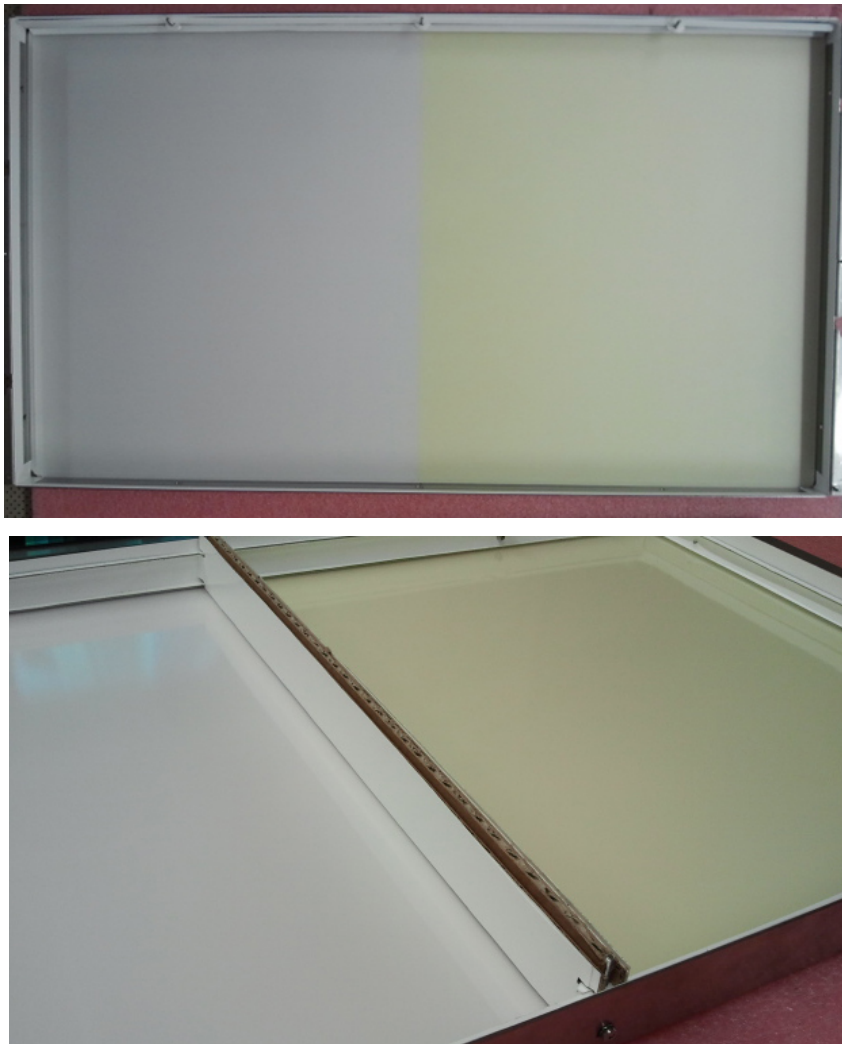


Figura 9.5 Sopra: il foglio di fosfori viene inserito tra i filtri; sotto: viene fissata la struttura e viene fissato il divisorio

Arrivati a questo punto è stata chiusa la struttura della back light unit, incastrando su di essa il divisorio di cartone e montando la MCPCB.



Figura 9.6 Vista frontale della Back Light Unit

Successivamente si è rimontata la struttura del display e si è cominciata una analisi dal punto di vista ottico eseguendo misure sia con il Spettroradiometro che con il Video Fotometro.

9.2 Misure sul display

Lo scopo di questa parte di lavoro è stata quella di eseguire un confronto tra la metà del display a LED bianchi e la metà a LED blu con tecnologia fosfori remoti.

Si sono montati all'interno dello stack di filtri 3 diversi campioni di fogli; due di questi sono esattamente il Campione A ed il Campione B analizzati sotto stress nel capitolo precedente; un terzo campione che (non è il Campione C formato da PMMA) si presenta sottoforma di foglio di PET è stato scelto perché ha una concentrazione di fosfori maggiore rispetto ai Campioni A e B .

Il setup di misura ha previsto l'alimentazione del display mediante il proprio alimentatore e la misura del suo schermo con lo Spettroradiometro e il Video Fotometro.

Per eseguire un confronto tra queste tecnologie di retroilluminazione bisogna innanzitutto precisare il tipo di confronto che si vuole eseguire.

Sicuramente le due metà del display, a seconda anche del tipo di campione di fosfori che viene inserito nei filtri ottici, daranno una sensazione di bianco diversa.

Questa sensazione può essere caratterizzata per entrambe le metà di display con la *Temperatura di Colore T_c* e le *coordinate cromatiche*.

Dapprima si è eseguita la misura sulla parte di display a LED bianchi, ottenendo dagli strumenti dei valori di Luminanza, Temperatura Colore e coordinate cromatiche.

Successivamente si sono svolte le stesse misure anche sulla metà a LED blu con foglio di fosfori remoti.

Quello che si ottiene ovviamente sono tutti valori diversi. Come si fa allora ad eseguire un confronto tra le due tecnologie per capire quale delle due è più performante dal punto di vista della luminosità?

La soluzione è quella di portare le temperature colore delle due metà di display approssimativamente allo stesso valore dopodiché confrontare i valori di luminosità.

Operando dal punto di vista dell'alimentazione dei LED non è possibile ottenere la stessa temperatura di colore perché non appena cambio corrente da erogare per la MCPCB, cambiano i valori contemporaneamente dei LED bianchi e dei LED blu.

Si può intervenire però sul pannello LDC cambiando i valori dei filtri colore del sistema RGB del LCD.

Dunque, una volta misurati i valori di T_c della metà del display con i fosfori, andando per tentativi, si lavora sui parametri dei filtri RGB del pannello in modo da fare risultare, per la metà del display a LED bianchi, la stessa Temperatura di Colore e da qui fare un confronto di performance di luminosità delle due metà di display.

9.3 Risultati delle misure

Di seguito vengono riportati i risultati delle misurazioni svolte sullo schermo del display.

Le misure sono state eseguite impostando sul display una pagina bianca e facendo la misura delle due metà di schermo con il Video Fotometro. Questo strumento mediante il suo software permette di acquisire immagini e di elaborarle a proprio piacimento.

Le misure si riferiscono a 5 punti, presi di solito come standard, uno al centro dell'area di interesse e 4 verso gli spigoli dell'immagine.

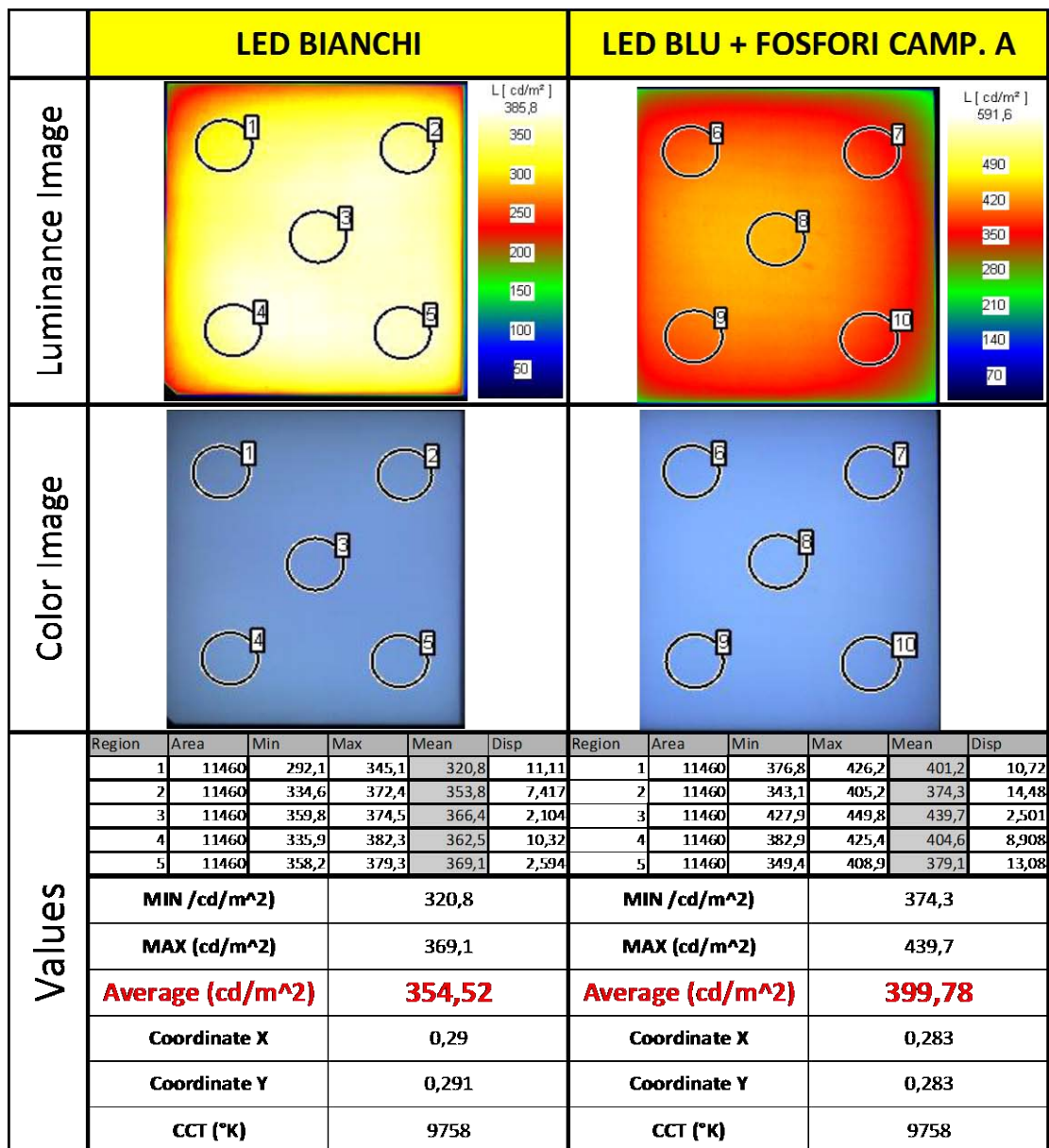


Figura 9.7 Confronto tra retroilluminazione con Campione A

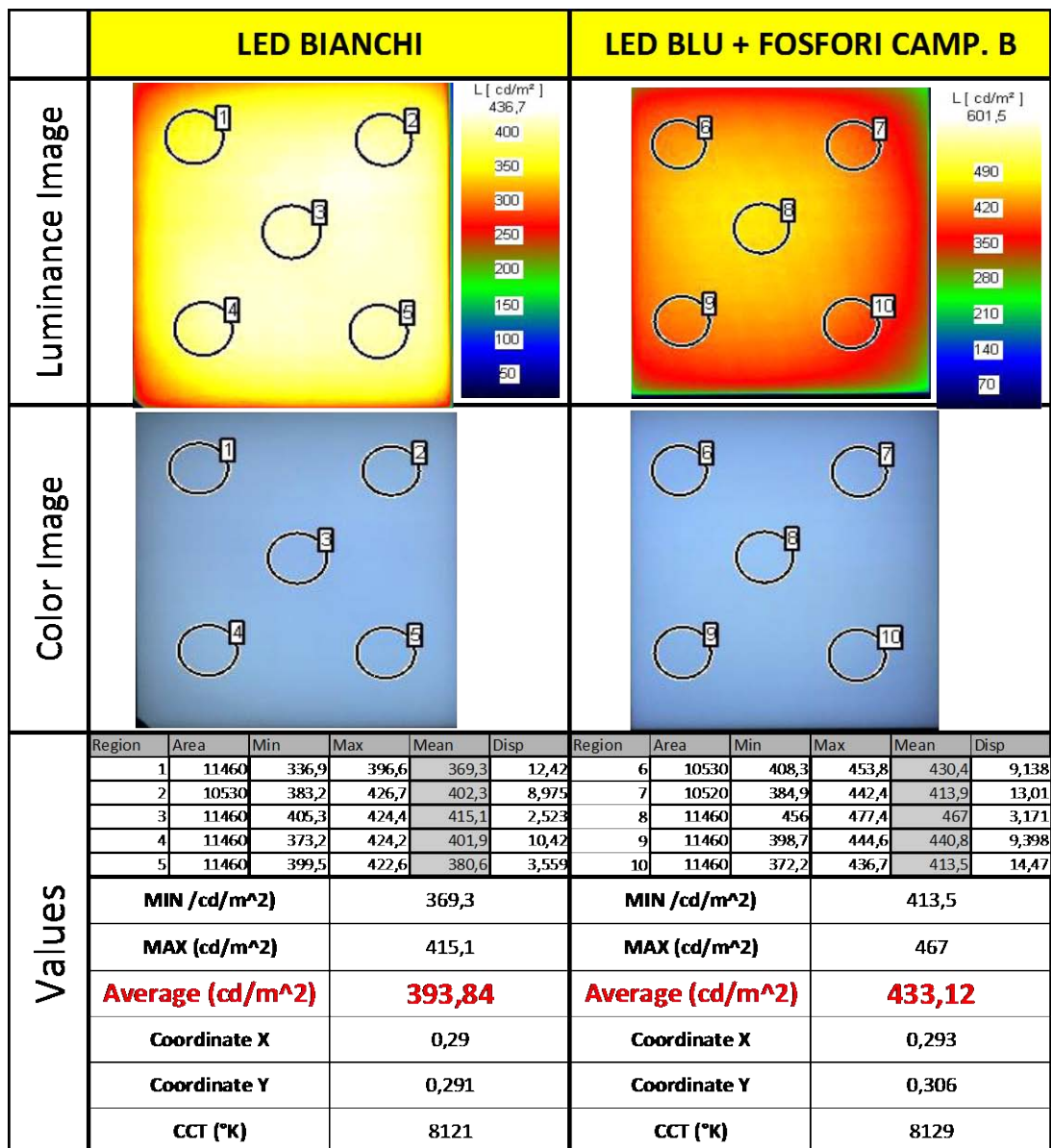


Figura 9.8 Confronto tra retroilluminazione con Campione B

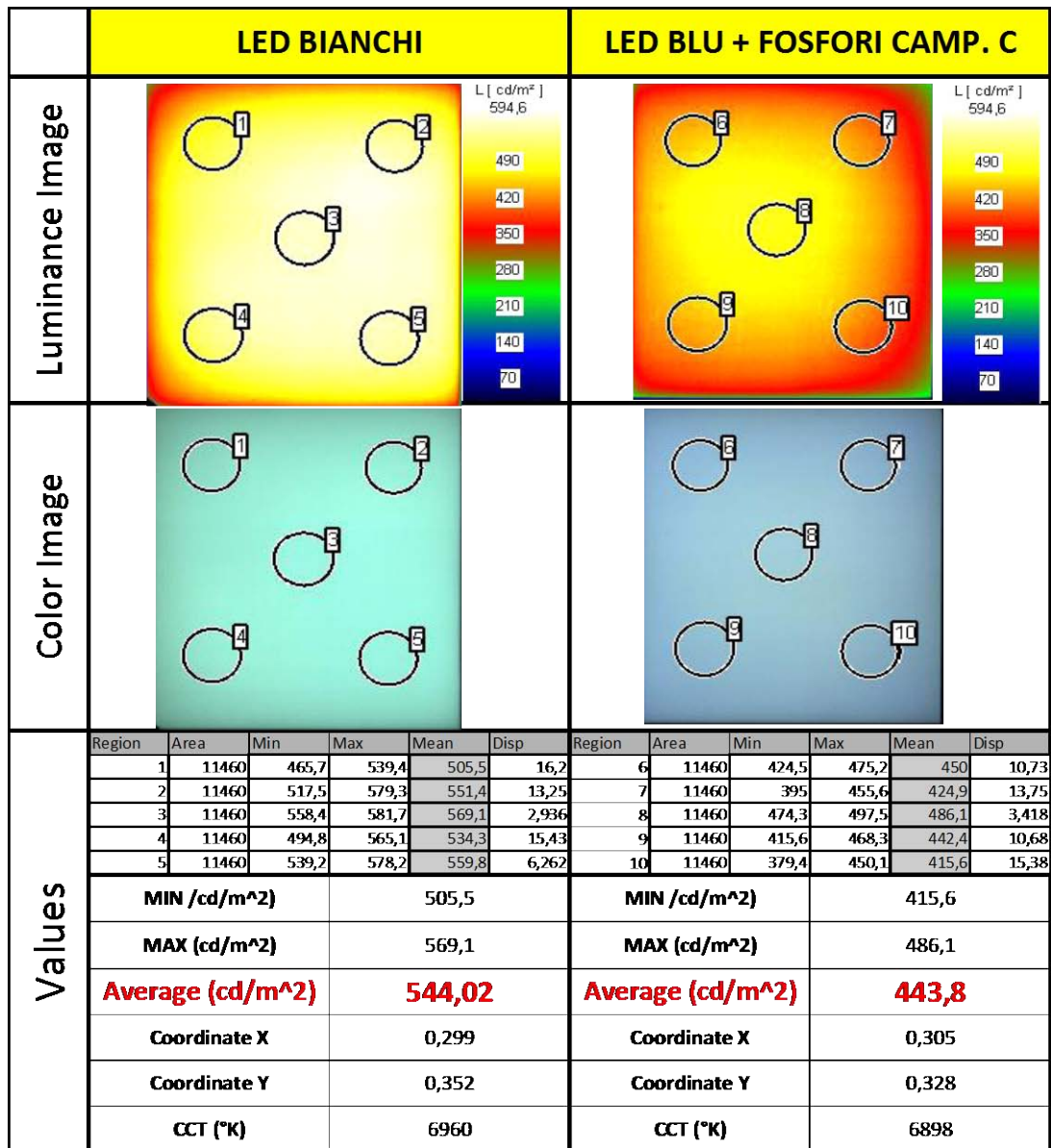


Figura 9.9 Confronto tra retroilluminazione con Campione C

Le misure fanno capire come a parità di temperatura di colore, utile come è stato detto per eseguire un confronto, la metà del display con retroilluminazione a LED blu e fosfori remoti abbia valori di luminanza nettamente superiori rispetto alla metà a LED bianchi, indipendentemente dalla scelta del foglio di fosfori inserito nello stack ottico.

Alcune immagini significative del display:

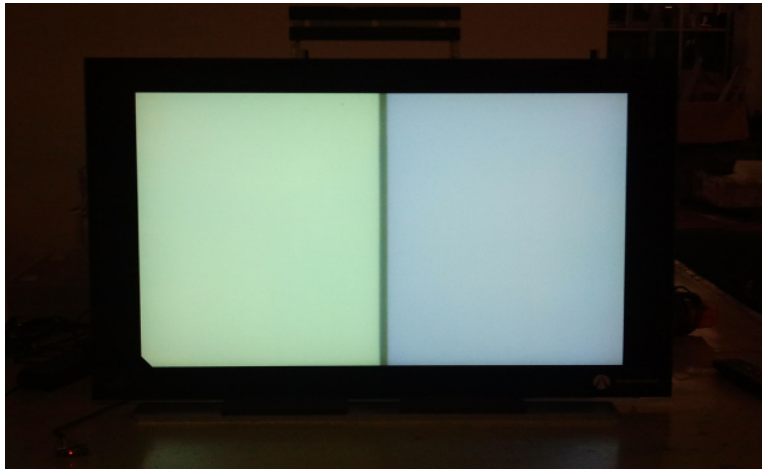


Figura 9.10 Vista frontale del display con pagina bianca

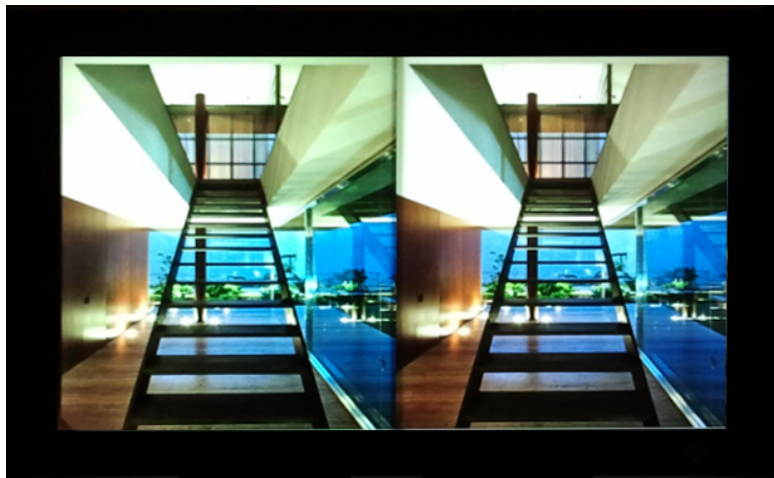


Figura 9.11 Immagine 1



Figura 9.12 Immagine 2



Figura 9.13 Immagine 3

A parte le immagini riportate in Figura 9.11 e 9.12 in cui si nota una saturazione dei colori, la figura 9.13 è significativa nel dimostrare come le immagini con tecnologia fosfori remoti oltre ad assumere colori più reali hanno anche un guadagno in definizione, infatti si riescono a discriminare i colori e le scritte della tuta del Campione seduto in sella.

Bibliografia

1. Light Emitting Diodes; E. F. Schubert, Cambridge University Press, 2003.
2. Bahaa E. A. Saleh , Malvin Carl Teich ; “Fundamentals of Photonics” 2nd Edition, (2007) ;
3. Gallium Nitride Electronics; R. Quay, Springer, (2008);
4. Rudiger Guay; “Gallium Nitride Electronics”; Springer (2008);
5. S Kasap, P Capper ; “Handbook Of Electronic And Photonic Materials - (Springer, 2006) ;
6. Nasser N. Morgan ; Evaluation of GaN growth improvement techniques ; (2002)
7. Human Color Vision; Peter K. Kaiser, Robert M. Boynton, Optical Society of America, (1996);
8. “Introduction to solid state lighting”; Arturas Zukauskas, Micheal S.Shur, Remis Caska (2001);
9. James Petroski; “Spacing of High-Brightness LEDs on Metal Substrate PCB's for Proper Thermal Performance” GELcore, Valley View OH 44125 USA; 2004 Inter Society Conference on Thermal Phenomena ;
10. Bin-Juine Huang, Chun-Wen Tang and Jia-Hong Wu;” Study of System Dynamics of High-Power LEDs” ; Department of Mechanical Engineering Taipei 10617, Taiwan; (2006 IEEE);
11. Paulo Pinho, Eino Tetri, Liisa Halonen ; “Synergies of Controller-Based LED Drivers and Quality Solid-State Lighting”; Department of Electrical and Communications Engineering, Lighting Laboratory Helsinki University of Technology Espoo, Finland ; (2006 IEEE)
12. Fusheng Li, Dahua Chen, Xianjie Song, Yuming Chen; “LEDs: a Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting”; Department of Illuminating Engineering and Light Sources, Fudan University Shanghai, China; (2009);

13. Matteo Meneghini, *Student Member, IEEE*, Lorenzo-Roberto Trevisanello, Gaudenzio Meneghesso, *Senior Member, IEEE*, and Enrico Zanoni, *Senior Member, IEEE*, "A Review on the Reliability of GaN-Based LEDs"; IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY, VOL. 8, NO. 2, JUNE 2008;
14. Yongick I. Cho, Seung Hyun Park, N. Hwang and Y. M. Yu; *Korea Photonics Technology Institute, 971-35 Wolchul-Dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-779, Korea*, "LIFETIME PREDICTION OF LED LUMINAIRE";
15. Longzao Zhou, Bing An, Yiping Wu, Shunhong Liul, "Analysis of Delamination and Darkening in High Power LED Packaging" Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China ; IEEE Proceedings of 16th IPFA - 2009, China;
16. Uddina,T, A.C. Weia, T.G. Andersson "Study of degradation mechanism of blue light emitting diodes" ; School of Materials Science and Engineering, Nanyang Drive, Technological University, 639798 Singapore; (2005) ;
17. Matteo Meneghinia,_, Lorenzo Trevisanelloa, Gaudenzio Meneghessoa, Enrico Zanoni, Francesca Rossib, Maura Pavesic, Ulrich Zehnderd, Uwe Strausd; "High-temperature failure of GaN LEDs related with passivation"; Superlattices and Microstructures 40 (2006) 405–411
18. ZHANG Yanfang , LI Lan, ZHANG Xiaosong, XI Qun; "Temperature effects on photoluminescence of YAG:Ce³⁺ phosphor and performance in white light-emitting diodes"; JOURNAL OF RARE EARTHS, Vol. 26, No. 3, Jun. 2008, p. 446
19. Zongyuan LIU, Sheng LIU Kai WANG, Xiaobing LUO "Status and prospects for phosphor-based white LED packaging"; Higher Education Press and Springer-Verlag 2009;
20. Yen-Fu Su, Shin-Yueh Yang, Wei-Hao Chi, and Kuo-Ning Chiang, "Light Degradation Prediction of High-power Light-emitting Diode Lighting Modules"; (2010 IEEE)
21. Y. Xi and E. F. Schubert, "Junction–temperature measurement in GaN ultraviolet light

- Emitting diodes using diode forward voltage method”; (2004 IEEE)
22. Wei-Hao Chi', Tsung-Lin Chou, Cheng-Nan Han, and Kuo-Ning Chiang, “Analysis of Thermal Performance of High Power Light Emitting Diodes Package”; 2008 10th Electronics Packaging Technology Conference;
23. Gábor Farkas¹, Shatil Haque², Frank Wall², Paul S. Martin², András Poppe^{3,1}, Quint van Voorst Vader, György Bognár, MicReD Ltd., Budapest XI, Gulyás u. 27, H-1112 Hungary, “Electric and Thermal Transient Effects in High Power Optical Devices”;
24. Measuring thermal resistance is the key to a cool semiconductor; Bernard S. Siegel; Sage Enterprise Inc., Mountain View, Calif.;
25. A Direct-View Backlight With UV Excited Trichromatic Phosphor Conversion Film Hsin-Tao Huang, Chuang-Chuang Tsai, and Yi-Pai Huang (2010);
26. Light Converting Inorganic Phosphors for White Light-Emitting Diodes Lei Chen, Chun-Che Lin, Chiao-Wen Yeh and Ru-Shi Liu (2010);
27. Planar Lighting System Using Array of Blue LEDs to Excite Yellow Remote Phosphor Film Hsin-Tao Huang, Yi-Pai Huang, and Chuang-Chuang Tsai (2011);
28. Design of a Single-chip White Light-emitting InGaN/GaN Diode Fu Xiansong*, Xu Wencui, Niu Pingjuan (2010);
29. *Progress on the GaN-based LEDs and LDs* Yong Wang, Yonggang Zou, Xiaohui Ma (2012);

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Gaudenzio Meneghesso e il correlatore Luca Rodighiero per la gentilezza e la disponibilità con cui mi hanno seguito in questo percorso.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella Francesca e Simone per il sostegno e la pazienza mostrata in questi anni di studio.

Ringrazio inoltre Claudia che mi sostiene sempre, mi da serenità e mi fa vedere sempre il lato positivo delle cose.

Ringrazio infine i miei parenti e gli amici, insostituibili punti di riferimento, coloro che mi hanno spronato per tenere duro dopo un brutto periodo durante gli studi.