



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

CARATTERIZZAZIONE E STUDIO DI
AFFIDABILITÀ DI LED BIANCHI AD
ALTA EFFICIENZA PER
APPLICAZIONI DI BACKLIGHTING

Autore: Michael Sterchele
Relatore: prof. Enrico Zanoni
Correlatori: Matteo Meneghini, Nicola Trivellin

Anno Accademico: 2010/2011
Data: 12/07/2011

INDICE

1	Light Emitting Diode	5
1.1	Principio fisico	5
1.2	Semiconduttori a gap diretto e indiretto	6
1.3	Teoria della ricombinazione	7
1.3.1	Ricombinazione radiativa	7
1.3.2	Ricombinazione non radiativa	10
1.4	Proprietà elettriche	14
1.4.1	Caratteristica I-V	14
1.4.2	Scostamento dall'idealità della caratteristica I-V	16
1.4.3	Strutture tipiche	19
1.5	Proprietà ottiche	25
1.5.1	Efficienza	25
1.5.2	Spettro di emissione	26
1.5.3	Dipendenza dalla temperatura dello spettro di emissione	28
1.5.4	Estrazione della luce	29
1.6	Illuminazione a stato solido	31
1.6.1	Storia	31
1.6.2	Colorimetria e fotometria	33
1.6.3	Led bianchi	35
2	Materiali, affidabilità e meccanismi di degrado	39
2.1	Nitruro di Gallio	39
2.1.1	Proprietà chimico-fisiche	39
2.1.2	Crescita del GaN	41
2.1.3	Drogaggio del nitruro di gallio	47

2.1.4	Leghe con Indio e Alluminio	50
2.1.5	Contatti ohmici	51
2.2	Package	52
2.2.1	Incapsulamento	52
2.3	Fosfori	53
2.3.1	Efficienza di conversione	54
2.3.2	Tipi di fosfori	55
2.4	Meccanismi di degrado	55
2.4.1	Degrado di package e fosfori	55
2.4.2	Formazione di centri di ricombinazione non radiativa	56
2.4.3	Migrazione delle piste metalliche	56
2.4.4	Passivazione del Magnesio	56
2.4.5	Current Crowding	57
3	Dispositivi e tecniche di caratterizzazione	59
3.1	Led analizzati	59
3.1.1	Cree ML-E	59
3.1.2	ProLight TLWE	60
3.1.3	ProLight 3LWE	61
3.1.4	Cree XP-E	61
3.1.5	Cree XP-E ad alta efficienza	62
3.2	Tecniche di caratterizzazione e stress	63
3.2.1	Misure a 4 terminali o Kelvin	64
3.2.2	Caratterizzazione elettrica	65
3.2.3	Caratterizzazione ottica	66
3.2.4	Caratterizzazione termica	67
3.2.5	Condizioni di stress e configurazione	70
4	Risultati	73
4.1	Risultati caratterizzazione	73
4.1.1	Led di potenza ProLight 3LWE con 2 chip diversi	73
4.1.2	Led di potenza Cree XP-E base e ad alta efficienza	76
4.1.3	Led ProLight TLWE e Cree ML-E	80
4.2	Risultati stress	113
4.2.1	Cree ML-E	113
4.2.2	ProLight TLWE	126
5	Conclusioni	139

ABSTRACT

Lo scopo principale della seguente tesi è quello di analizzare diodi led bianchi commerciali per applicazioni di backlighting di diversi produttori e metterli a confronto. La prima parte dell'analisi consiste nei risultati della caratterizzazione termica, elettrica e ottica di strutture di led mentre la seconda consiste nello studio di affidabilità e cioè nell' analisi di degrado a diverse condizioni operative con confronto tra i diversi tipi di led. In questo lavoro vengono riportati i risultati di affidabilità fino a 650h di stress per i 2 tipi di led. Inoltre è compresa la caratterizzazione e il confronto di diversi tipi di led bianchi di potenza.

INTRODUZIONE

Gli ultimi decenni hanno portato una rapida evoluzione della tecnologia che ha drasticamente cambiato molti aspetti della nostra vita. La gara di sviluppo tra i produttori di diodi led e i recenti progressi nella progettazione e produzione renderà presto obsoleto l'uso della lampadina comune, uno dei dispositivi più usati nella società odierna. La lampada ad incandescenza, inventata da Thomas Edison, è fino ad oggi ancora in uso più di un secolo dopo la sua introduzione. Recentemente però si sta molto diffondendo l'uso dei diodi led e questo potrebbe portare all'estinzione delle lampade a incandescenza e fluorescenza. Ci sono una serie di motivi per cui i led potranno sostituire facilmente le tradizionali sorgenti luminose ad incandescenza. Per prima cosa sono molto più efficienti rispetto alle lampadine ad incandescenza a convertire l'elettricità in luce visibile, sono robusti e compatti e quindi più resistenti agli urti, hanno un tempo di vita medio di 100.000 ore di utilizzo, circa 100 volte più delle lampadine a incandescenza. Inoltre i led emettono fondamentalmente in modo monocromatico e hanno la possibilità di generare luce di qualsiasi colore, e con una selettività molto accentuata.

I led moderni possono essere utilizzati per diverse applicazioni tipo:

- illuminazione di ambienti con led bianchi
- retroilluminazione di TV LCD, monitor e altro
- illuminazione insegne pubblicitarie
- grandi display per stadi, aeroporti, stazioni e display dinamici decorativi

Introduzione

- semafori, indicazioni uscite di sicurezza, luci di emergenza e luci di stop e di posizione su autoveicoli
- in architettura per decorazioni di edifici
- led a infrarossi per trasmissione dati
- sono in fase di studio led ultravioletti (UV) per la sostituzione delle lampade UV nei processi di sterilizzazione

Il principale scopo del seguente lavoro è quello di caratterizzare e studiare l'affidabilità di led bianchi commerciali per applicazioni di backlighting di due diversi produttori per poi confrontarli tra loro. Inoltre sono stati caratterizzati led bianchi commerciali di potenza ad alta efficienza.

Il lavoro è diviso nei seguenti capitoli:

CAPITOLO 1: Presenta la teoria di base sui diodi led e una breve introduzione sull'illuminazione allo stato solido

CAPITOLO 2: Si occupa di tutti i principali aspetti dell'affidabilità dei dispositivi con particolare enfasi sui materiali e sulle tecnologie utilizzate per il chip e il package

CAPITOLO 3: Descrive i dispositivi studiati con le loro caratteristiche e le tecniche usate per la caratterizzazione e lo stress

CAPITOLO 4: Riassume i risultati della caratterizzazione e degli stress e quindi dello studio di affidabilità

CAPITOLO 5: Conclusioni

CAPITOLO

1

LIGHT EMITTING DIODE

1.1 Principio fisico

I diodi led sono dei dispositivi elettronici che hanno come caratteristica principale la capacità di emettere una radiazione elettromagnetica se attraversati da una corrente. Il principio fisico alla base del funzionamento dei diodi emettitori di luce (LED) è l'emissione spontanea di fotoni, in seguito alla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna iniettate nella regione attiva di una giunzione pn polarizzata direttamente.

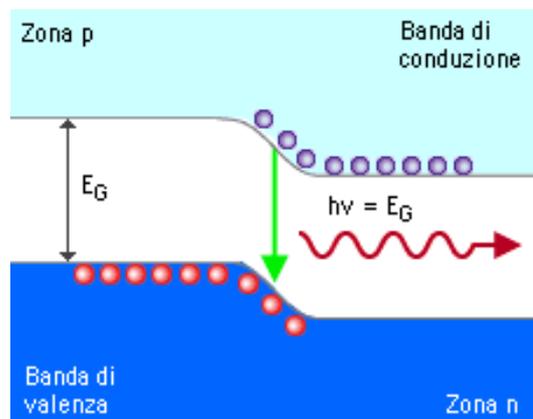


Figura 1.1: Ricombinazione radiativa

1.2 Semiconduttori a gap diretto e indiretto

Prima di trattare le proprietà ottiche ed elettriche dei semiconduttori, è necessario dare una spiegazione dettagliata sulla differenza tra semiconduttori a gap diretto e a gap indiretto.

La relazione energia-quantità di moto E-p per un elettrone o una lacuna liberi sono paraboliche. Per quanto riguarda i semiconduttori invece queste relazioni seguono andamenti più complessi e diversi anche a seconda dell'orientazione cristallina. In ogni caso gli elettroni tendono ad accumularsi nell'intorno del minimo della banda di conduzione, mentre le lacune intorno al massimo della banda di valenza e per questo le transizioni di ricombinazione avvengono principalmente tra questi punti, che sono separati da un'energia pari all'energy gap del materiale. Nel caso in cui il minimo della banda di conduzione e il massimo della banda di valenza sono allineati, ossia si trovano allo stesso valore di quantità di moto p, si dice che il semiconduttore è a gap diretto, mentre nel caso opposto dove i valori della quantità di moto dei due punti non coincidono, si parla di semiconduttore a gap indiretto.

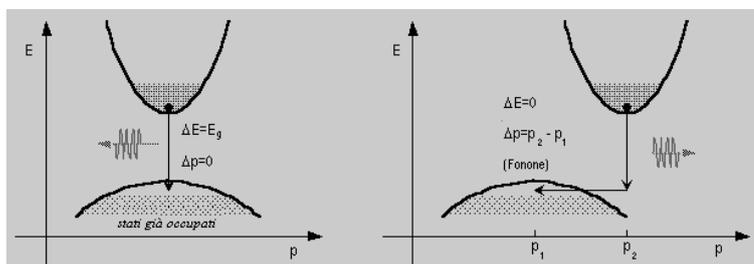


Figura 1.2: Bandgap diretto e indiretto

Quando un elettrone in banda di conduzione si ricombina con una lacuna in banda di valenza, durante la transizione deve essere verificata simultaneamente la conservazione dell'energia e della quantità di moto; nel caso di ricombinazione radiativa nel processo viene rilasciato un fotone di energia pari all'energy gap.

In un semiconduttore a gap diretto dove il minimo della banda di conduzione e il massimo della banda di valenza hanno quantità di moto coincidenti, la probabilità che avvenga una ricombinazione radiativa diretta è molto alta, dato che durante il processo non è richiesta variazione di quantità di moto, ma solamente la conservazione dell'energia ottenuta con l'emissione del fotone.

In un semiconduttore a gap indiretto invece non si può verificare una ricombinazione radiativa diretta con semplice emissione di un fotone perché

devono essere soddisfatte simultaneamente le leggi di conservazione di energia e quantità di moto. Quindi la transizione può avvenire solo se si verifica anche un'interazione con una unità quantica che descrive l'oscillazione meccanica, ovvero un fonone del cristallo. Questo riduce la probabilità delle transizioni indirette poiché questo processo di ricombinazione indiretta coinvolge tre corpi (elettrone, lacuna e fonone).

La differenziazione è il motivo fondamentale per cui i dispositivi emettitori optoelettronici vengono realizzati principalmente con semiconduttori composti a gap diretto come l'Arseniuro di Gallio (GaAs), il Nitruro di Gallio (GaN) e le leghe ternarie e quaternarie ricavate da loro mentre non viene utilizzato il Silicio che è a gap indiretto.

1.3 Teoria della ricombinazione

In un materiale semiconduttore si possono verificare fenomeni di generazione, nei quali elettroni vengono eccitati dalla banda di valenza a quella di conduzione mediante eccitazione termica o assorbimento di fotoni di appropriata energia, creando così coppie elettrone-lacuna, e di ricombinazione, nei quali avviene il processo inverso, ossia elettroni si diseccitano dalla banda di conduzione a quella di valenza ricombinandosi con le lacune. I portatori di carica si possono ricombinare radiativamente o non radiativamente: nel primo caso il processo è accompagnato dall'emissione di un fotone di energia pari all'energy gap, mentre nel secondo caso l'energia rilasciata in seguito alla ricombinazione è convertita in fononi, ossia quanti vibrazionali del reticolo, con generazione di calore.

1.3.1 Ricombinazione radiativa

In un semiconduttore, drogato o intrinseco, in condizioni di equilibrio termico ad una determinata temperatura T le concentrazioni di elettroni e lacune sono legate tra loro dalla legge dell'azione di massa $p_0 n_0 = n_i^2$, con p_0 e n_0 concentrazioni di lacune ed elettroni all'equilibrio rispettivamente, mentre n_i rappresenta la concentrazione intrinseca di portatori, dipendente dalla temperatura; inoltre in tali condizioni i tassi di generazione e di ricombinazione sono uguali, bilanciandosi perfettamente. Supponiamo ora che vengano generati dei portatori in eccesso nel semiconduttore, mediante loro iniezione o irraggiamento del materiale e quindi assorbimento di fotoni, venendo così a crearsi una situazione di non equilibrio. Nelle nuove condizioni ovviamente la legge dell'azione di massa non è più valida e le attuali concentrazioni totali di portatori sono date dalle seguenti relazioni:

$$p = p_0 + \Delta p \tag{1.1}$$

Light Emitting Diode

$$n = n_0 + \Delta n \quad (1.2)$$

con Δp e Δn concentrazioni di elettroni e lacune generate in eccesso. Se in un certo momento viene interrotto il processo di generazione di portatori in eccesso, il semiconduttore tenderà a riportarsi nella condizione di equilibrio iniziale mediante la ricombinazione di coppie elettrone-lacuna. Indicando con R il tasso di ricombinazione radiativa cioè il numero di eventi di ricombinazione diretta per unità di volume e di tempo, questo sarà proporzionale alla concentrazione di elettroni disponibili in banda di conduzione ed a quella di lacune in banda di valenza come si vede dalla seguente relazione:

$$R = Bnp \quad (1.3)$$

nota come equazione del tasso di ricombinazione bimolecolare, dove B rappresenta una costante di proporzionalità nota come coefficiente di ricombinazione radiativa.

Ora possiamo analizzare, l'andamento nel tempo delle concentrazioni di portatori generati in eccesso in un semiconduttore sottoposto a fotoeccitazione. In primo luogo possiamo osservare che in ogni istante è verificata la condizione:

$$\Delta n(t) = \Delta p(t) \quad (1.4)$$

perché gli elettroni e le lacune si generano e si ricombinano sempre in coppie.

Inserendo le relazioni (1.1) e (1.2) nella (1.3) si ottiene:

$$R = B[n_0p_0 + \Delta n(t)(n_0 + p_0 + \Delta n(t))] \quad (1.5)$$

Nel caso di basso livello iniezione l'ipotesi di base è che le concentrazioni dei portatori fotogenerati sono molto minori di quelle dei maggioritari nel semiconduttore, quindi l'equazione (1.5) può essere semplificata nel seguente modo:

$$R = Bn_i^2 + B(n_0 + p_0)\Delta n(t) = R_0 + R_{ex} \quad (1.6)$$

come somma di un termine di ricombinazione all'equilibrio e di uno relativo ai portatori in eccesso.

La variazione delle concentrazioni di portatori nel tempo può essere ricavata dalla seguente equazione:

$$\frac{dn(t)}{dt} = (G_0 + G_{ex}) - (R_0 + R_{ex}) \quad (1.7)$$

All'istante $t=0$ si suppone di interrompere la fonte di illuminazione e quindi la fotogenerazione: questo significa porre $G_{ex} = 0$ nella precedente relazione, tenendo inoltre conto che i tassi di generazione e ricombinazione all'equilibrio G_0 ed R_0 sono uguali, la (1.7) si semplifica così:

$$\frac{d}{dt}\Delta n(t) = -B(n_0 + p_0)\Delta n(t) \quad (1.8)$$

cioè in una equazione differenziale con soluzione:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.9)$$

si ha quindi un decadimento esponenziale dei portatori in eccesso con costante di tempo:

$$\tau = \frac{1}{B(n_0 + p_0)} \quad (1.10)$$

Il parametro caratteristico τ come vedremo ricopre un ruolo molto importante nei dispositivi optoelettronici e viene chiamato anche tempo di vita dei portatori in eccesso.

Ora consideriamo la condizione di alto livello di iniezione, nella quale contrariamente a prima la concentrazione di elettroni e lacune fotogenerate è nettamente maggiore di quella dei portatori in equilibrio, cioè $(\Delta n, \Delta p) \gg (n_0 + p_0)$ dopo alcuni passaggi si ottiene:

$$\Delta n(t) = \frac{1}{Bt + \frac{1}{\Delta n_0}} \quad (1.11)$$

In questo caso il tasso di ricombinazione è direttamente proporzionale al quadrato della concentrazione dei portatori iniettati e il decadimento nel tempo di quest'ultimi non segue più un andamento esponenziale. Il tempo

di vita dei portatori in eccesso non è costante, ma dipende dal tempo ovvero aumenta con il trascorrere del tempo secondo la seguente relazione:

$$\tau(t) = 1 + \frac{1}{B\Delta n_0} \quad (1.12)$$

Questo è legato al fatto che al passare del tempo la concentrazione di portatori in eccesso diminuisce e il semiconduttore tenderà a riportarsi sempre più verso la situazione di equilibrio: al limite il tempo di vita assumerà il valore trovato per la condizione di bassa iniezione.[1]

Tutti i ragionamenti di questo paragrafo sono stati fatti su un semiconduttore elettricamente isolato e sottoposto a fotogenerazione mediante una fonte di illuminazione esterna: in ogni caso i risultati relativi a velocità di ricombinazione e tempo di vita dei portatori si possono estendere direttamente ad un led dove i portatori in eccesso vengono iniettati polarizzandolo direttamente.

1.3.2 Ricombinazione non radiativa

Ci sono diversi meccanismi fisici che possono generare ricombinazione non-radiativa, la maggior parte di esse sono causate da difetti nella struttura cristallina, da impurezze e dal meccanismo Auger. Nei processi di ricombinazione non radiativa, l'energia rilasciata dalla ricombinazione elettrone-lacuna viene solitamente emessa sotto forma di fononi, provocando vibrazioni reticolari con conseguente riscaldamento del dispositivo. Nel seguito discuteremo di ricombinazione Auger, di ricombinazioni superficiali e di ricombinazione attraverso gli stati trappola.

Ricombinazione Auger

Durante questo processo l'energia rilasciata in seguito alla ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna viene ceduta ad un altro portatore libero: a un elettrone in banda di conduzione o a una lacuna in banda di valenza. Il portatore così eccitato poi si rilasserà verso il limite inferiore della banda di conduzione o superiore di quella di valenza rilasciando l'energia precedentemente assorbita sotto forma di fononi. Il tasso di ricombinazione Auger è proporzionale al prodotto tra la concentrazione di un tipo di portatori e il quadrato di quella dell'altro tipo e può essere espresso: $R_{Auger} = C_n n^2 p$ nel primo caso e $R_{Auger} = C_p p^2 n$ nel secondo caso. In condizione di alto livello di iniezione, dove le concentrazioni dei por-

tatori in eccesso sono molto più grandi di quelle all'equilibrio, il tasso di ricombinazione Auger assume la seguente forma:

$$R_{Auger} = (C_p + C_n)n^3 = Cn^3 \quad (1.13)$$

dove C è il coefficiente di Auger.

Si è quindi capito che il meccanismo Auger è un processo di ricombinazione diretta non radiativa non legato ai difetti del cristallo. La dipendenza cubica dalla concentrazione dei portatori vista nell'equazione precedente rende questo processo influente solo per alti livelli di iniezione, mentre quando le concentrazioni di portatori sono piccole esso può essere trascurato.

Ricombinazione superficiale

Come vedremo tra breve le superfici che delimitano il materiale ricoprono un ruolo importante nei processi di ricombinazione. Alla superficie di un semiconduttore si ha una brusca discontinuità della periodicità del reticolo con la presenza di numerosi legami incompleti, i quali hanno associati degli stati di energia localizzati, solitamente giacenti all'interno del gap del semiconduttore. Questi stati superficiali, possono agire come centri di ricombinazione, solitamente non radiativa, e di conseguenza alle superfici si ha una riduzione dell'efficienza radiativa ed un eventuale riscaldamento del materiale dovuto alle emissioni di fononi.

I legami incompleti alla superficie possono unirsi anche tra loro o con altri elementi esterni al semiconduttore, formando un continuo di stati di energia all'interno del gap proibito; pertanto non è facile prevedere a priori la distribuzione degli stati superficiali. Chiaramente questo processo di ricombinazione non radiativa è indesiderata nei dispositivi optoelettronici come i led e per questo motivo è importante progettare il componente in modo tale che la regione attiva sia il più lontano possibile dalle superfici: per ottenere questo obiettivo esistono numerose soluzioni che riguardano la geometria del dispositivo ed in particolare dei contatti.

Ricombinazione attraverso stati trappola

La ricombinazione attraverso stati trappola è anche detta ricombinazione Shockley-Hall-Read (SHR).

Il reticolo cristallino di un semiconduttore presenta sempre delle imperfezioni che possono essere di varia natura: dislocazioni, difetti puntuali, difetti interstiziali e atomi di impurità presenti nel reticolo. Questi difetti possono avere associati dei livelli di energia discreti o delle bande continue che solitamente sono localizzate all'interno del gap proibito, creando così dei

Light Emitting Diode

livelli profondi che agiscono come trappole per i portatori liberi e come centri di ricombinazione.

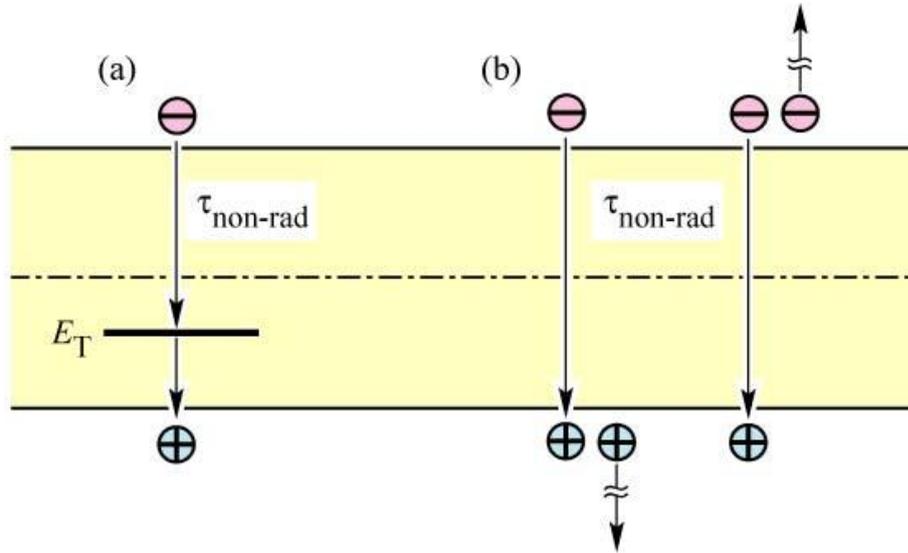


Figura 1.3: Ricombinazione non radiativa:(a)attraverso stati trappola (b)tramite processo di Auger

Questi processi di ricombinazione sono stati studiati da Shockley, Hall and Read. Il tasso di ricombinazione può essere espresso dalla seguente formula:

$$R_{SHR} = \frac{p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta n \Delta p}{(N_T v_p \sigma_p)^{-1} (n_0 + n_1 + \Delta n) + (N_T v_n \sigma_n)^{-1} (p_0 + p_1 + \Delta p)} \quad (1.14)$$

dove $\Delta n = \Delta p$ sono le variazioni di densità di elettroni e lacune relative allo stato stazionario; v_n e v_p sono le velocità termiche di elettroni e lacune, and σ_n e σ_p sono le sezioni di cattura delle trappole. Le quantità n_1 e p_1 rappresentano le concentrazioni di elettroni e lacune se l'energia di Fermi è localizzata nei livelli trappola:

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_T - E_{Fi}}{kT}\right) \quad (1.15)$$

$$p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_T}{kT}\right) \quad (1.16)$$

E' importante analizzare le dinamiche dei tempi del processo di generazione-ricombinazione al fine di avere un potente strumento per investigare il meccanismo di degrado. Dall'equazione $R_{SHR} = \frac{\Delta n}{\tau}$ si può dedurre il tempo di vita non radiativo degli elettroni in eccesso:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{n_0 + p_0 + \Delta n}{(N_T v_p \sigma_p)^{-1}(n_0 + n_1 + \Delta n) + (N_T v_n \sigma_n)^{-1}(p_0 + p_1 + \Delta p)} \quad (1.17)$$

Se si assume che il semiconduttore è di tipo p, le lacune sono i portatori maggioritari e quindi si ha: $p_0 \gg n_0$ e $p_0 \gg p_1$. Se si assume anche una piccola variazione dall'equilibrio ($\Delta n \ll p_0$), il tempo di vita dei minoritari è dato da:

$$\tau = \tau_{n0} \frac{1}{N_T v_n \sigma_n} \quad (1.18)$$

mentre nel caso di un semiconduttore di tipo n:

$$\tau = \tau_{p0} \frac{1}{N_T v_p \sigma_p} \quad (1.19)$$

Assumendo che gli stati trappola catturano elettroni e lacune allo stesso rate: $v_p \sigma_p = v_n \sigma_n$ e $\tau_{n0} = \tau_{p0}$ si ha:

$$\tau = \tau_{n0} \left(1 + \frac{p_1 + n_1}{2n_i}\right) = \tau_{n0} \left[1 + \cosh\left(1 + \frac{E_T - E_{Fi}}{kT}\right)\right] \quad (1.20)$$

dove E_{Fi} è il livello di Fermi intrinseco che tipicamente si trova vicino alla metà del gap. La funzione \cosh ha un minimo quando il suo argomento è 0, quindi in questo caso per minimizzare il tempo di vita non radiativo si deve avere che $E_T - E_{Fi}$ è 0 cioè quando il livello trappola è vicino a metà dell'energia del gap. Per questi livelli il tempo di vita è $2\tau_{n0}$. Questo risultato dimostra che i livelli profondi sono effettivi centri di ricombinazione se essi sono vicini a metà gap. Nelle vicinanze di questi livelli l'intensità luminosa decresce.

1.4 Proprietà elettriche

1.4.1 Caratteristica I-V

Consideriamo una giunzione pn brusca con una concentrazione di donatori N_D e una concentrazione di accettori N_A . Si presume che tutti i droganti siano completamente ionizzati così che la concentrazione di elettroni liberi è data da $n = N_D$ e la concentrazione di lacune è data da $p = N_A$. Nelle vicinanze di una giunzione pn non polarizzata, gli elettroni provenienti dagli atomi donatori nel lato di tipo-n diffondono sul lato di tipo p dove incontrano molte lacune con cui si ricombinano. Un corrispondente processo si verifica con le lacune che diffondono nel lato di tipo n. Da questi processi risulta una regione vicina alla giunzione pn impoverita da portatori liberi. Questa regione è conosciuta come la regione di svuotamento. In assenza di portatori liberi nella regione di svuotamento, la carica è data solamente da donatori e accettori ionizzati. Questi formano una regione di carica spaziale che produce un potenziale V_D dato da:

$$V_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (1.21)$$

dove N_A e N_D sono le concentrazioni di atomi accettori e donatori. Il potenziale V_D rappresenta la barriera che le cariche libere devono superare per raggiungere le regioni neutre. Dalla V_D si può ricavare la larghezza della regione di svuotamento che è data da:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} (V_D - V) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (1.22)$$

dove $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ è la permittività dielettrica del semiconduttore e V è la tensione di polarizzazione del led.

La regione di svuotamento è altamente resistiva dato che è svuotata dalle cariche libere. L'applicazione di una tensione esterna diminuisce o aumenta la barriera della giunzione pn rispettivamente in caso di polarizzazione diretta o inversa. Nella condizione di polarizzazione diretta elettroni e lacune sono iniettati nelle regioni con tipo di drogaggio opposto e così il flusso di corrente cresce. Questi portatori possono eventualmente ricombinarsi emettendo fotoni.

La caratteristica corrente-tensione di un diodo è stata sviluppata da Shockley e per questo l'equazione seguente che descrive l' $I - V$ di un diodo è anche detta equazione di Shockley:

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.23)$$

dove A è la sezione della giunzione, $D_{n,p}$ sono le costanti di diffusione di lacune e elettroni e $\tau_{n,p}$ rappresentano i rispettivi tempi di vita dei portatori minoritari iniettati. In condizioni di polarizzazione inversa la corrente del diodo satura ed è data dal fattore che precede nell'equazione di Shockley la funzione esponenziale.

La caratteristica $I - V$ può essere scritta così:

$$I = I_S \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.24)$$

Sotto le tipiche condizioni di polarizzazione diretta $V \gg \frac{kT}{e}$ e quindi

$$\left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \approx \exp\left(\frac{eV}{kT}\right).$$

L'equazione di Shockley in condizioni di polarizzazione diretta può essere quindi riscritta così:

$$I = I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) \exp\left[\frac{e(V - V_D)}{kT}\right] \quad (1.25)$$

Dall'equazione precedente si può notare che la corrente aumenta fortemente quando la tensione applicata al diodo raggiunge la V_D ; quest'ultima è anche chiamata tensione di soglia (V_{th}).

Dalla statistica di Boltzmann si possono ricavare le differenze in energia tra il livello di Fermi e il limite delle bande di valenza e conduzione che si possono scrivere in questo modo:

$$E_C - E_F = -kT \ln \frac{n}{N_C} \quad (1.26)$$

$$E_F - E_V = -kT \ln \frac{n}{N_V} \quad (1.27)$$

Deve valere la seguente equazione:

Light Emitting Diode

$$eV_D - E_g + (E_F - E_V) + (E_C - E_F) = 0 \quad (1.28)$$

Nei semiconduttori altamente drogati si ha $(E_C - E_F) \ll E_g$ nella parte di tipo n e $(E_F - E_V) \ll E_g$ nella parte di tipo p. Inoltre queste quantità dipendono debolmente dalla concentrazione di droganti. Quindi nell'equazione precedente il terzo e quarto termine possono essere trascurati e si può fare la seguente approssimazione:

$$V_{th} \approx V_D \approx \frac{E_g}{e} \quad (1.29)$$

1.4.2 Scostamento dall'idealità della caratteristica I-V

Mentre l'equazione di Shockley descrive teoricamente la caratteristica $I - V$ di un diodo, in pratica viene utilizzata la seguente formula:

$$I = I_S \exp\left(\frac{eV}{n_{ideal}kT}\right) \quad (1.30)$$

dove n_{ideal} è il fattore di idealità del diodo che nel caso ideale è uguale a 1, mentre in un diodo reale varia tra 1 e 2. Nel caso di diodi ad eterostruttura il fattore di idealità può assumere anche valori maggiori.

Un diodo reale ha delle resistenze parassite serie e parallelo.

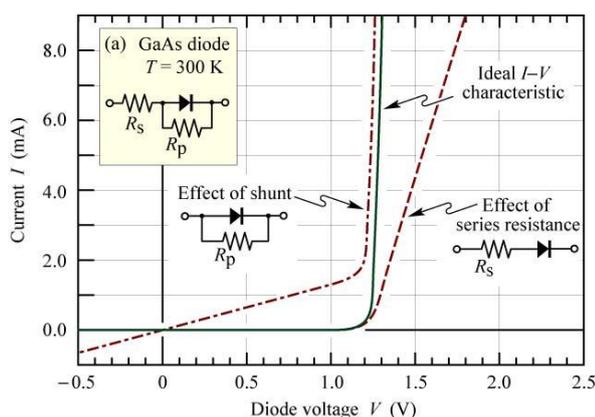


Figura 1.4: Effetti delle resistenze serie e parallelo sulla caratteristica I-V

La resistenza serie può essere dovuta all'eccessiva resistenza dei contatti o alle resistenze delle zone neutre della giunzione, mentre la resistenza parallelo

è causata da un contatto che bypassa la giunzione pn. Questo contatto può essere causato da regioni danneggiate della giunzione pn o da imperfezioni della superficie. L'equazione di Shockley data in precedenza non tiene conto delle resistenze parassite e quindi per una descrizione reale della caratteristica I-V di una giunzione pn polarizzata direttamente si può modificare in questo modo:

$$I - \frac{(V - IR_s)}{R_p} = I_S \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{n_{ideal} kT} \right] \quad (1.31)$$

dove R_s e R_p rappresentano la resistenza serie e parallelo. Si può notare che per $R_p \rightarrow \infty$ e $R_s \rightarrow 0$ si ritorna alla formula precedente.

Ci sono altri effetti parassiti trascurati in precedenza:

- processi di generazione e ricombinazione nella zona di svuotamento
- le fotocorrenti
- la presenza di diodi parassiti con area e tensione di soglia minori della giunzione principale

Nella zona di svuotamento dei diodi reali possono essere presenti dei difetti. Questi danno luogo a stati trappola, i quali rendono la generazione e la ricombinazione probabile anche in questa zona.

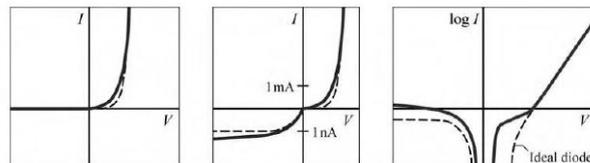


Figura 1.5: Effetto del processo di generazione e ricombinazione all'interno della zona di svuotamento

Per un diodo in polarizzazione diretta il processo di ricombinazione all'interno della regione di carica spaziale genera un eccesso di corrente. La corrente in eccesso è dovuta alla ricombinazione di portatori minoritari nella zona di svuotamento. La corrente di ricombinazione domina a basse tensioni

Light Emitting Diode

e da un fattore di idealità pari a 2, mentre per alte tensioni la corrente di diffusione è dominante e si ha un fattore di idealità pari a 1. Nel caso di polarizzazione inversa la corrente in eccesso è data dalla generazione di portatori nella zona di svuotamento. Sotto l'influenza di un campo elettrico nella regione di carica spaziale i portatori generati vanno verso le regioni neutre. Questa corrente continua ad aumentare in polarizzazione inversa perché in questo modo aumenta la larghezza della zona di svuotamento.

Il led è un dispositivo inserito all'interno di un package composto da una lente trasparente e quindi è in grado di generare una fotocorrente in presenza di un ambiente esterno luminoso. Le misure sul dispositivo devono essere fatte in un ambiente buio perché altrimenti risultano alterate.

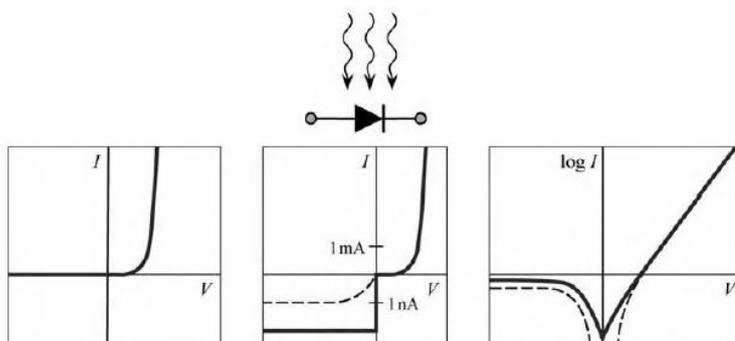


Figura 1.6: Effetto delle fotocorrenti

Alcuni diodi presentano una tensione di accensione prematura a causa di perdite attraverso gli stati superficiali presenti nel perimetro del chip o attraverso i difetti lungo l'asse della giunzione pn. Questi difetti danno origine a percorsi con barriera più bassa rispetto al diodo principale. Questo fenomeno parassita è visto come un diodo in parallelo in grado di alterare la caratteristica I-V come si può vedere nella figura seguente:

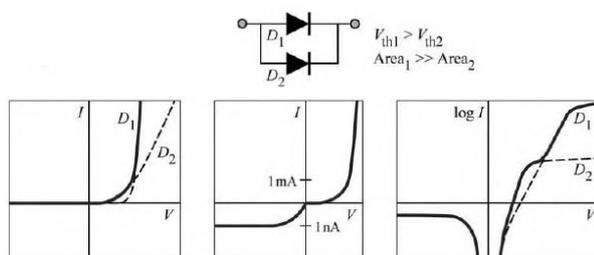


Figura 1.7: Effetto del diodo parassita

1.4.3 Strutture tipiche

Struttura a omogiunzione

La struttura a omogiunzione è la più semplice con cui può essere realizzato un led. Si può ottenere semplicemente realizzando una giunzione tra due semiconduttori dello stesso tipo ma drogati in maniera opposta (uno tipo p e l'altro tipo n). Quando viene applicata una tensione positiva tra anodo e catodo, polarizzando direttamente la giunzione, gli elettroni e lacune diffondono verso i lati p ed n rispettivamente per effetto dell'abbassamento della barriera di energia. Qui si possono ricombinare con i maggioritari delle due regioni. La distanza media che un portatore iniettato percorre prima di ricombinarsi è circa pari alla sua lunghezza di diffusione, cioè $L_n = \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}$ per gli elettroni e $L_p = \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}$ per le lacune. La loro distribuzione lungo la giunzione è legata direttamente alla relativa costante di diffusione (quindi alla mobilità) e al loro tempo di vita. Nei semiconduttori tipicamente la lunghezza di diffusione è dell'ordine di numerosi micrometri e i portatori iniettati si distribuiranno lungo una regione di notevole spessore.

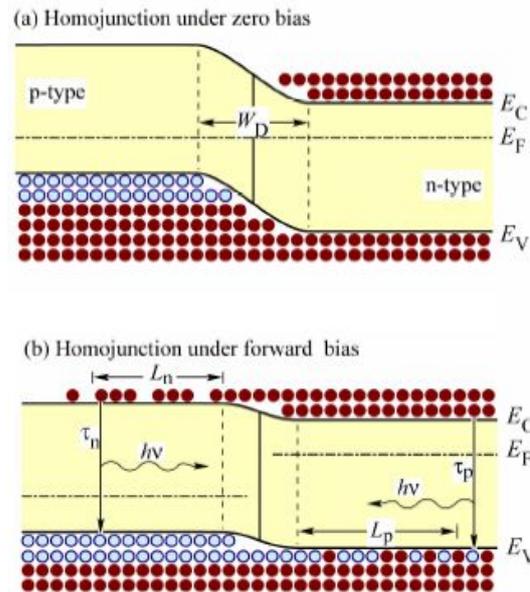


Figura 1.8: Omogiunzione pn in condizioni di polarizzazione (a) nulla e (b) diretta

Dalla figura precedente possiamo osservare come la concentrazione dei portatori decresca all'aumentare della distanza di diffusione. Questo fenomeno influisce negativamente sull'efficienza del led dato che che il tasso di

Light Emitting Diode

ricombinazione radiativa $R = Bnp$ è proporzionale al prodotto delle concentrazioni sia di elettroni che di lacune. Questo è il motivo fondamentale per cui tale tipo di struttura non viene più utilizzata per la realizzazione dei led e quindi è necessario ricercare una soluzione alternativa che permetta di elevare il tasso di ricombinazione radiativa e quindi l'efficienza.

Struttura a eterogiunzione

Per risolvere il problema della bassa efficienza radiativa legata alla struttura a omogiunzione si possono realizzare i led con eterogiunzioni. Queste si ottengono formando una giunzione tra due semiconduttori diversi che possiedono energy gap e altre caratteristiche diverse. Di solito i due materiali impiegati hanno tipo di conduttività opposta come nelle comuni omogiunzioni. Quando due materiali con tipo di conduttività opposta vengono uniti per formare un'eterogiunzione pn, si crea come visto nelle omogiunzioni un processo di diffusione degli elettroni e delle lacune dalle zone a maggiore concentrazione a quelle a minore con la conseguente formazione di una regione di svuotamento. La differenza principale rispetto alle classiche omogiunzioni è la presenza in questo caso di discontinuità nelle bande di conduzione ΔE_C e valenza ΔE_V all'interfaccia tra i due materiali. In figura 1.9 sono rappresentati i diagrammi a bande prima e dopo la formazione di un' eterogiunzione pn.

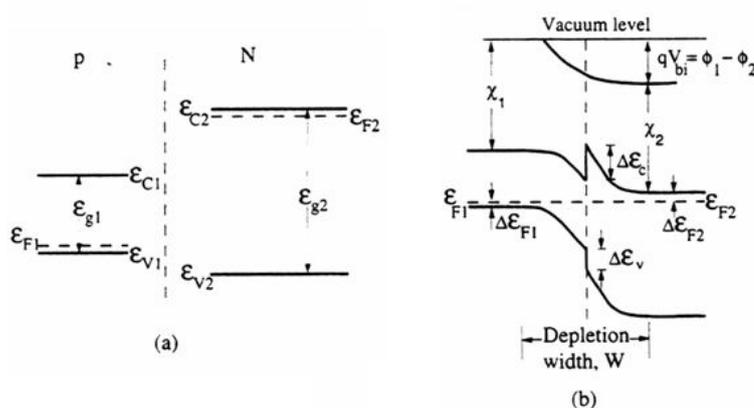


Figura 1.9: Diagramma a bande di energia prima e dopo la formazione di un' eterogiunzione pn tra due semiconduttori con energy gap diversi.

Nel caso di eterostruttura formata tra due materiali con lo stesso tipo di drogaggio (ad esempio di tipo n) come risultato della diffusione di elettroni da una zona all'altra si ha lo svuotamento da un lato della giunzione e

l'accumulazione di portatori in quello adiacente, sempre con la formazione di discontinuità nelle bande di conduzione e valenza in prossimità dell'interfaccia.

Come possiamo vedere all'aumentare della tensione applicata progressivamente la barriera alla diffusione di elettroni decresce favorendo così la loro iniezione nel lato p della giunzione. La discontinuità in banda di conduzione ΔE_C non ostacola la diffusione di questi portatori di carica. Per quanto riguarda le lacune in banda di valenza vediamo che la polarizzazione applicata riduce la barriera alla loro diffusione, ma per quanto venga applicata tensione positiva, la discontinuità in banda valenza ΔE_V permane, riducendo così il flusso di lacune verso il lato n, in percentuale tanto maggiore quanto più grande è ΔE_V .

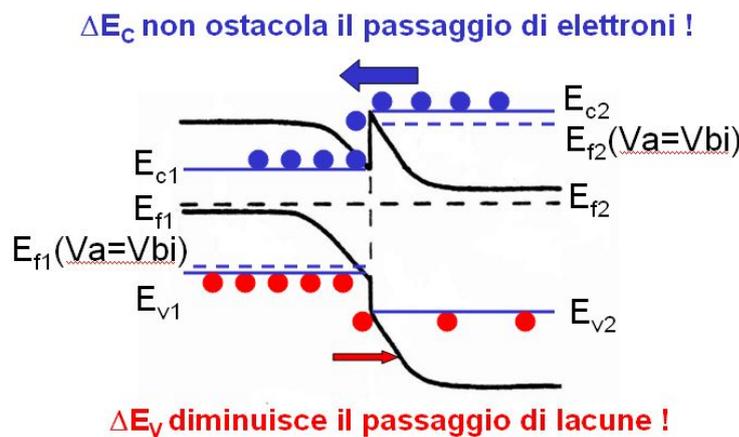


Figura 1.10: Elettroni e lacune in una eterogiunzione pn polarizzata direttamente

Con questa eterogiunzione abbiamo ottenuto un effetto di confinamento delle lacune che risultano in alta concentrazione nei pressi della giunzione. Di conseguenza si ha anche un aumento della probabilità di transizione radiativa, che ricordiamo ancora una volta essere proporzionale al prodotto np , rispetto al caso dell'omogiunzione che però resta ancora insufficiente. Una soluzione che permette di ottenere valori di efficienza quantica interna molto più elevati è quella della doppia eterostruttura: essa si ottiene frapponendo un semiconduttore a energy gap piccolo fra due regioni a gap maggiore, una con drogaggio di tipo p e l'altra di tipo n. La zona centrale è detta regione attiva in quanto è quella dove avviene la maggior parte dei processi di ricombinazione radiativi. Essa può essere drogata di tipo n o p, o intrinseca, a seconda delle varie scelte costruttive adottate. I vantaggi offerti da questa struttura

Light Emitting Diode

sono notevoli e possono essere visionati mediante l'ausilio della figura 11: come possiamo notare ora, grazie alle barriere di energia che si formano alle interfacce tra le due eterogiunzioni (ossia tra regione attiva-lato n e regione attiva-lato p), è possibile confinare sia elettroni che lacune nella zona a gap stretto, elevando così notevolmente il tasso di ricombinazione radiativa. Basti pensare che in una normale omogiunzione la lunghezza di diffusione dei portatori varia mediamente da 1 a 20 μm , mentre lo spessore della regione attiva di una doppia eterostruttura viene determinato direttamente in fase di costruzione. Quindi si possono scegliere valori che variano da unità di micrometri a decina o unità di nanometri. Con questa soluzione la zona di ricombinazione è limitata su una distanza molto minore rispetto al caso delle omogiunzioni e quindi le concentrazioni di entrambi i tipi di portatori sono molto elevate.

(c) Heterojunction under forward bias

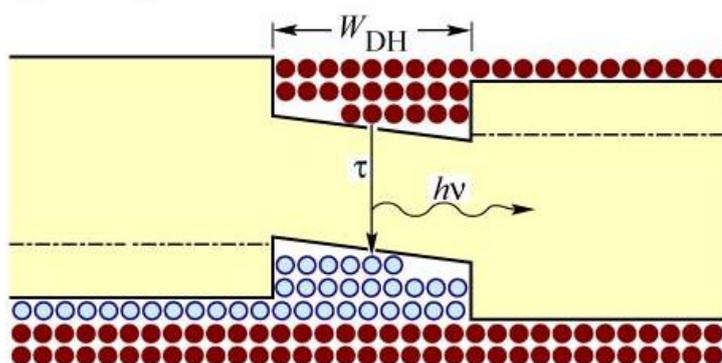


Figura 1.11: Doppia eterostruttura in condizioni di polarizzazione diretta

Le doppie eterostrutture non offrono solamente confinamento elettrico, ma anche ottico. Sfruttando la differenza di indice di rifrazione che solitamente esiste tra il materiale costituente la regione attiva e quello inerente alle zone di barriera esterne, è possibile confinare i fotoni nella regione centrale e quindi usarla come guida d'onda. Anche se la doppia eterogiunzione non viene sfruttata come guida d'onda, essa gode del pregio di essere caratterizzata da basso riassorbimento dei fotoni generati: infatti siccome le regioni di barriera hanno energy gap maggiore rispetto alla regione attiva, i fotoni generati non avranno energia sufficiente per essere assorbiti nelle zone esterne. Le eterostrutture offrono dei notevoli vantaggi e permettono di realizzare led ad elevata efficienza, purtroppo esistono anche alcune problematiche associate ad esse:

- le resistenze causate dagli spike di energia alle interfacce delle eterogiunzioni
- la perdita di portatori nelle doppie eterostrutture
- l'overflow di portatori sempre nelle doppie eterogiunzioni
- lo strain reticolare causato dal mismatch tra le costanti reticolari dei semiconduttori diversi

Struttura a buca quantica

Le strutture a buca quantica sono semplicemente delle doppie eterostrutture con spessore della regione attiva molto piccolo, solitamente dell'ordine di unità o al massimo alcune decine di nanometri: l'ampiezza estremamente limitata della zona a energy gap stretto permette di ottenere elevate concentrazioni di portatori confinati al suo interno, alzando il tasso di ricombinazione radiativa. Quando lo spessore della buca viene ridotto notevolmente al punto da diventare confrontabile con la lunghezza d'onda di De Broglie associata all'elettrone si manifesta un particolare effetto quantistico, come conseguenza del fatto che in una tale situazione sono impediti i movimenti dei portatori all'interno della regione attiva lungo la direzione perpendicolare alla buca mentre è possibile solo un movimento bidimensionale parallelo allo strato della buca. In pratica non si può più ipotizzare la presenza di un continuo dei livelli di energia in banda di conduzione e di valenza, bensì questi diventano quantizzati; quindi la regione attiva si comporta più propriamente come una buca di potenziale. I dispositivi reali hanno estensione tridimensionale e quindi la regione attiva di una struttura a buca quantica deve essere considerata più propriamente come uno strato di materiale bidimensionale; pertanto i portatori di carica sono confinati lungo una sola direzione, ma sono liberi di muoversi lungo le altre due e di conseguenza la relazione energia-quantità di moto degli elettroni può essere espressa così:

$$E = E_c + E_q + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c} \quad (1.32)$$

dove E_c rappresenta il limite inferiore della banda di conduzione, E_q è l'energia di un generico livello discreto all'interno della buca misurata rispetto ad E_c , m_c è la massa efficace dell'elettrone ed infine $k = (k_1, k_2)$ è il vettore d'onda bidimensionale. Quindi nella realtà le transizioni non avvengono esclusivamente tra i livelli di energia discreti, come possiamo intuire dalla relazione precedente, anche se l'effetto di confinamento lungo una direzione spaziale e la conseguente quantizzazione dei livelli di energia comporta modifiche anche nella densità di stati di energia all'interno della buca e

Light Emitting Diode

quindi nella distribuzione dei portatori rispetto al caso classico. La densità in questo caso ha andamento costante a tratti, contro quello proporzionale alla radice dell'energia che caratterizza un comune semiconduttore con estensione tridimensionale. In particolare la densità di stati disponibili è nulla per energie inferiori al primo livello discreto e quindi le transizioni a minore energia nelle buche quantiche non avvengono tra i limiti delle bande di conduzione e di valenza, bensì tra i primi livelli quantizzati delle rispettive buche di potenziale: di conseguenza a parità di energy gap l'energia minima dei fotoni emessi sarà maggiore per una struttura a buca quantica rispetto ad una normale eterostruttura. La situazione appena descritta è meglio illustrata in figura 1.12.

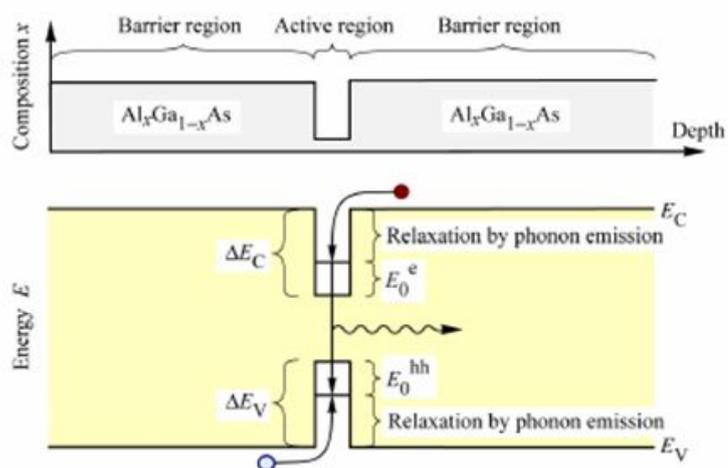


Figura 1.12: Composizione e diagramma a bande relativo ad una buca quantica

Le strutture a buca quantica presentano gli stessi problemi visti per le comuni doppie eterostrutture, anche se grazie al ridotto spessore della regione attiva è possibile crescere strati con una percentuale di dislocazioni e difetti inferiore rispetto ad una normale doppia eterostruttura dove l'ampiezza della zona centrale è solitamente molto più grande. Nelle strutture a buca quantica il problema dell'overflow dei portatori per elevate correnti di iniezione è molto più marcato rispetto al caso delle normali doppie eterostrutture: questo è dovuto al minor volume della regione attiva e per superare tale problema si ricorre alle strutture a buca quantica multipla, che consistono semplicemente nella realizzazione di più buche quantiche alternando la deposizione di numerosi strati a energy gap grande e piccolo.

1.5 Proprietà ottiche

1.5.1 Efficienza

In un led ideale per ogni elettrone iniettato nella regione attiva si ha l'emissione di un fotone e quindi l'efficienza risulta unitaria, ma nei diodi reali chiaramente questo non succede. Si può inizialmente definire l'efficienza interna ad un diodo come il rapporto tra il numero di fotoni emessi dalla regione attiva per secondo e il numero di elettroni iniettati nel led per secondo:

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/hv}{I/e} \quad (1.33)$$

dove P_{int} è la potenza ottica emessa dalla regione attiva, hv è l'energia dei fotoni emessi, mentre I rappresenta la corrente iniettata nel dispositivo. In un led ideale tutti i fotoni emessi dalla regione attiva sono emessi nello spazio e quindi l'efficienza di estrazione risulta pari a 1. In pratica non tutta la potenza emessa dalla zona attiva è emessa nello spazio libero, alcuni fotoni non potranno lasciare mai il led a causa di vari meccanismi di perdita. Tra questi meccanismi si possono ricordare l'assorbimento da parte del substrato del led di alcuni fotoni emessi dalla zona attiva, l'assorbimento da parte dei contatti metallici e il fenomeno della riflessione interna totale in cui i fotoni restano intrappolati nel materiale per effetto della riflessione totale all'interfaccia chip-ambiente. L'efficienza di estrazione può quindi essere definita come il rapporto tra il numero di fotoni emessi nello spazio libero per secondo e il numero di fotoni emessi dalla regione attiva per secondo:

$$\eta_{extraction} = \frac{P/hv}{P_{int}/hv} \quad (1.34)$$

dove P è la potenza emessa nello spazio libero.

L'efficienza di estrazione può essere una grave limitazione per i led ad alte prestazioni. E' abbastanza difficile aumentare l'efficienza di estrazione oltre il 50 % senza ricorrere a sofisticati e costosi processi.

L'efficienza quantica esterna è definita così:

$$\eta_{ext} = \frac{P/hv}{I/e} = \eta_{int}\eta_{extraction} \quad (1.35)$$

cioè da il rapporto tra il numero di particelle di luce utili e il numero di particelle di carica iniettate nel led.

Light Emitting Diode

Per concludere definiamo l'efficienza di conversione di potenza, detta anche wallplug efficiency, come:

$$\eta = \frac{P}{IV} \quad (1.36)$$

dove IV è la potenza elettrica fornita al led.

1.5.2 Spettro di emissione

Il meccanismo fisico attraverso il quale i led emettono luce è la ricombinazione spontanea di coppie elettrone buca e l'emissione simultanea di fotoni. Il processo di emissione spontanea è fondamentalmente diverso dal processo di emissione stimolata che si verifica nei laser a semiconduttore. La ricombinazione spontanea ha certe caratteristiche che determinano le proprietà ottiche dei led. Un processo di ricombinazione elettrone lacuna è illustrato nella figura 13.

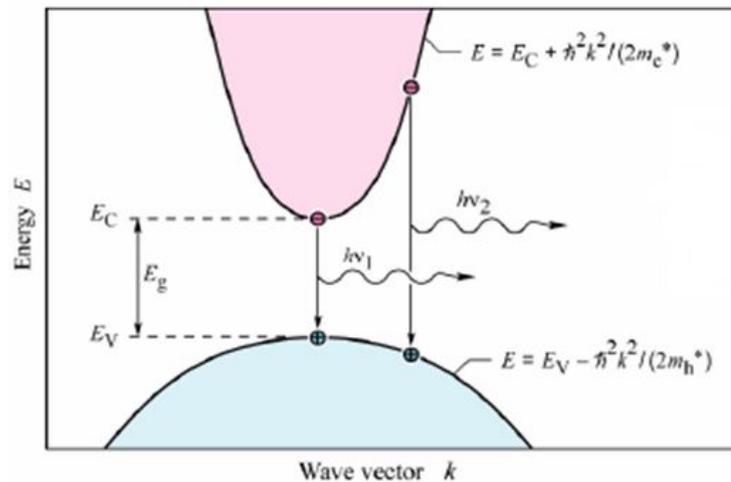


Figura 1.13: Relazione di dispersione parabolica $E-k$ di elettroni e lacune per un semiconduttore a gap diretto in cui vengono rappresentate due possibili transizioni verticali di ricombinazione radiativa

Le relazioni di dispersione paraboliche $E - k$ di elettroni e lacune possono essere scritte così:

$$E = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (1.37)$$

per gli elettroni e:

$$E = E_V + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (1.38)$$

per le lacune, dove m_e^* e m_h^* sono le masse efficaci di elettroni e lacune e \hbar è la costante di Planck divisa per 2π .

L'obbligo di conservazione dell'energia e del momento porta ad una visione più completa del meccanismo di ricombinazione radiativa. Ne consegue dalla distribuzione di Boltzmann che elettroni e lacune hanno una energia cinetica media pari a kT . La conservazione dell'energia richiede che l'energia del fotone sia data dalla differenza tra l'energia degli elettroni e l'energia delle lacune cioè: $h\nu = E_e - E_h \approx E_g$. L'energia del fotone è circa uguale all'energy gap se l' energia termica è piccola rispetto al gap di banda di energia $kT \ll E_g$. La lunghezza d'onda di emissione di un led si può ottenere con la scelta di un materiale semiconduttore con un particolare band-gap. Usando le relazioni di dispersione relative ai portatori definite prima, la densità di stati in banda di valenza e di conduzione, imponendo il vincolo che elettrone e lacuna che si ricombinano abbiano la stessa quantità di moto ed approssimando la distribuzione dei portatori nelle bande con la statistica di Boltzmann, si può trovare un'espressione per l'intensità della radiazione emessa come funzione dell'energia:

$$I(E) \propto \sqrt{(E - E_g)} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.39)$$

Per piccoli valori di $E - E_g$ l'andamento è crescente con l'energia e domina il fattore legato alla densità di stati mentre per elevati valori l'intensità decresce con l'aumentare dell'energia perché domina il fattore legato alla distribuzione di Boltzmann.

Lo spettro mostra un picco di emissione in corrispondenza dell'energia:

$$E = E_g + \frac{1}{2}kT \quad (1.40)$$

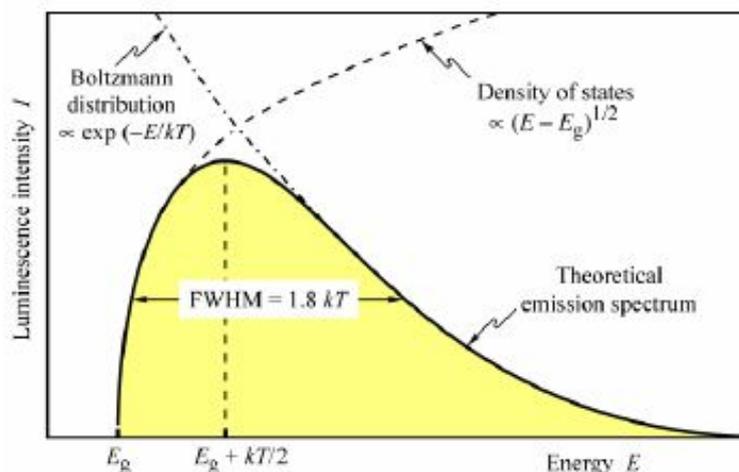


Figura 1.14: Spettro di emissione teorico di un led espresso in funzione dell'energia

L'ampiezza (full-width at half-maximum) dello spettro risulta:

$$\Delta E = 1.8kT \text{ e } \Delta \lambda = \frac{1.8kT\lambda^2}{hc}$$

In particolare da questa ultima relazione vediamo che l'ampiezza spettrale dipende dalla lunghezza d'onda stessa, ossia maggiore è λ , tanto più grande è l'ampiezza spettrale secondo una legge quadratica; comunque solitamente $\Delta\lambda$ è molto minore del range spettrale associato a ciascun colore nel visibile e quindi la radiazione è percepita dall'occhio umano come monocromatica. Il picco dello spettro di emissione è direttamente legato all'energy gap E_g del materiale quindi variando la composizione relativa degli elementi costituenti i composti ternari e quaternari è possibile determinare l'energy gap del semiconduttore e quindi la lunghezza d'onda di emissione.

1.5.3 Dipendenza dalla temperatura dello spettro di emissione

L'intensità di emissione dei led diminuisce con l'aumentare della temperatura. Questa diminuzione di l'intensità di emissione è dovuta a diversi fattori che dipendono dalla temperatura tra cui: ricombinazione non radiativa attraverso livelli profondi, ricombinazione di superficie e la perdita dei portatori oltre le barriere dell'etero-struttura. Vicino alla temperatura ambiente, la dipendenza dalla temperatura di l'intensità di emissione di un led è spesso descritta dalla seguente equazione:

$$I = I_{(300K)} \exp\left(-\frac{T - 300K}{T_1}\right) \quad (1.41)$$

dove T_1 è la temperatura caratteristica.

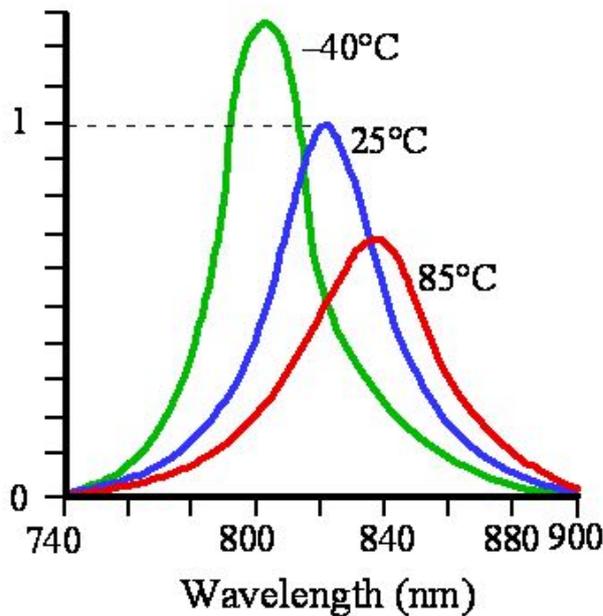


Figura 1.15: Spettri di emissione relativi ad un led realizzato in AlGaAs per tre diverse temperature

1.5.4 Estrazione della luce

I fotoni generati nella regione attiva di un led potrebbero non essere emessi facilmente nello spazio libero a causa della riflessione totale che si può verificare all'interfaccia semiconduttore-aria: questo fenomeno è molto marcato per materiali aventi un indice di rifrazione molto più grande rispetto a quello dell'ambiente circostante. Immaginando di avere un led con superficie di emissione planare e una sorgente di radiazione puntiforme all'interno del chip, è possibile determinare l'angolo critico di riflessione totale all'interfaccia semiconduttore-aria mediante la legge di Snell. Quindi si può definire il cono di fuga della luce. Si dimostra che in queste ipotesi il rapporto tra la potenza emessa verso l'esterno da un led e quella generata all'interno è data dalla seguente relazione:

$$\frac{P_{out}}{P_{source}} = \frac{1}{4} \frac{n_{air}^2}{n_s^2} \quad (1.42)$$

dove n_{air} e n_s rappresentano rispettivamente l'indice di rifrazione dell'aria e del semiconduttore. Quanto maggiore è n_s rispetto a n_{air} , tanto minore è la percentuale di luce emessa verso l'esterno. Inoltre si dovrebbe tenere conto anche delle perdite per riflessione all'interfaccia che invece sono state trascurate. La differenza degli indici di rifrazione tra ambiente esterno e semiconduttore oltre a limitare la percentuale di luce emessa nell'ambiente come appena visto, conduce anche ad un pattern di emissione non isotropo, cioè l'intensità della luce varia con la direzione spaziale: nel caso di un led con superficie planare e indice di rifrazione del materiale grande rispetto a quello dell'aria, il pattern di emissione è lambertiano [1] e in questo caso l'intensità della luce emessa risulta:

$$I_{air} = \frac{P_{source}}{4\pi r^2} \frac{n_{air}^2}{n_s^2} \cos\Phi \quad (1.43)$$

L'intensità quindi in questo particolare caso varia con la direzione, descritta dall'angolo Φ rispetto alla normale alla superficie: in particolare l'intensità è massima per $\Phi = 0$ gradi, nulla per $\Phi = 90$ gradi e si dimezza rispetto al suo valore massimo per $\Phi = 60$ gradi. Il modo molto semplice per modificare il pattern di emissione di un led è quello di applicare sopra alla sua superficie una lente trasparente, solitamente realizzata con resine epossidiche: ad esempio utilizzando una lente emisferica si otterrà un pattern di emissione isotropo, ossia con intensità costante in tutte le direzioni, mentre se si applica una lente di forma parabolica si ottiene un pattern molto direzionale, il cui picco di intensità è diretto lungo la normale alla superficie di emissione del led. I vantaggi offerti dall'utilizzo di una lente non derivano solamente dalla modifica del pattern di emissione: infatti scegliendo opportunamente l'indice di rifrazione della resina, di valore intermedio tra quello del semiconduttore e quello dell'aria, è possibile realizzare un accoppiamento tra chip del led e ambiente esterno, aumentando l'angolo critico di riflessione totale e riducendo le perdite per riflessione interna. Di conseguenza viene espanso il cono di fuga della luce. L'uso di una lente permette quindi di migliorare l'efficienza di estrazione del led ed in particolare il rapporto tra tale efficienza nel caso di uso della lente e quella senza: è esprimibile come:

$$\frac{\eta_{epoxy}}{\eta_{air}} = \frac{1 - \cos\Phi_{c,epoxy}}{1 - \cos\Phi_{c,air}} \quad (1.44)$$

dove $\Phi_{c,epoxy}$ e $\Phi_{c,air}$ rappresentano gli angoli critici di riflessione interna totale nel caso di led con e senza lente rispettivamente.

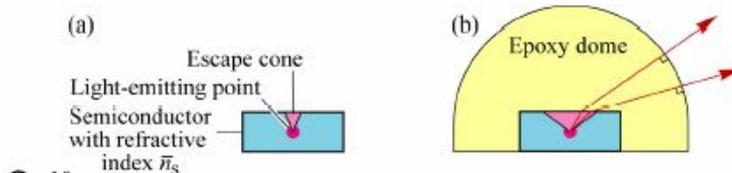


Figura 1.16: Led (a) con e (b) senza l'applicazione di una lente semisferica: si nota la differenza nell'estensione del cono di fuga della luce nei due casi

Esistono comunque altre tecniche che permettono di aumentare l'efficienza di estrazione: la possibilità di realizzare i chip con particolari forme che favoriscono l'estrazione dei fotoni, la deposizione di uno strato riflettente che funge da specchio nella superficie inferiore del dispositivo, oppure rendere rugosa la superficie di emissione dei led planari. Con quest'ultima soluzione, molto adottata, si ha la possibilità di variare localmente l'angolo critico di riflessione totale, permettendo quindi alla luce di uscire verso l'ambiente esterno più facilmente.

1.6 Illuminazione a stato solido

1.6.1 Storia

La storia dell'illuminazione allo stato solido iniziò a metà degli anni venti, quando Losev, un giovane scienziato russo, osservò l'emissione di luce da diodi in ossido di zinco e carburo di silicio utilizzati nei ricevitori radio quando erano attraversati da una corrente. I 16 articoli pubblicati da Losev tra il 1924 e il 1930 fornirono uno studio completo del led delineando le sue applicazioni. [37] Losev capì la natura non termica delle emissioni, misurando la corrente di soglia e riconoscendo che l'emissione del led è collegata all'azione del diodo e misurò le caratteristiche corrente-tensione del dispositivo in dettaglio. [38] Nel 1961 Biard e Pittman stavano lavorando insieme su un progetto di Texas Instruments per sviluppare diodi in arseniuro di gallio. Usando un microscopio a raggi infrarossi scoprirono che questi diodi emettevano una luce significativa nella regione infrarossa. Il primo spettro visibile di un led fu sviluppato nel 1962 da Holonyak Jr., mentre lavorava alla General Electric Company. Fino al 1968 i led erano estremamente costosi, nell'ordine di 200 dollari per unità, e così avevano poca applicazione nella pratica. La Società Monsanto nel 1968 fu la prima a produrre in serie i led visibili. Si utilizzò

Light Emitting Diode

l'arseniuro di fosforo di gallio per la produzione di led rossi usati come indicatori. La Hewlett Packard (HP) introdusse i led nel 1968, inizialmente utilizzando GaAsP fornito dalla Monsanto. La tecnologia dimostrò di avere applicazioni importanti per il display alfanumerico e fu integrata nei primi calcolatori dell'HP. Il primo led in GaN fu realizzato nel 1971 da un team presso i laboratori della Radio Corporation d'America (RCA), che includeva Maruska, Pankove e Miller. Questo dispositivo impiegava una struttura in metallo-isolante-semiconduttore, e la sua incredibilmente bassa efficienza gli impedì di essere un successo commerciale. Dopo che questa ricerca ebbe fine i lavori sul GaN cessarono. Tuttavia, Akasaki e un suo collaboratore in Giappone non si arresero e nel 1989 dimostrarono il primo vero drogaggio di tipo p e la conducibilità in GaN. In seguito a questi risultati il primo led a omogiunzione pn in GaN fu segnalato da Akasaki nel 1992. Il led con luce emessa nell'ultravioletto e nel blu dello spettro fu coltivato su un substrato di zaffiro e aveva un'efficienza di circa l'1%. Questo era un valore molto elevato per un materiale altamente dislocato come il GaN cresciuto su un substrato di zaffiro. Questa fu anche la dimostrazione che le efficienze dei led al nitruro non sono affette dalle dislocazioni in maniera così negativa come quelli all'arseniuro e fosforo. Nel 1988 Nakamura iniziò lo sviluppo di un dispositivo a semiconduttore che emettesse luce blu alle Nichia Chemical Industries. Nakamura aveva la capacità e la creatività ingegneristica per risolvere i problemi tecnici derivanti dalla ricerca basata sul GaN. Iniziò degli esperimenti per rendere il GaN sottile utilizzando le normali apparecchiature con un materiale di substrato noto, zaffiro, e un metodo ben noto, la MOCVD. Nakamura modificò ripetutamente la MOCVD, e eseguì più di 500 esperimenti in un breve periodo. Alla fine, nel 1991, riuscì a fabbricare uno film di GaN sottile con uniformità di livello superiore utilizzando le sue modifiche alla MOCVD. Questa nuova tecnica fu chiamata TFMOCVD. Nel 1992 sempre con lo stesso metodo conseguì un film sottile del composto ternario InGaN di alta qualità. Questo film era necessario per ottimizzare la lunghezza d'onda della luce emessa e per migliorare l'efficienza di emissione. Al fine di fabbricare lo strato di tipo-p GaN, Nakamura studiò un altro metodo più pratico di quello con irradiazione di elettroni studiato da Akasaki. Un trattamento termico, con un campione drogato con impurità di magnesio come accettore, era stato studiato, ma era stato provato senza successo. Nakamura riesaminò l'effetto del trattamento termico e scoprì che una atmosfera di idrogeno libero era essenziale per attivare il drogaggio col magnesio e per ottenere il tipo p. Egli chiarì il meccanismo di formazione del tipo p, proponendo un modello basato sul legame tra atomi di idrogeno e le impurità accettori. Utilizzando la suddetta tecnologia, Nakamura fabbricò un led blu a omogiunzione con 0,18% di efficienza e uno a eterostruttura doppia con 0,22% di efficienza nel 1992. Nel 1993 si arrivò al 2,7% utilizzando il film sottile di InGaN. Da questi risultati, Nichia Chemical Industries nel 1993 consegnarono al mondo il primo led blu ad alta luminosità.

1.6.2 Colorimetria e fotometria

La misura dell' intensità luminosa per dispositivi utilizzati tutti i giorni non può essere slegata dalla fisica dell'occhio umano. Quindi è necessario fornire una serie di parametri relativi alla sensibilità dell'occhio umano.

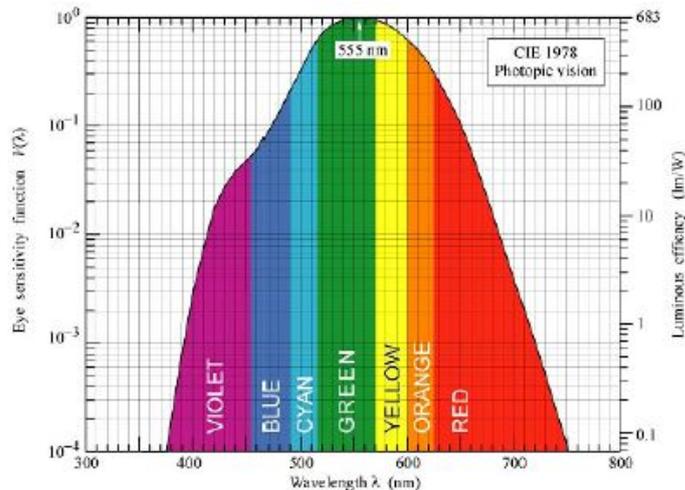


Figura 1.17: Curva fotopica della sensibilità dell'occhio umano

L'occhio umano è in grado di percepire la radiazione luminosa con lunghezza d'onda compresa tra circa i 390 nm e i 730 nm. All'interno di questa banda però la sensibilità non è costante ma ha un andamento approssimativamente a campana con picco intorno ai 555 nm, ovvero il colore verde. Il CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ha proposto l'andamento di questa curva di sensibilità distinguendo tra andamento scotopico e fotopico: a livello strutturale dell'occhio infatti, c'è una differenza tra visione dovuta ai bastoncelli (regime di bassa illuminazione insensibile ai colori) detta scotopica e quella dovuta ai coni (alta illuminazione e sensibile ai colori) detta fotopica. L'andamento non costante della curva di sensibilità porta a percepire maggiormente colori nella zona centrale come il verde rispetto a colori ai bordi come il viola o il rosso con la stessa potenza ottica.

La prima unità di misura per l'intensità luminosa è stata la candela (cd); oggi 1 cd è definita come l'intensità luminosa di una sorgente monocromatica con picco a 555 nm che emette con potenza ottica di (1/683) W in un angolo solido di 1 steradiante. Un' unità di misura per il flusso luminoso è il lumen (lm). Esiste anche una definizione rigorosa in relazione alla curva di sensibilità $V(\lambda)$:

$$\Phi_{lumen} = 683 \frac{lm}{W} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.45)$$

dove $P(\lambda)$ è la potenza ottica emessa per unità di lunghezza.

La sensibilità dell'occhio umano è un parametro estremamente soggettivo, soprattutto per quanto riguarda la percezione del colore. Quindi è necessario adottare uno standard per valutare il colore di una sorgente. Per questo la CIE ha stabilito delle curve di sensibilità al rosso $\bar{x}(\lambda)$, al verde $\bar{y}(\lambda)$ e al blu $\bar{z}(\lambda)$, dove la curva relativa al verde coincide con la curva di sensibilità totale.

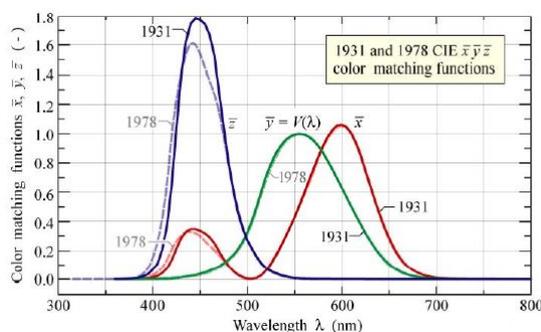


Figura 1.18: Curve di sensibilità al rosso, verde e blu

Da queste curve si possono ottenere i livelli di stimolo ai tre colori:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.46)$$

e da questi identificare le coordinate cromatiche all'interno del diagramma cromatico:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = 1 - x - y \quad (1.47)$$

Nella parte centrale del diagramma di cromaticità c'è il bianco, che può assumere vari livelli. Il bianco è più puro quanti più colori partecipano alla sua formazione dando uno spettro piatto su tutta la banda del visibile.

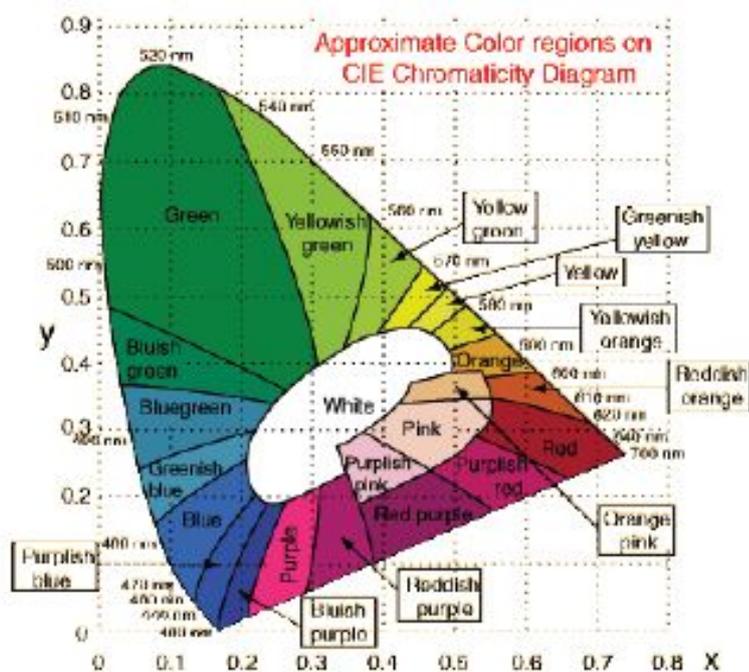


Figura 1.19: Diagramma cromatico

Per individuare i livelli di bianco si utilizza il concetto di temperatura di colore (CCT). L'emissione del corpo nero di Planck è legata alla sua temperatura, ed è quindi possibile tracciare all'interno del diagramma di cromaticità il luogo dei punti della radiazione del corpo nero in funzione della temperatura. Tale curva parte dal rosso fino ad arrivare al centro del diagramma a temperatura di 10000 K e prosegue verso il blu.

La qualità di bianco di una sorgente luminosa si esprime anche rispetto alla sua capacità di rendere i colori veri. Si può così definire l'indice di rendimento cromatico (CRI).

1.6.3 Led bianchi

Considerando che le fonti di luce convenzionali presentano una produzione media di 15 a 100 lumen per watt, si prevede di raggiungere nei led bianchi un'efficienza di 300 lumen per watt attraverso il continuo sviluppo. Alcuni degli attuali sistemi a led mostrano un più alto rendimento luminoso rispetto alla maggior parte delle sorgenti luminose tradizionali. I led bianchi sono sicuramente adatti ad applicazioni di visualizzazione e segnaletica, ma per

I fosfori operano una conversione verso lunghezze d'onda minori, creando un colore complementare al blu, mentre la riga nel blu rimane invariata. Le due componenti si sommano e vanno a formare una luce bianca di buona qualità. Ci sono però due grossi problemi, lo scarso assorbimento del blu da parte dei fosfori e l'effetto Halo: quest'ultimo si manifesta con un'emissione multicolore laterale dovuta al fatto che il led produce una luce direzionale mentre i fosfori operano una conversione in un angolo solido di 2π steradiani.

Led ai fosfori policromatici

In questo caso il chip è un led ultravioletto mentre i fosfori sono una combinazione di rosso, verde e blu, che permettono di avere un output simile a quello dei LED RGB [18]. Questi led hanno un CRI paragonabile a quello di una lampada a fluorescenza, ma anche qui c'è il problema di un abbassamento dell'efficienza radiativa causata dallo Stark shift dei fosfori. Inoltre i fosfori rossi tendono ad assorbire molto più degli altri e quindi ad abbassare l'efficienza del led.

Led RGB

Questi sono i led con migliori caratteristiche: sono composti da tre chip, rosso, verde e blu, ed è possibile regolarne indipendentemente l'intensità. In tal modo alti indici di rendering sono raggiungibili e, parallelamente, tutti i colori sono riproducibili attraverso un controllo fine dei singoli chip. Il problema fondamentale è però legato alle diverse cinetiche di degrado dei tre LED, che portano a variazioni anche evidenti dello spettro in uscita.

CAPITOLO

2

MATERIALI, AFFIDABILITÀ E MECCANISMI DI DEGRADO

2.1 Nitruro di Gallio

L'utilizzo del nitruro di gallio (GaN) per le applicazioni optoelettroniche è continuamente aumentato nell'ultimo decennio. Infatti teoricamente costruendo leghe da tale materiale si riescono ad ottenere dispositivi che emettono luce in tutto lo spettro del visibile e del vicino ultravioletto, cosa che non avviene nel caso degli altri materiali. Inoltre l'emissione luminosa del nitruro di gallio ha grande efficienza. Questo perché tale materiale presenta bandgap diretto, e ha una buona stabilità chimica unita all'elevato coefficiente di conduzione termica. I problemi incontrati nelle prime ricerche sul GaN erano principalmente legati al fatto che non si riusciva a trovare un substrato tale da permetterne la crescita ed al difficile drogaggio di tipo p. Questi problemi sono stati risolti e attualmente il GaN viene cresciuto su substrati di zaffiro o carburo di silicio e il drogaggio di tipo p viene ottenuto mediante l'inserimento di magnesio. Inoltre è possibile realizzare contatti ohmici a bassa resistività sia su n-GaN sia su p-GaN.

2.1.1 Proprietà chimico-fisiche

A livello microscopico il reticolo cristallino del nitruro di gallio e dei suoi composti si presenta in due strutture differenti: la wurzite, forma assunta nella maggior parte dei casi, e la zincoblenda. Il GaN è quindi differente

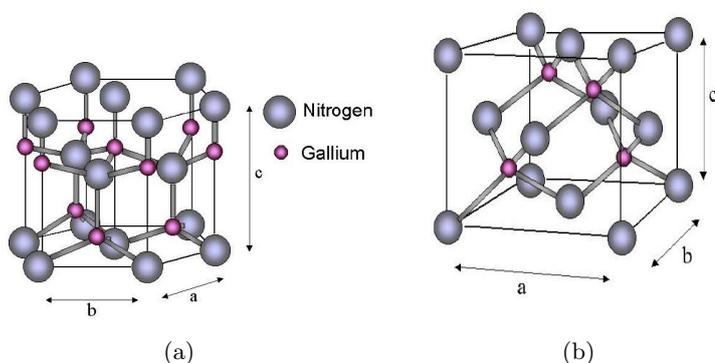


Figura 2.1: Reticolo cristallino con struttura a wurzite (a) e a zincoblenda (b)

sia dagli altri semiconduttori (ad es. silicio o germanio), che tendono a cristallizzare con la struttura tipica del diamante, sia dalle altre leghe III-V (come GaAs o GaP), che assumono prevalentemente la conformazione a zincoblenda.

Sia nella wurzite sia nella zincoblenda il legame tra gli atomi è di tipo tetraedrico, per cui dal punto di vista cristallografico le due strutture hanno proprietà simili, ma, mentre la prima ha struttura a simmetria esagonale, la seconda presenta simmetria cubica. Le celle elementari dei reticoli cristallini si possono caratterizzare mediante tre costanti a , b , c , e tre angoli α, β, γ , che rappresentano rispettivamente le distanze interatomiche e gli angoli tra i legami. La zincoblenda presenta costanti reticolari uguali, $a = b = c$, e $\alpha = \beta = \gamma = 90$ gradi, mentre per la wurzite $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90$ gradi e $\gamma = 120$ gradi. Queste differenze si ripercuotono sulle caratteristiche elettriche del materiale, in quanto l'energia di bandgap E_g aumenta al diminuire delle costanti reticolari.

Il forte legame presente tra gli atomi di GaN limita la formazione di dislocazioni e difetti reticolari, che costituiscono la principale causa di degradazione degli altri semiconduttori dei gruppi III-V e II-VI quando attraversati da alte correnti; ciò rende il nitruro di gallio più stabile.

Per quanto riguarda la realizzazione dei dispositivi optoelettronici, le proprietà più importanti del GaN derivano dalla sua struttura a bande, che presenta bandgap diretto. Tale diagramma è simile a quelli dei semiconduttori a zincoblenda a bandgap diretto (come il GaAs) ma ci sono tuttavia delle importanti differenze. Innanzitutto la degenerazione della banda di valenza in più livelli nel nitruro di gallio risulta più accentuata che nell'arseniuro di gallio, a causa del forte campo elettrico intrinseco dovuto alla struttu-

ra cristallina. La deformazione (strain) del reticolo ad opera di una forza esterna ha però un effetto minore nel deformare la banda di valenza del GaN rispetto a quanto succede in GaAs, questo perchè il GaN a wurzite può essere considerato una struttura con deformazione intrinseca (dovuta al forte campo elettrico reticolare), e quindi meno sensibile a ulteriori forze deformanti. Inoltre per il GaN non vale l'approssimazione della massa efficace che invece vale per l'arseniuro di gallio e per altri semiconduttori del gruppo III-V. I dal momento che le bande di energia sono altamente non paraboliche. Nelle applicazioni optoelettroniche, la transizione di maggior importanza è quella tra lo stato a minor energia della banda di conduzione e quello più alto della banda di valenza del GaN: l'energia associata a tale transizione nel vuoto è pari a 3.504 eV e corrisponde ad una lunghezza d'onda di 355 nm .

2.1.2 Crescita del GaN

Substrati

Un problema che accomuna il GaN con gli altri semiconduttori del gruppo III-V è stato l'assenza di un substrato dello stesso materiale per la crescita della struttura cristallina. Ci si è concentrati allora sull'eteroepitassia, ossia la crescita di nitruro di gallio su un materiale estraneo. Per una tale crescita occorre però che le differenze tra costanti reticolari e coefficienti di espansione termica siano minime, altrimenti si hanno forti stress meccanici intrinseci del reticolo e un'alta densità di dislocazioni. I substrati di gran lunga più utilizzati sono lo zaffiro (Al_2O_3) e il carburo di silicio (SiC). Negli ultimi anni si è riusciti a mettere a punto tecniche che permettono di ottenere spessi strati di GaN da utilizzare come substrato per la crescita di film omoepitassiali, aiutando così a superare gli inconvenienti precedenti.[19]

Zaffiro Anche se il mismatch reticolare tra zaffiro e GaN-wurzite è del 16% e quello termico del 39%, questo materiale è stato il primo e più utilizzato substrato per la crescita di GaN. Questo principalmente per il suo basso costo sul mercato, per la sua simmetria esagonale (come quella del GaN), per la sua facilità nel trattamento di pulizia superficiale prima della crescita e la sua stabilità ad alte temperature necessaria per i processi CVD [20] che vedremo in seguito.

Il problema più grande è che a causa del mismatch termico i forti sbalzi di temperatura durante la fase di crescita provocano la formazione di moltissime dislocazioni e vacanze nel reticolo cristallino dello strato di GaN sovrastante. Per risolvere questo problema si utilizza un sottile strato buffer tra lo zaffiro e il GaN, in grado di rendere più graduale il cambiamento di costanti termiche.

I primi risultati soddisfacenti si sono avuti con Akasaki nel 1986 il quale, introducendo uno strato buffer di AlN tra zaffiro e GaN, è riuscito

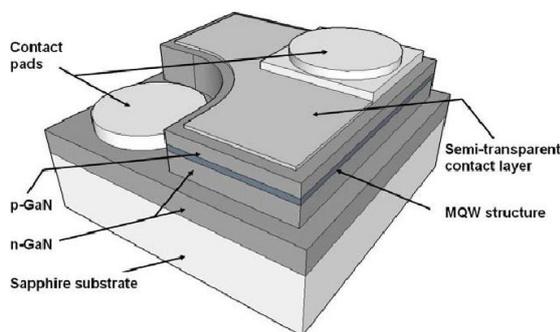


Figura 2.2: Struttura di un led in GaN costruito su di un substrato in zaffiro

ad abbassare di due ordini di grandezza la concentrazione di portatori liberi nel GaN e contemporaneamente incrementare di un fattore 10 la mobilità elettronica.[21] La crescita di GaN direttamente su zaffiro porta alla formazione di isole esagonali, mentre l'utilizzo dello strato buffer rende più veloce la crescita bidimensionale. Nonostante ciò Nakamura riuscì nel 1991 a crescere del GaN di ottima qualità con uno strato buffer in GaN. Uno dei principali svantaggi dello zaffiro è di essere un materiale isolante: questo costringe i costruttori di led a realizzare entrambi i contatti sulla superficie superiore del dispositivo, il che implica una riduzione della superficie di emissione del led.

Carburo di silicio I led costruiti con substrato di carburo di silicio presentano numerosi vantaggi rispetto a quelli cresciuti su zaffiro. Innanzitutto il SiC presenta mismatch reticolare (3,5%) e termico (3,2%) assai minori, con conseguente riduzione della densità di dislocazioni nel GaN sovrastante. Inoltre è un materiale con alta conducibilità sia elettrica sia termica: la prima permette di realizzare led a struttura verticale, che oltre a ridurre le dimensioni del chip rende più facile ed economico il processo di crescita; la seconda rende i dispositivi particolarmente adatti per applicazioni di potenza, dove si rende necessario dissipare elevate quantità di calore. Infine il SiC possiede una naturale tendenza a spaccarsi lungo le facce $[2\bar{1}\bar{1}0]$ e $[0\bar{1}\bar{1}0]$ e può essere facilmente lappato, rendendo possibile la creazione di superficie di alta qualità per applicazioni laser. Il carburo di silicio però ha anche dei difetti: è molto costoso e richiede alte temperature di crescita. Questo lo rende incompatibile con le tecniche MBE che vedremo più avanti.

Silicio Lo svantaggio economico del carburo di silicio può essere limitato usando un substrato di Silicio con uno strato buffer di AlN. Le favorevoli proprietà fisiche, l'alta qualità, e il basso costo del silicio lo rendono un substrato molto attraente per i dispositivi su GaN. I wafer di silicio hanno

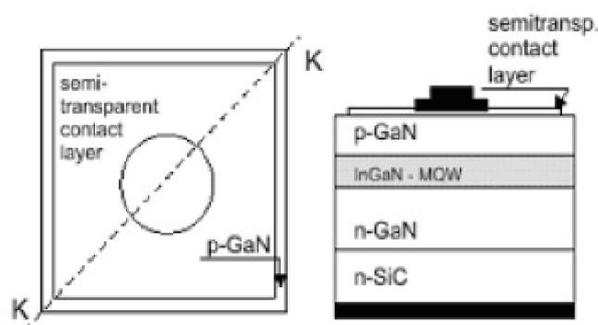


Figura 2.3: Struttura di un led in GaN costruito su di un substrato in carburo di silicio

un prezzo molto ridotto e sono disponibili in grande portata a causa del loro sviluppo e della larga scala di produzione. La perfezione del cristallo di silicio lo rende migliore di qualsiasi altro substrato usato per la costruzione di dispositivi su GaN e le sue superfici possono essere preparate e levigate con estrema finezza. Comunque, la qualità degli strati epitassiali di GaN su silicio è più povera rispetto a quella degli strati su zaffiro o carburo di silicio, a causa della grande costante reticolare e all'espansione termica del coefficiente di mismatch, e della tendenza del silicio a formare uno strato di silicio amorfo quando viene esposto a reazioni con sorgenti di azoto. GaN e AlN cresciuti su silicio sono altamente difettosi, così la ricombinazione non radiativa aumenta causando la riduzione dell'efficienza luminosa dei dispositivi optoelettronici. Per questi motivi il silicio non viene utilizzato come substrato per i led.

Nitrato di gallio Gli sforzi compiuti dai ricercatori nella direzione dell'omoepitassia alla fine degli anni novanta hanno cominciato a dare risultati. Anche se la crescita di cristalli spessi di GaN di dimensioni ragionevoli non è ancora riuscita, sono state proposte ed affinate un certo numero di tecniche che permettono di separare spessi film di GaN ottenuti tramite crescita eteroepitassiale dai rispettivi substrati, e di usarli a loro volta per crescere dispositivi omoepitassiali.

I substrati di partenza e le soluzioni adottate per rimuoverli sono le più varie, ma tutte le tecniche propongono la HVPE per crescere il GaN, in virtù della velocità permessa da quest'ultima. Negli ultimi anni sono state introdotte varie tecniche di separazione: la laser-induced liftoff con l'utilizzo di un laser impulsato entrante dal lato inferiore dello zaffiro, che decompone e separa l'interfaccia tra i due materiali e più tardi la Void Assisted Separation (VAS).

Tecnologie per la crescita

Oggi sono stati messi a punto molti metodi per la crescita di nitruro di gallio ed altri sono attualmente allo studio. Tutte le tecniche odierne permettono di avere una buona qualità dello strato di GaN, e le più usate risultano essere: la Molecular Beam Epitaxy (MBE), la Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD), la Migration Enhanced MOCVD (MEMOCVD), la Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE), la Epitaxial Lateral Overgrowth (ELO).

Molecular Beam Epitaxy Questa tecnica è stata utilizzata intensamente per la crescita di nitruri, composti II-VI e silicio. Nella crescita del nitruro di gallio all'inizio non era possibile utilizzare N_2 come sorgente di azoto a causa della sua elevata energia di legame, quindi veniva usata ammoniacca (NH_3). In seguito si è riusciti ad utilizzare azoto biatomico, dissociandolo precedentemente mediante sorgenti al plasma (PMBE, Plasma assisted MBE). Questo processo può avvenire prima che l'azoto raggiunga il substrato, permettendo così di regolare la temperatura di crescita indipendentemente dalla rottura dei legami della molecola di N_2 . Nella camera di crescita vengono mantenute pressioni inferiori ai 10^{-10} torr; il gallio viene ricavato tramite evaporazione termica, mentre l'azoto viene ottenuto da NH_3 o da N_2 e successivamente introdotto nella camera. Le temperature variano da un minimo di 600 ad un massimo di 800 gradi, facilitando così l'introduzione nel GaN di elementi volatili quali indio e magnesio. Il fatto che le temperature di crescita siano limitate riduce la generazione di difetti reticolari dovuti al mismatch termico tra il substrato e il film di GaN cresciuto su di esso. Però la crescita del GaN risulta piuttosto lenta (50nm/h), a causa delle basse temperature in gioco. Se si cercasse di aumentare la velocità di crescita, si genererebbero una superficie di scarsa qualità, una elevata concentrazione di portatori liberi o addirittura uno strato semi-isolante di GaN, a causa della generazione di livelli profondi compensanti. I vantaggi di questa tecnica sono: reazione molto semplice tra composti elementari, possibilità di monitorare costantemente la struttura superficiale durante la crescita, basso livello di drogaggio indesiderato utilizzando un ambiente di ultravacuo nella camera di crescita, basse temperature di crescita e maggior possibilità di avere un buon controllo di strati ultrasottili.

La crescita eteroepitassiale di GaN direttamente su zaffiro o SiC mediante MBE, comunque, non riesce ad equiparare la qualità ottica ed elettrica ottenuta attraverso un altro processo di crescita, la Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE). Ciononostante, utilizzando un primo strato di buffer accresciuto tramite quest'ultima, si possono avere dei buoni materiali anche attraverso MBE. Utilizzando poi un substrato in GaN la qualità dei film cresciuti con MBE [24] supera quella dei film ottenuti con MOVPE. Attualmente la MBE viene utilizzata per crescere più facilmente strati di

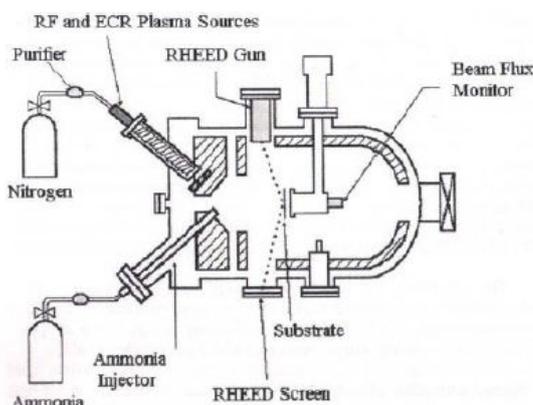


Figura 2.4: Schema di un reattore MBE per la crescita del nitruro di gallio

InGaN e strati di GaN drogato con magnesio, perchè, grazie alle limitate temperature in gioco, non sono necessari trattamenti di annealing post-crescita per riattivare gli accettori. Il fatto di poter utilizzare direttamente azoto anzichè ammoniaca, inoltre, evita di portare a contatto il magnesio, che funge da drogante, con l'idrogeno, che ne provocherebbe la passivazione.

Metal-Organic Chemical Vapor Deposition La MOCVD nasce nel 1990 e si fonda sulla reazione in fase di vapore tra alcali del III gruppo e idruri del V gruppo in zone ad alta temperatura; i prodotti della reazione si depositano sul substrato facendo crescere il film gradualmente, permettendo di mantenere le caratteristiche reticolari delle zone sottostanti. Per la produzione di nitruro di gallio vengono fatti combinare trimetilgallio e ammoniaca, usando azoto e idrogeno come carrier gas. Per la crescita di nitruro di alluminio e di indio sono utilizzati rispettivamente trimetilalluminio e trimetilindio. Normalmente, per crescere GaN tramite MOCVD, il substrato è posto su un supporto di grafite rotante ed inizialmente viene scaldato a 1150 gradi. La temperatura è poi fatta scendere fino a 450 gradi per la crescita di uno strato buffer a bassa temperatura, cui segue la crescita del GaN, che avviene a circa 1075 gradi.

La qualità della cristallizzazione del substrato dipende dalle condizioni in cui avviene, ma generalmente questa tecnica permette sia una crescita rapida sia una densità superficiale di dislocazioni accettabile ($10^8 - 10^9 cm^{-2}$). Tramite il procedimento MOCVD si riescono a realizzare con notevole precisione i diversi strati composti dalle varie leghe del GaN; tuttavia l'InGaN, a causa dei fenomeni di segregazione dell'Indio, presenta una composizione disomogenea anche per film sottili. Un difetto di questa tecnica è la presenza massiccia di idrogeno nella camera di reazione, che, come si vedrà più avanti, tende a legarsi con gli atomi accettori di magnesio, passivando il drogante.

Migration Enhanced Metal-Organic Chemical Vapor Deposition

La MEMOCVD è una tecnica epitassiale per la crescita di film epitassiali AlN/GaN/InN ed eterostrutture usata per ottenere un accurato controllo dello spessore delle aree sopra il substrato. Questa tecnica copre il divario tra la MBE e la MOCVD. Consente inoltre minori temperature rispetto MOCVD. Trimetilgallio, trimetilalluminio, trimetilindio e ammoniaca sono usati come reagenti per Ga, Al, In e N, rispettivamente. La MEMOCVD è una versione moderna della Pulsed Atomic Layer Epitaxy (PALE), che deposita strati quaternari $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ grazie alla ripetizione di celle cresciute con impulsi di reagenti quali Al, Ga, In e NH_3 . Mentre in PALE la durata di ogni impulso nella cella è fissata, la durata e la forma degli impulsi in MEMOCVD è ottimizzata, e gli impulsi possono sovrapporsi. MEMOCVD combina equamente un alto tasso di crescita per gli strati buffer con una riduzione della temperatura di crescita (meno di 150 gradi) e un aumento della qualità della zona attiva.

Hydride Vapor Phase Epitaxy Questa tecnica, una delle prime ad essere usata per la crescita di GaN, prevede di usare ammoniaca come sorgente di azoto, mentre il gallio deriva dalla reazione di Ga metallico e acido cloridrico (HCl) gassoso a circa 850 gradi, dalla quale si ottiene ($GaCl$). La reazione avviene tipicamente in ambiente N_2 oppure H_2 :



Sebbene la velocità di crescita sia relativamente alta ($30 - 130 \mu m/h$) gli strati ottenuti non hanno grande qualità reticolare; a causa di ciò questa tecnica è stata abbandonata negli anni 80. Recentemente, però, è stata adottata per ottenere strati spessi di GaN da usare come substrato, crescendo il film su zaffiro che poi viene rimosso. Il GaN così prodotto viene utilizzato come base per una crescita omoepitassiale, ottenendo così negli strati superiori una bassissima densità di difetti e dislocazioni.

Epitaxial Lateral Overgrowth La ELO è una tecnica basata sulla crescita del GaN su un substrato di GaN generalmente ottenuto con HVPE su un iniziale substrato di zaffiro. Lo zaffiro viene poi rimosso per mezzo di laser-induced lift off (LLO), o attraverso una delaminazione termica dovuta allo strain termico dell'interfaccia.

La crescita parte da un seme di GaN e procede lateralmente generando una struttura chiamata "ala". Parecchi semi di GaN sono presenti per cui due ali possono partire da due semi vicini e unirsi. Uno spesso strato di GaN viene cresciuto sul piano c di un substrato in zaffiro, dopo che l'ossido di silicio è stato depositato formando delle maschere a strisce nella direzione del GaN. La finestra di GaN viene rimossa attraverso RIE (Reactive Ion Etching) e la maschera di SiO_2 viene anch'essa successivamente tolta. Il

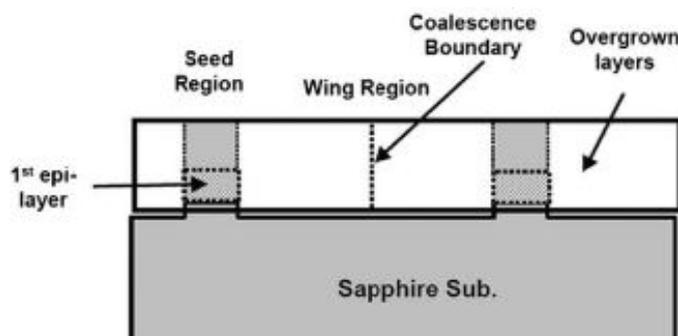


Figura 2.5: Schema di una sezione di GaN ELO

GaN viene allora ricresciuto lateralmente usando le strisce rettangolari come seme.

2.1.3 Drogaggio del nitruro di gallio

Un problema nell'usare nitruro di gallio per realizzare dispositivi optoelettronici è quello di ottenere film di buona qualità, con drogaggio di tipo sia n sia p.

n-GaN

Il nitruro di gallio cresce con un drogaggio non intenzionale di tipo n, che si viene a generare con tutte le tecniche di crescita, sebbene in modo dipendente dal tipo di processo, dal substrato, dallo strato buffer e dai trattamenti post-crescita. L'origine di tale drogaggio intrinseco è da ricercarsi secondo alcuni nei difetti del reticolo cristallino, come vacanze di azoto, mentre altri lo attribuiscono all'intrappolamento nel cristallo di impurità di ossigeno, anche se le concentrazioni riscontrate non sembrano poter giustificare un effetto così marcato. Utilizzando TF-MOCVD si riescono attualmente a ottenere strati di GaN a bassissimo drogaggio non intenzionale. È quindi possibile un controllo fine del drogaggio n, che si ottiene mediante l'impiantazione di atomi di germanio o silicio che agiscono da donatori poco profondi. Il drogante viene immesso nella camera di reazione in forma gassosa (GeH_4 o SiH_4 , rispettivamente per germanio o silicio), e viene fatto reagire con il trimetilgallio e l'ammoniaca. Attualmente si possono raggiungere concentrazioni di portatori liberi tra i 10^{17} e 10^{20} cm^{-3} , si è osservato inoltre che in entrambi i casi c'è una buona correlazione lineare tra il flow rate del gas e la concentrazione di portatori, ma utilizzando il silicio è possibile ottenere concentrazioni un ordine di grandezza superiore rispetto all'impiego

di germanio. Avendo quindi efficienza di drogaggio più alta, è il silicio il drogante che negli ultimi anni si è utilizzato maggiormente.

p-GaN

Il grande problema che ha bloccato per anni lo sviluppo di dispositivi optoelettronici al nitruro di gallio è stato l'ottenimento di strati di GaN drogati p. Infatti i primi tentativi effettuati utilizzando litio (Li), sodio (Na), potassio (K) berillio (Be), zinco (Zn) e calcio (Ca), ottenevano come effetto la compensazione del drogaggio intrinseco n del GaN, abbassando però notevolmente il valore della mobilità e rendendo così il materiale praticamente inutilizzabile. I primi risultati positivi furono ottenuti nel 1989: il p-GaN veniva ottenuto con la MOCVD, usando come drogante il magnesio (Mg), e sottoponendo dopo la crescita lo strato a un trattamento LEEBI (Low Energy Electron Beam Irradiation). La concentrazione di lacune ottenuta in questo modo era pari a 10^{17} cm^{-3} , mentre i più bassi valori di resistività erano di circa $12 \Omega \text{ cm}$. L'effetto della LEEBI fu inizialmente interpretato nel seguente modo: gli elettroni, trasferendo la loro energia al reticolo cristallino, riuscivano a spostare gli atomi di magnesio, che inizialmente occupavano posizioni interstiziali, nelle posizioni del gallio nel reticolo, risultando così attivati. Nel 1992, invece, Nakamura riuscì ad ottenere p-GaN efficiente tramite annealing termico, che avveniva a 700 gradi in ambiente N_2 , successivo alla crescita. Il processo era reversibile: se si sottoponeva il campione di tipo p a bassa resistenza ad un ulteriore annealing termico in ambiente NH_3 , la resistività tornava agli alti livelli iniziali, $10^6 \Omega \text{ cm}$. Si avanzò allora l'ipotesi che il drogaggio fosse ostacolato da atomi di idrogeno che si legavano al magnesio passivandolo, privandolo cioè della capacità di accettare elettroni. Infatti se l'idrogeno biatomico H_2 è chimicamente inattivo, lo stesso non si può dire per gli ioni H^+ e H^- , che formano complessi Mg-H a temperature basse (25-250 gradi), rendendo inattivo il magnesio ed abbassando il picco di emissione. Da quanto detto finora risulta che si può ottenere p-GaN a bassa resistività sia con LEEBI sia con annealing termico. Si deve notare, però, che utilizzando LEEBI si riescono a migliorare le proprietà elettriche del GaN solo entro lo spessore di penetrazione del fascio elettronico nel cristallo (circa $0.2 \mu\text{m}$). Gli elettroni energetici dapprima inducono una dissociazione del complesso Mg-H seguendo una reazione del tipo $MgH + MgH \rightarrow Mg + MgH_2$, poi inducono anche la dissociazione del MgH_2 , portando ad un bilanciamento della reazione con la frazione residua di MgH che va asintoticamente a 0.5; quindi la LEEBI lascia l'idrogeno all'interno dello strato. Utilizzando invece un annealing termico si riescono a ottenere strati di p-GaN a bassa resistività più spessi (anche $4 \mu\text{m}$) e con caratteristiche elettriche più uniformi. Inoltre l'annealing ad elevate temperature riesce a portare l'idrogeno al di fuori del semiconduttore.

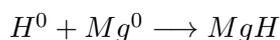
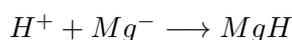
Da queste considerazioni si può capire quanto l'annealing termico sia più

conveniente, rapido ed efficace di LEEBI nella realizzazione di strati di p-GaN. Ma, a causa dell'alta stabilità del complesso Mg-H, bisogna riscaldare il materiale a temperature che possono essere dannose o addirittura distruttive per il materiale stesso. Una minore temperatura può essere ottenuta effettuando l'annealing in ambiente di ossigeno biatomico O_2 anziché N_2 , perchè così l'idrogeno che fuoriesce dal materiale si lega all'ossigeno formando acqua, che viene allontanata impedendo all'idrogeno di interagire con il materiale. Questo processo può avvenire attorno a temperature di 500 gradi; si pone però in questo caso il problema dell'interazione dell'ossigeno con il substrato. L'ipotesi secondo cui l'alta resistività dei film di p-GaN è dovuta alla passivazione del magnesio da parte dell'idrogeno è consistente anche con considerazioni riguardanti i processi: la passivazione è molto meno marcata nel GaN cresciuto tramite tecnica MBE rispetto al GaN ottenuto con la classica tecnica MOCVD. Infatti la MBE non richiede la presenza di idrogeno nell'ambiente di crescita (può infatti utilizzare N_2 come sorgente di N), mentre la MOCVD avviene in ambiente NH_3 , che oltre a fornire l'azoto produce dissociandosi anche idrogeno che si diffonde nel materiale.

Effetti dell'idrogeno

L'utilizzo di H_2 come gas di flusso nella reazione MOCVD rende l'idrogeno l'impurità maggiormente presente negli strati di GaN. H_2 è di per sé inattiva, ma la gli ioni H^+ e H^- sono molto reattivi con gli atomi di magnesio. L'effetto principale dell'idrogeno è la passivazione del Mg accettore nel p-GaN attraverso la formazione di coppie neutre Mg-H anche a bassa temperature, riducendo la percentuale di magnesio nel GaN e aumentando la resistività. Un processo di annealing in ambiente N_2 a temperatura superiore a 700 gradi può rimuovere l'idrogeno dalla coppie neutre accettore -H, e la resistività del p-GaN diventa minore a seguito di tale trattamento. Durante il funzionamento del dispositivo finale, l'idrogeno colpisce le proprietà del semiconduttore di tipo p. La questione è che il comportamento dei droganti risulta fortemente influenzato dalla presenza dell'idrogeno che contamina il materiale semiconduttore. L'idrogeno può esistere all'interno del semiconduttore in differenti stati di carica quali H^+ , H^0 e H^- e può reagire col nitrato di gallio in diverse maniere. La situazione più critica riguarda la reazione con il magnesio accettore che porta alla formazione delle coppie neutre, e quindi alla passivazione del drogante.

La reazione chimica che coinvolge l'idrogeno e Mg-GaN può essere considerata come una delle seguenti:



Il magnesio che droga lo strato di tipo p del GaN dopo la crescita ha una resistività elevata a causa della totale passivazione degli accettori dall'idrogeno; per sviluppare materiali a bassa resistività l'idrogeno viene usualmente rimosso attraverso un annealing ad elevate temperature. Altri trattamenti che attivano il magnesio a basse temperature ma non rimuovono l'idrogeno dal materiale sono LEEBI e iniezione di portatori minoritari. L'idrogeno che non viene rimosso dai materiali usando l'irradiazione con raggio di elettroni o l'iniezione di portatori minoritari, forma nel reticolo molecole di H_2 e che un annealing a temperature superiori ai 400 gradi permette di completare la passivazione del drogante attraverso reazioni chimiche. Nel caso del p-GaN, la concentrazione di idrogeno è la stessa del magnesio attivo dopo la crescita. Un annealing post-crescita in ambiente N_2 a 700 gradi per 20 minuti riduce la concentrazione di idrogeno di un fattore 2 o 3, che è abbastanza per avere una rilevante conduttività degli strati di tipo p.

2.1.4 Leghe con Indio e Alluminio

Nella costruzione di eterostrutture per dispositivi optoelettronici è necessario introdurre materiali con bandgap molto diversi che permettano un'alta efficienza luminosa. Sfruttando le proprietà delle leghe di GaN con alluminio ed indio è possibile produrre led che emettono in uno spettro molto ampio, che si estende dall'infrarosso al lontano ultravioletto.

Nitruro di Indio

Il nitruro di Indio ha un energy gap molto ridotto, pari a 0.7-0.8 eV. Ciò lo rende molto utile per la realizzazione di strutture a buca quantica per led: infatti l'aggiunta di una percentuale di indio al nitruro di gallio permette di ottenere la lega $In_{1-x}Ga_xN$, dove $(1-x)$ e x rappresentano le proporzioni complementari di indio e gallio all'interno del composto. Al variare di x da 0 a 1 si ottengono composti con bandgap che varia con continuità da 0.8 eV, per $x = 0$, a 3.44 eV, per $x = 1$ e quindi emissioni di luce in tutte le lunghezze d'onda comprese tra il rosso e il vicino ultravioletto; attualmente, comunque, non sono ancora stati cresciuti campioni di InGaN con frazioni di indio maggiori di 0.4. La difficoltà principale della sua crescita sta nel fatto che il InN si dissocia a temperature piuttosto basse (600 gradi); inoltre, sebbene i cristalli di nitruro di indio abbiano struttura a wurzite, il mismatch reticolare rispetto al GaN di circa l'11% rende difficile la creazione di InGaN di buona qualità. Solitamente il nitruro di indio cresce con un drogaggio non intenzionale di tipo n, ma diversamente dal nitruro di gallio, esso può essere facilmente convertito in un semiconduttore di tipo p mediante drogaggio con magnesio; l'operazione è resa più semplice al crescere della frazione molare di In, che abbassa l'energia di attivazione del Mg. Il layer in InGaN, comunque,

presenta una quantità di difetti, sia all'interfaccia che all'interno del cristallo, crescente con la frazione di indio, ma a differenza di quanto avviene nel nitruro di gallio, l'elevata quantità di imperfezioni non ha effetti deleteri sulla potenza ottica in uscita.

Nitruro di alluminio

Il nitruro di alluminio presenta un'energia di bandgap pari a 6.2eV, che lo rende praticamente un isolante se depositato in strati troppo spessi. Nonostante ciò, se la frazione di Al è piccola, esso serve per formare la lega AlGaN, che grazie al bandgap maggiore rispetto a quello del GaN genera una barriera per il confinamento dei portatori di carica, e viene quindi utilizzata per creare strutture a buca quantica. Il basso mismatch reticolare di AlN rispetto al GaN (2.4%) e l'elevata temperatura di fusione (200 gradi), inoltre, rendono il reticolo cristallino di eterostrutture GaN/AlGaN di buona qualità. Gli strati di AlGaN sono caratterizzati da grande durezza, elevata conducibilità termica e da un'ottima resistenza agli attacchi chimici. Nell'incorporare alluminio nel GaN bisogna prendere delle precauzioni per via della sua alta reattività: servono infatti reagenti puri in ambiente privo di ossigeno, dato che quest'ultimo è responsabile di variazioni di bandgap durante la crescita.

2.1.5 Contatti ohmici

Per la costruzione di led di lunga durata è indispensabile disporre di contatti a bassa resistività, in quanto alte resistività porterebbero al riscaldamento del metallo e quindi alla sua migrazione verso la giunzione, cortocircuitando il dispositivo. Inoltre il contatto deve essere trasparente o semitrasparente, per consentire alla radiazione prodotta di uscire dal dispositivo. Ottenere buoni contatti ohmici su semiconduttori a bandgap largo come il GaN non è semplice: questo ha portato a ricercare sia contatti ohmici in cui il principale meccanismo di conduzione avviene per tunneling e sia contatti Schottky.

Contatti ohmici su n-GaN

Attualmente si è riusciti ad ottenere per i contatti su n-GaN resistività molto basse, dell'ordine di $10^{-7}\Omega cm^2$. Il processo costruttivo inizia con l'impiantazione di silicio nel GaN seguita da un annealing, in modo da creare uno strato di n-GaN fortemente drogato per favorire il tunneling. Poi si pratica un etching di Cl_2 sulla superficie, eliminando così lo strato di ossidazione nativa e migliorando l'interfaccia del semiconduttore con il metallo. A questo punto può avvenire la vera e propria deposizione del contatto (seguita da un rapido annealing), che generalmente è costituito da strati successivi di titanio, alluminio, nichel e oro. La formazione di prodotti di reazione come TiAl e AuNi danno al contatto una certa robustezza, e alte

temperature non ne alterano le caratteristiche. Il meccanismo di trasporto è il tunneling: infatti il n-GaN raggiunge alte concentrazioni in quanto l'azoto migra verso il titanio lasciando vacanze nel GaN.

Contatti ohmici su p-GaN

A differenza dei precedenti, i contatti su p-GaN non hanno mai avuto resistività basse: si spazia nell'intervallo $10^{-2} - 10^{-4} \Omega cm^2$. I fattori che limitano la conducibilità sono: l'alto bandgap del GaN (3.44 eV) e la sua affinità elettronica ($\chi = 4.1 eV$), che richiedono metalli con funzioni di lavoro (Φ_M) alte per avere barriere contenute Φ_B pari a $\Phi_M - (E_G + \chi)$, mentre in genere $\Phi_M < 5 eV$; la bassa concentrazione di lacune nel p-GaN dovuta alla profondità del livello accettore introdotto dal magnesio; la tendenza a perdere azoto da parte del GaN durante il processo, che trasforma la superficie in tipo n. Come per i contatti su n-GaN, un trattamento della superficie per eliminare gli ossidi aumenta la densità superficiale di portatori. I metalli maggiormente utilizzati sono multilivelli di nichel/oro, platino e tungsteno, quest'ultimo con un'ottima stabilità termica. Tutti questi metalli richiedono un annealing termico dopo la deposizione; esso è sempre una fase molto delicata dell'intero processo, in quanto eccedendo in temperatura o tempo di esposizione si possono compromettere definitivamente i dispositivi.

2.2 Package

I led sono montati in un pacchetto che prevede due contatti elettrici, una lente trasparente per l'estrazione della luce e nei led di potenza un percorso termico per la dissipazione del calore. Il materiale del incapsulante del chip possiede un'alta trasparenza ottica, un alto indice di rifrazione, inerzia chimica, stabilità alle alte temperature, ed ermeticità. Il contrasto tra l'indice di rifrazione dei semiconduttori e l'aria viene ridotta grazie all'incapsulamento aumentando così l'efficienza di estrazione della luce.

2.2.1 Incapsulamento

Gli incapsulanti devono avere diversi requisiti quali la trasparenza, l'alto indice di rifrazione, la stabilità chimica e alle alte temperature, e l'ermeticità.

Resina epossidica

Un incapsulante comune è la resina epossidica che rimane trasparente e non mostra degrado nel tempo per led che emettono alle lunghezze d'onda grandi dello spettro visibile e nei led a infrarossi mentre perde in trasparenza nei led che emettono a lunghezze d'onda più piccole. Tipiche resine

epossidiche per l'incapsulamento sono sistemi liquidi in due parti composti da bisfenolo-A a epossido base o cicloalifatico e anidride termicamente trattabili. La formazione della resina epossidica richiede una cura breve ad alta temperatura (120 gradi). Le due parti del sistema deve essere in proporzioni stechiometriche. Composizioni ricche di resina portano a una riduzione della temperature di transizione del vetro, mentre le composizioni ricche indurente può portare alla decolorazione di incapsulamento. L'indice di rifrazione della resina epossidica è vicino a 1.6. Oltre ad essere trasparente, la resina epossidica è nota per le sue buone proprietà meccaniche e la buona stabilità termica. Tuttavia, l'esposizione prolungata della resina epossidica a temperature superiori a 120 gradi porta alla decolorazione e alla perdita di trasparenza.

Silicone

Per superare la limitata stabilità termica delle resine epossidiche, incapsulanti in silicone sono stati utilizzati dai primi anni 2000. Il silicone è termicamente stabile fino a temperature di circa 190 gradi, significativamente più alte delle resine. Inoltre l'incapsulante di silicone è flessibile riducendo così lo stress meccanico sul chip a semiconduttore. Il silicone contiene Si e O così somiglianti SiO_2 più che le resine epossidiche. Questo somiglianza suggerisce che gli incapsulamenti in silicone sono chimicamente e termicamente stabili e non perdono la trasparenza facilmente come le resine epossidiche.

Polimetilmetacrilato

Il polimetilmetacrilato è un incapsulante meno comune utilizzato per i led. Esso è anche conosciuto sotto il nome di vetro acrilico e sotto il nome di produzione di plexiglas. L'indice di rifrazione relativamente basso si traduce in una limitata efficienza di estrazione quando viene utilizzato con semiconduttori alto indice di rifrazione.

2.3 Fosfori

La luce generata da un led e utilizzata parzialmente o completamente per eccitare otticamente uno o più fosfori, è un metodo valido e comune per generare luce bianca per applicazioni di illuminazione generale. Ci sono diverse approcci per generare luce bianca sulla base di fosfori eccitati. Essi possono essere classificati in approccio bicromatico, tricromatico, e tetracromatico. Questi approcci utilizzano led con emissione ultravioletta o led con emissione nello spettro visibile (per lo più led blu).

2.3.1 Efficienza di conversione

In generale, l'efficienza di una sorgente luminosa diminuisce con l'aumento della multi-cromaticità della fonte. Pertanto, le sorgenti dicromatiche hanno la più alta efficacia della radiazione luminosa e anche la più alta efficienza. D'altra parte, la capacità di resa cromatica è più bassa per le fonti bicromatiche e aumenta con la multicromaticità della fonte. L'indice di resa cromatica può raggiungere valori molto vicino al CRI = 100 per le fonti tetracromatiche. L'efficienza di conversione della luce da piccole lunghezza d'onda a lunghezza d'onda maggiori attraverso un materiale convertitore (λ convertitore) è determinata da due fattori distinti: l'efficienza quantica esterna del convertitore e le perdite intrinseche di energia meccanica quantistica sostenute per la conversione della lunghezza d'onda. L'efficienza esterna è data dal rapporto tra il numero di fotoni emessi nello spazio libero dal convertitore al secondo e il numero di fotoni assorbiti dal convertitore al secondo. L'efficienza esterna deriva da: $\eta_{ext} = \eta_{int}\eta_{extraction}$. Si noti che il l'efficienza quantica interna dipende dall'efficienza intrinseca del materiale mentre l'efficienza di estrazione dipende dalla distribuzione spaziale del materiale convertitore. In generale film sottili hanno un'alta efficienza di estrazione mentre le aggregazioni grumose di materiali convertitori hanno una minore efficienza di estrazione a causa di riassorbimento. Quindi è opportuno utilizzare materiali λ convertitori sotto forma di strati sottili. La perdita intrinseca di conversione di lunghezza d'onda si ha quando un fotone con lunghezza d'onda λ_1 viene convertito in un fotone con lunghezza d'onda λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$) ed è data da:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} \quad (2.1)$$

L'efficienza di conversione è data da:

$$\eta_{(\lambda-conversion)} = \frac{h\nu_2}{h\nu_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (2.2)$$

dove λ_1 è la lunghezza d'onda del fotone assorbito dal fosforo e λ_2 è la lunghezza d'onda dei fotoni emessi dal fosforo. L'efficienza di conversione di potenza di un convertitore di lunghezza d'onda è data da:

$$\eta_{(\lambda-convertitore)} = \eta_{(\lambda-conversion)}\eta_{ext} \quad (2.3)$$

2.3.2 Tipi di fosfori

La prima generazione di led bianchi da aziende come Nichia si basava su fosfori $YAG : Ce$ per convertire una parte dell' emissione da un led GaInN a 465nm in un' emissione arancio-gialle centrato a 550 nm, la combinazione di blu e giallo simula luce bianca. Le ultime versioni di questo schema sono: $Sr_3SiO_5 : Eu_{2+}$ che emette a 570 nm, ed è più efficiente di $YAG : Ce$, e un fosforo ceramico $CaSiAlON : Eu$ che offre maggiore stabilità termica. Una miglior resa cromatica si ottiene utilizzando più fosfori e un migliore equilibrio tra le varie emissioni.

2.4 Meccanismi di degrado

2.4.1 Degrado di package e fosfori

Anche se molti studi hanno riguardato il degrado dei led in GaN, pochi studi hanno analizzato il degrado del package dei led bianchi . Secondo i pochi che hanno studiato questi dispositivi il principale motivo per il rapido degrado dell' emissione di luce è l' ingiallimento della resina epossidica incapsulante. Il calore eccessivo a livello della giunzione pn è indicato come la causa principale dell' ingiallimento. La temperatura ambiente e il riscaldamento ohmico al band gap si sommano creando il calore a livello della giunzione. I materiali polimerici e le resine epossidiche diventano gialli nel corso del tempo anche a causa della fotodegradazione. Questo argomento è stato ampiamente studiato da molti chimici. Anche se la radiazione ultravioletta(UV) con lunghezza d' onda minore di 300 nm ha l' effetto più forte sull' ingiallimento dei materiali polimerici in fotodegradazione, è stato dimostrato che anche la luce visibile nella gamma di 400-500 nm induce fotodegradazione. La quantità di fotodegradazione dipende dalla quantità di radiazione e dal tempo di esposizione. Pertanto, anche la luce visibile in quantità sufficiente può causare il degrado dei polimeri e dei materiali epossidici. Un' altra osservazione fatta da studi precedenti è che il fosforo convertitore nei led bianchi degrada più velocemente che nei led blu. Se il calore e la quantità di radiazioni a piccola lunghezza d' onda fossero le uniche ragioni per l' ingiallimento della resina epossidica, i led blu dovrebbero degradare più rapidamente dei led bianchi perché la quantità totale di radiazioni a piccole lunghezze d' onda sarebbe molto più alto nei led blu alla stessa unità corrente. La principale differenza tra un led blu e un led bianco è la presenza in quest' ultimo del fosforo che viene miscelato con la resina epossidica. La presenza di fosfori potrebbe essere un motivo per l' eccesso degradazione. Se i fosfori $YAG : Ce$ sono stati degradati, allora l' energia emessa dal fosforo dovrebbe diminuire rispetto alle emissioni a piccola lunghezza d' onda. Questo a sua volta porterebbe ad una spostamento verso il blu della cromaticità in funzione del tempo. Tuttavia, la letteratura mostra che per led bianchi, la cromaticità della luce

bianca in funzione del tempo si sposta verso il giallo piuttosto che l'azzurro. Inoltre, i fosfori $YAG : Ce$ sono considerati molto stabili e non si degradano facilmente. Pertanto, il degrado dei fosfori è uno scenario poco probabile. Una possibile spiegazione per la degradazione supplementari di led bianchi è che le particelle di fosforo miste alla resina epossidica emettono luce isotropicamente e anche la dispersione della luce a piccole lunghezze d'onda. Pertanto, in ogni momento solo una frazione della luce viaggerà verso l'esterno dal livello di fosforo, mentre il resto viene reindirizzato verso lo strato di fosforo, o la coppa riflettente. Dato che l'energia radiativa viaggia più spesso attraverso la regione della resina epossidica dei led bianchi rispetto ai led blu, la resina epossidica dovrebbe ingiallirsi di più. Sulla base di studi si può dire che il degrado di led bianchi causati dalla ingiallimento della resina epossidica dipende da tre fattori: il calore alla giunzione pn, la quantità di radiazioni a piccole lunghezze d'onda, e la posizione dello strato di fosforo.

2.4.2 Formazione di centri di ricombinazione non radiativa

Nella formazione di tali centri è vitale distinguere se la causa è dovuta al passaggio di corrente nel led o al riscaldamento dello stesso. Negli esperimenti trovati in letteratura gli stress in corrente sono generalmente condotti a correnti superiori rispetto alla nominale e quindi gli effetti del riscaldamento coprono gli effetti del passaggio di portatori nel chip. Il riscaldamento in genere porta alla formazione di centri di ricombinazione non radiativa a causa dell'inserimento di impurità, che possono essere attive come l'idrogeno, responsabile della passivazione del magnesio. L'idea generale del degrado dovuto al passaggio di corrente è che i portatori energetici tendano a rompere legami (soprattutto quelli dell'indio, meno energetici) e a propagare i difetti nativi del cristallo.

2.4.3 Migrazione delle piste metalliche

La corrente iniettata in un led può portare al degrado dei contatti metallici. Questo degrado si manifesta con la formazione di vacanze e la migrazione di atomi di metallo nella zona p o nella zona attiva. Oltre a formare centri di ricombinazione non radiativa, nel caso peggiore questi atomi riescono a cortocircuitare la giunzione formando un cammino a bassa resistività. La zona attiva dei dispositivi può essere degradata dalla migrazione dei contatti metallici tra i difetti: in grado di rendere impossibile il comportamento corretto della giunzione. Inoltre possono creare variazioni di conducibilità locale, che possono causare la concentrazione della corrente in alcune regioni.

2.4.4 Passivazione del Magnesio

Le impurità di idrogeno con atomi di Mg formano $Mg - H$ complessi che passiva il drogante. Questo meccanismo è stato studiato da diversi autori

negli ultimi anni[32] [33]. La fonte principale di idrogeno sono al tempo stesso le tecniche di crescita e la passivazione dello strato che copre il dispositivo. Alcuni studi hanno dimostrato che il $Mg - H$ complesso può essere rotto dal flusso di portatori aiutato dal riscaldamento del dispositivo e il magnesio è così riattivato. Questo è valido solo per i dispositivi che non hanno intrappolato gli atomi H in strato di passivazione. Strato di passivazione agisce come una sorgente continua di idrogeno. Una fonte importante di idrogeno responsabile della degradazione dispositivi è rappresentato dallo strato di passivazione $PECVD - SiN$, in genere depositati sui dispositivi per la riduzione della superficie di perdita e per l'incapsulamento. L'utilizzo di questo tipo di passivazione ricca di H può limitare fortemente la stabilità dei led ad alta temperatura.

2.4.5 Current Crowding

La resistenza non trascurabile e non uniforme dei contatti n e p e lo strato di confinamento in AlGaIn nella zona p portano alla formazione di camini preferenziali per la corrente, come si vede nella seguente figura.

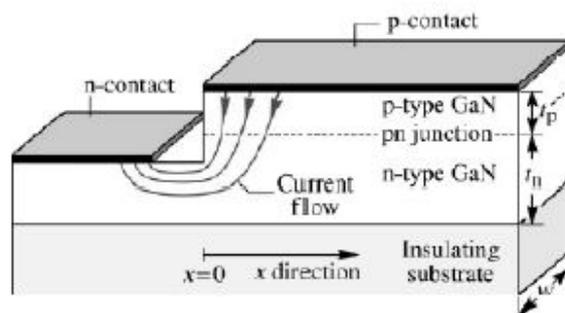


Figura 2.6: Current Crowding in un led in GaN su un substrato di zaffiro

Questo porta ad un'illuminazione e ad un degrado non uniforme. Questo problema è legato alla geometria del led. Infatti sono quelli con substrato in zaffiro ad esserne maggiormente affetti. In questi la corrente è maggiore nella vicinanza dei due contatti, ed è stato stimato un andamento esponenziale rispetto alla distanza dal bordo del contatto p. I led in SiC hanno minor effetto crowding, ma comunque presentano un'addensamento della corrente nella zona centrale. Per ovviare a ciò si utilizzano degli strati semitrasparenti sotto il contatto p che però degradano facilmente e alterano le caratteristiche ottiche del led. A questo si è ovviato costruendo contatti dalle geometrie ottimizzate al fine di distribuire la corrente su tutto il chip.

CAPITOLO

3

DISPOSITIVI E TECNICHE DI CARATTERIZZAZIONE

3.1 Led analizzati

In questo lavoro di tesi sono stati caratterizzati e si è studiata l'affidabilità di diversi tipi di led per applicazioni di backlighting e sono state confrontate le loro prestazioni dal punto di vista del flusso luminoso, dell'efficienza, della temperatura di colore (CCT), delle caratteristiche corrente-tensione e degli spettri. Queste misure sono importanti perchè da esse si può valutare la stabilità del punto di bianco del display e la resa dei colori oltre all'affidabilità. In applicazioni di backlighting infatti la qualità della luce emessa e quindi le misure colorimetriche sono fondamentali. Inoltre sono stati caratterizzati e confrontati diversi tipi di led bianchi di potenza.

3.1.1 Cree ML-E

I led Cree ML-E sono led bianchi da 0.5 W e 150 mA di corrente di driver tipica con le seguenti caratteristiche:

- flusso luminoso tipico: da 35.2 a 51.7 lm (a 150 mA)
- CCT da 2600 a 8300 K
- tensione diretta tipica: 3.2 V (150 mA)



Figura 3.1: Cree ML-E

- corrente massima: 500 mA
- temperatura di giunzione massima: 150 °C
- FWHM: 120 gradi
- resistenza termica: 8 °C/W
- percorso termico elettricamente neutro

3.1.2 ProLight TLWE



Figura 3.2: ProLight TLWE

I led ProLight TLWE sono led bianchi 0.3 W e 100 mA di corrente tipica di driver con le seguenti caratteristiche:

- flusso luminoso tipico: da 23.5 a 26.5 lm (a 100 mA)
- CCT: da 8300 a 10600 K
- tensione diretta tipica: 3.1 V (100 mA)
- corrente massima: 150 mA
- temperatura di giunzione massima: 120 °C
- resistenza termica: 8 °C/W

- FWHM: 140 gradi

Sono anche stati caratterizzati led ProLight TLWE senza lente per confrontarli con quelli con lente.

3.1.3 ProLight 3LWE

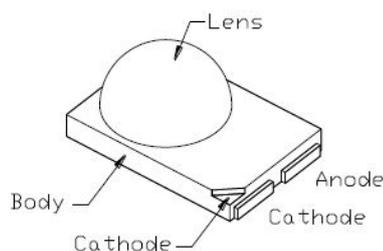


Figura 3.3

I led ProLight 3LWE sono led bianchi di potenza da 3 W e 350 mA di corrente tipica di driver con queste caratteristiche:

- flusso luminoso tipico: 92 lm (a 350 mA) e 153 lm (a 700 mA)
- CCT: da 2700 a 10000 K
- tensione diretta tipica: 3.5 V (a 350 mA)
- corrente massima: 700 mA
- temperatura di giunzione massima: 120 °C
- resistenza termica: 8 °C/W
- FWHM: 140 gradi

Questo tipo di led è stato caratterizzato in 2 versioni: una con chip Epistar a basso costo e una con chip Cree.

3.1.4 Cree XP-E

I led Cree XP-E sono led bianchi di potenza per l'illuminazione con le seguenti caratteristiche:

- flusso luminoso tipico: 122 lm (a 350 mA)
- CCT: da 5000 a 10000 K



Figura 3.4: Cree XP-E

- tensione diretta tipica: 3.2 V (a 350 mA)
- corrente massima: 1 A
- temperatura di giunzione massima: 150 °C
- resistenza termica: 9 °C/W
- FWHM: 115 gradi

3.1.5 Cree XP-E ad alta efficienza

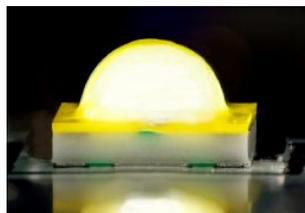


Figura 3.5: Cree XP-E ad alta efficienza

Questi led sono Cree XP-E ad alta efficienza con queste caratteristiche:

- flusso luminoso tipico: 130 lm (a 350 mA)
- CCT: da 5000 a 8300 K
- tensione diretta tipica: 3V (a 350 mA)
- corrente massima: 1 A
- temperatura di giunzione massima: 150 °C
- resistenza termica: 6 °C/W
- FWHM: 120 gradi

Abbiamo analizzato anche led blu Cree XP-E con lo stesso chip dei led bianchi ad alta efficienza.

3.2 Tecniche di caratterizzazione e stress

Durante questo lavoro è stata fatta una caratterizzazione elettrica, ottica e termica di tutti i tipi di dispositivi descritti in precedenza confrontando poi i risultati, mentre lo studio di affidabilità e quindi lo stress ha riguardato solo i led Cree ML-E e i led ProLight TLWE. Ogni led è stato montato su una star Metal Core PCB. I led di potenza Prolight 3LWE sono stati montati uno alla volta su una basetta dissipatrice in alluminio tramite del biadesivo termico. Poi a ognuno è stata fatta la caratterizzazione ottica e elettrica. Si sono presi 5 led per tipo e poi si sono mediati i risultati mettendo a confronto i 2 tipi di led con stesso package ma chip diverso. I led Cree XP-E base, ad alta efficienza e quelli blu sono stati anch'essi caratterizzati in questo modo ma a differenza dei precedenti le misure sono state fatte su 2 led per tipo. Per quanto riguarda gli altri led in una prima fase si è fatta una caratterizzazione preliminare sempre prendendo e misurando uno alla volta 5 led per tipo senza dissipatore e si sono messi a confronto i ProLight TLWE di due lotti diversi con i Cree ML-E di produzione e preproduzione. Per lo studio di affidabilità invece si è deciso di montare 4 led dello stesso tipo su una basetta dissipatrice di alluminio di spessore 4mm e lunghezza e larghezza 14x5 cm sempre tramite biadesivo termico per ogni condizione di stress. Quindi si è fatta la caratterizzazione pre-stress su tutte le basette e poi si è partiti con gli stress e con lo studio dell'affidabilità e del degrado. Inoltre si sono caratterizzati anche 4 led ProLight TLWE senza lente montati su una basetta come i precedenti e confrontati con quelli con lente prima dello stress.

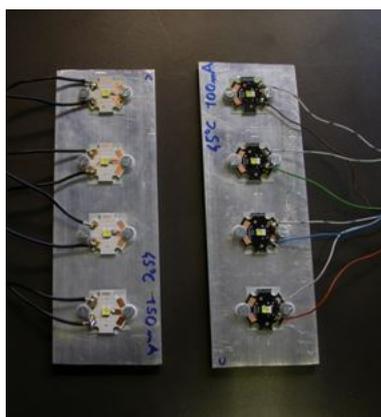


Figura 3.6: Struttura basette per caratterizzazione e stress

3.2.1 Misure a 4 terminali o Kelvin

Alcuni strumenti sono dotati di più SMU (Source/Monitor Unit), cioè possono funzionare da alimentatori fornendo una tensione o una corrente al dispositivo collegato e nello stesso tempo monitorare le grandezze elettriche con la misura di corrente o tensione. La configurazione di misura a 4 terminali è un particolare modo per connettere gli strumenti di misura ai dispositivi da misurare. Nella classica configurazione di connessione a 2 fili, come quella rappresentata in figura, il led è direttamente collegato ai terminali d'uscita dell'alimentatore con due cavi, uno per l'anodo e l'altro per il catodo.

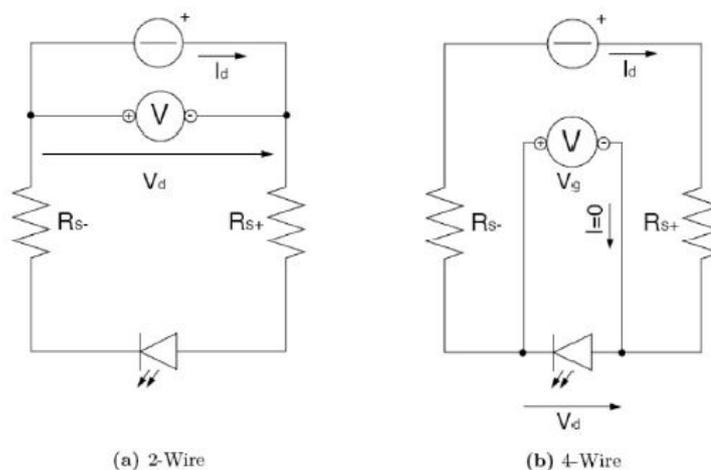


Figura 3.7: Schema elettrico equivalente per la misura della tensione ai capi di un diodo LED (a) nel caso di connessione a 2 terminali e (b) nel caso di connessione Kelvin a 4 terminali

Supponiamo che l'alimentatore fornisca una polarizzazione in corrente al led e al contempo si voglia monitorare la tensione ai suoi capi: siccome lo strumento esegue la misura attraverso gli stessi terminali d'uscita, nella seguente configurazione a 2 fili la tensione misurata non sarà quella effettiva ai capi del diodo, bensì la somma di questa e delle cadute resistive sui cavi di interconnessione come possiamo facilmente intuire. Solitamente le resistenze dei cavi sono molto piccole e quindi per basse correnti la caduta su di esse può considerarsi trascurabile, ma quando le correnti in gioco sono abbastanza elevate o è richiesta una misura di tensione molto precisa, allora queste cadute non possono più essere trascurate e quindi i valori misurati con questo tipo di connessione risulterebbero falsati. Una possibile soluzione al problema appena esposto è quella di adottare una connessione a 4 terminali: il principio alla base di questa configurazione sostanzialmente

è quello di fornire alimentazione al dispositivo ed eseguire al contempo la misurazione della grandezza d'interesse attraverso due linee di connessione separate. Ovviamente gli strumenti che permettono di effettuare misure a 4 fili sono dotati di almeno quattro terminali, due per l'alimentazione e due per la misura per l'appunto: per contraddistinguerli tra loro solitamente i primi vengono denominati con high force e low force, mentre i secondi vengono indicati con high sense e low sense. Con questa configurazione è possibile connettere i cavi di sense direttamente ai capi del dispositivo per misurarne la tensione, evitando così l'influenza delle cadute resistive sui fili di force: ovviamente il punto cruciale risiede nel fatto che per eseguire la misura lo strumento deve assorbire una corrente estremamente più piccola di quella necessaria alla polarizzazione del dispositivo e quindi le cadute resistive sui cavi di sense saranno sicuramente trascurabili, evitando così di falsare la misura.

3.2.2 Caratterizzazione elettrica

La caratterizzazione elettrica dei dispositivi durante questo progetto è stata basata sulle misure e lo studio delle caratteristiche I-V dei vari dispositivi sia in polarizzazione diretta che inversa. Tutte le misure delle I-V sono state fatte a 4 terminali e al buio (all'interno di una sfera integratrice di luce) in maniera da avere risultati corretti e precisi.

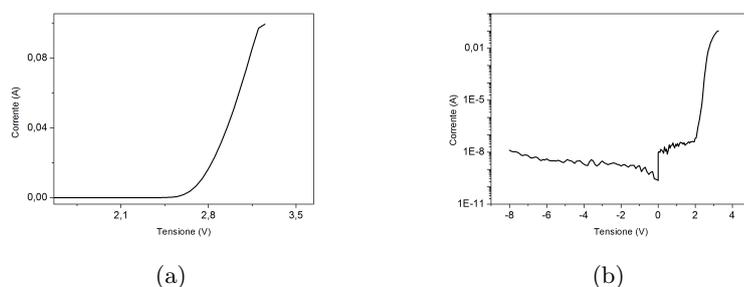


Figura 3.8: Esempi di I-V in scala lineare(a) e logaritmica(b)

Per le misure si sono utilizzati i seguenti strumenti: il SourceMeter Keithley 2612 per la polarizzazione e la misura dei dispositivi e la HP3488A switch matrix per passare automaticamente a ognuno dei 4 led di ogni basetta senza dover intervenire ogni volta a mano. La switch matrix era collegata a 4 terminali ai 4 led di ogni basetta e al SourceMeter. Per i collegamenti tra switch matrix e led sono stati utilizzati due cavi di rete da 8 fili ciascuno e degli appositi connettori. Gli strumenti erano collegati a un computer da cui un programma labview comandava la misura tramite interfaccia GPIB.



Figura 3.9: SourceMeter Keithley 2612(a) e HP3488A Switch Matrix(b)

3.2.3 Caratterizzazione ottica

La caratterizzazione ottica in questo lavoro consiste delle misure L-I (flusso luminoso-corrente), degli spettri di emissione e delle misure CCT-I (temperatura di colore-corrente). Inoltre dalle misure ottiche e elettriche si può calcolare l'efficienza dei dispositivi.

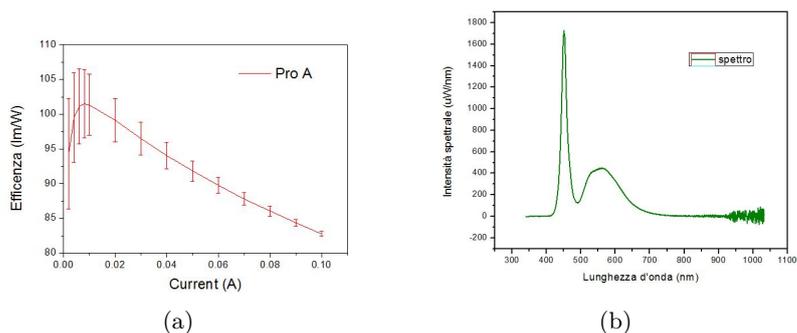


Figura 3.10: Esempi di efficienza-I (a) e spettro(b)

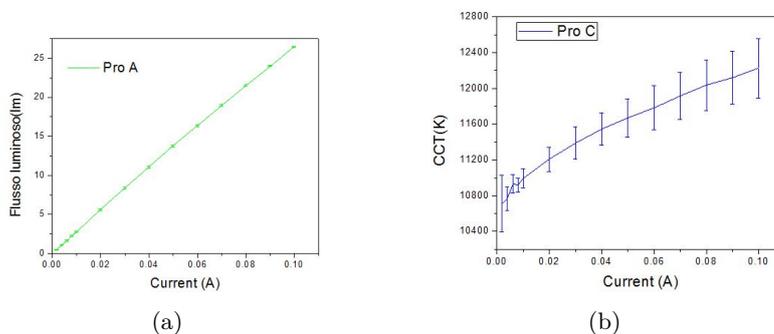


Figura 3.11: Esempi di L-I (a) e CCT-I(b)

Queste misure sono state eseguite a 4 terminali su una basetta alla volta montata all'interno di una sfera integratrice di luce. Gli strumenti utilizzati per effettuare queste misure sono stati: una sfera integratrice di luce della Labsphere da 1.6 m di diametro, lo spettrometro Ocean Optics USB4000 per la misura vera e propria, il SourceMeter Keithley 2612 per alimentare i led e la Switch Matrix per switchare tra i 4 led di ogni basetta. Lo scopo della sfera integratrice è quello di integrare spazialmente la luce della sorgente montata al suo interno. La luce dei dispositivi montati all'interno della sfera integratrice viene catturata dalla sfera stessa a cui è collegata una fibra ottica che convoglia la luce allo spettrometro. Lo spettrometro esegue la misura e manda i dati al computer attraverso una connessione usb. Come per le altre misure tramite una delle porte d'uscita il SourceMeter è collegato alla Switch Matrix che a sua volta è collegata tramite dei cavi di rete ai dispositivi all'interno della sfera. L'altra porta del Keithley 2612 è invece collegata al trigger dello spettrometro a cui manda il segnale per l'acquisizione. Tutti gli strumenti sono collegati a un computer e quindi tutto è comandato e sincronizzato attraverso un programma Labview. Lo spettrometro è dotato di un array CCD lineare con 3648 elementi (Toshiba), ognuno in grado di misurare la potenza ottica per una specifica lunghezza d'onda. Lo spettrometro è in grado di misurare le radiazioni nel range da 200 nm a 1100 nm.



Figura 3.12: Spettrometro(a) e sfera integratrice(b)

3.2.4 Caratterizzazione termica

La caratterizzazione termica consiste in una serie di misure elettriche effettuate a diverse temperature per ricavare la resistenza termica dei dispositivi, parametro che permette di stimare la temperatura di giunzione del dispositivo a diversi livelli di corrente. Conoscere la temperatura a cui si porta la giunzione è importante perché l'eccessivo riscaldamento della giunzione causa perdita di prestazioni e minore affidabilità. Infatti l'elevata temperatura raggiunta dal dispositivo durante il funzionamento provoca

diminuzione dell'efficienza, traslazione dello spettro e limitazioni in termini di vita del led.

Resistenza termica

Parte dell'energia elettrica applicata ad un dispositivo a semiconduttore viene convertita in calore, di conseguenza si ha un aumento della temperatura di giunzione. Questo accade perché la parte attiva del dispositivo, quella che genera calore, è separata dall'ambiente esterno secondo un percorso termico. Per un qualsiasi dispositivo a semiconduttore, la resistenza termica è definita come l'incremento della temperatura di giunzione causato dalla potenza dissipata P_d nel dispositivo:

$$R_{th} = \frac{\Delta T_j}{P_d} \quad (3.1)$$

dove T_j indica la temperatura di giunzione.

Utilizzando il parametro resistenza termica è facile ottenere informazioni sulla temperatura di funzionamento del dispositivo. Infatti, valutando la potenza realmente dissipata da un dispositivo, si può ottenere la temperatura di giunzione nota che sia la temperatura ambiente.

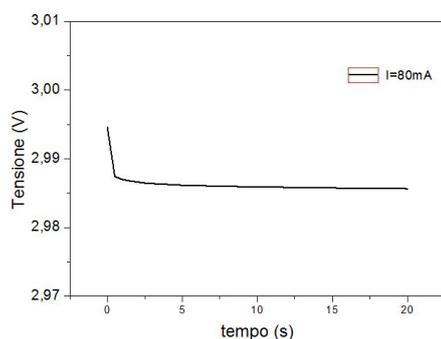
Ora verrà descritto il procedimento utilizzato per il calcolo della resistenza termica dei dispositivi in questa tesi. All'inizio si darà una descrizione di principio su come si possono ottenere le mappe termiche per una generica giunzione, ovvero la procedura idealizzata che permette di estrapolare il legame tra la temperatura e la tensione di giunzione. Le mappe termiche sono ottenute con un insieme di misure effettuate a diverse temperature e correnti. Queste misure sono molto semplici: si fissa prima della misura un set di correnti e un set di temperature e per ogni corrente scelta si va a misurare la tensione che cade ai capi del dispositivo ad ogni temperatura scelta. La misura è di tipo impulsato con impulsi di corrente molto corti ($100\mu s$). per non scaldare il dispositivo. Dalla mappa termica, attraverso un fitting grafico della curva corrispondente alla corrente di interesse, si può ricavare un'equazione che descrive l'andamento della tensione in funzione della temperatura a quella precisa corrente. Si ottiene così un'equazione che lega la tensione alla temperatura del tipo:

$$V = A_1 e^{-\left(\frac{T}{t1}\right)} + y0 \quad (3.2)$$

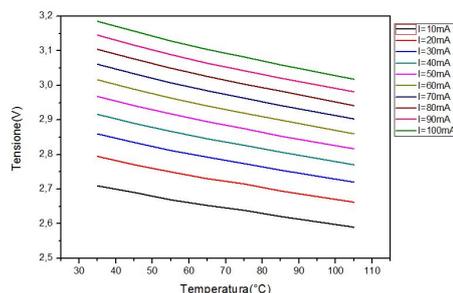
dove $A_1, t1$ e $y0$ sono dei parametri di fitting.

A questo punto conoscendo la caduta di tensione ai capi della giunzione e la

corrente che si sta iniettando è facile ricavare la temperatura di giunzione a partire dalla formula precedente. Per poter utilizzare le mappe termiche e quindi stimare la temperatura operativa del led a una determinata corrente è però necessario conoscere la sua caduta di tensione a regime V_{REG} . La stima della tensione ai capi del dispositivo in condizioni di funzionamento stazionarie si ottiene analizzando i transienti elettrici dei dispositivi stimando la tensione a regime una volta esaurito il transitorio.



(a)



(b)

Figura 3.13: Esempio di transienti(a) e mappe termiche(b)

Il transiente elettrico essenzialmente è una misura della tensione ai capi del dispositivo effettuata ad una determinata corrente. La tensione, per effetto del riscaldamento della giunzione scenderà seguendo un andamento esponenziale decrescente e il tempo necessario per stimare con buona precisione la tensione a regime per questi dispositivi è circa 20s. La stima della tensione si ottiene eseguendo un fitting sul transiente con una funzione composta da tre esponenziali decrescenti, il parametro y_0 restituito dal fitting è il valore di tensione cercato. Dal valore di tensione a regime ottenuto si può valutare sia la temperatura di giunzione a regime T_{REG} , sia la potenza elettrica dissipata dal dispositivo utile poi per valutare la resistenza termi-

Dispositivi e tecniche di caratterizzazione

ca. Di solito prima si preferiscono misurare i transienti termici e poi le mappe termiche alle stesse correnti. In questo modo si possono tracciare i punti del grafico temperatura di giunzione- potenza elettrica ed eseguire un fitting lineare su questi punti. La pendenza della retta così ottenuta corrisponde proprio alla resistenza termica del dispositivo. A partire dalla resistenza termica, conoscendo la temperatura ambiente, è possibile ora stimare la temperatura di giunzione per qualunque corrente iniettata.

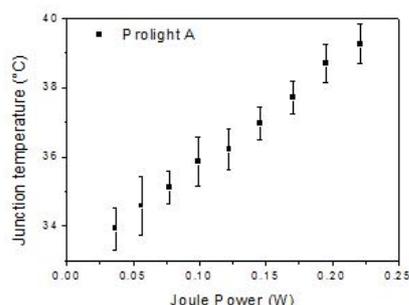


Figura 3.14: Esempio di grafico temperatura di giunzione-potenza elettrica

Per la caratterizzazione termica cioè per i transienti e le mappe termiche sono stati utilizzati gli stessi strumenti usati per la caratterizzazione elettrica cioè un SourceMeter e la Switch Matrix e in più un forno controllabile tramite computer attraverso dei programmi labview. In questo caso si sono fatte le misure a due terminali e quindi sempre tramite collegamenti fatti con cavi di rete si sono misurate due basette alla volta, cioè 8 led. Le misure sono state fatte mettendo le basette nel forno e poi tramite computer e i programmi labview si controllavano tutti gli strumenti e il forno e si facevano le misure.

3.2.5 Condizioni di stress e configurazione

Per quanto riguarda lo stress in temperatura e corrente sono state scelte 5 condizioni diverse per ogni tipo di led. Quindi si sono stressati 20 led per ogni tipo (40 in tutto) per un totale di 10 basette. Sono stati utilizzati tre forni dato che come si vede dalla tabella seguente abbiamo scelto 3 temperature diverse di stress (45, 65 e 85°C). Sempre guardando la tabella si possono vedere le 4 diverse correnti di stress (cioè 50, 75, 100 e 150mA). A ogni condizione di stress per semplificare la gestione dei dati è stata associata una lettera.

Per lo stress sono stati collegati in serie i led di ogni basetta e anche più basette da stressare alla stessa corrente. Si è utilizzato un unico alimentatore per lo stress sfruttando le due uscite e costruendo 6 circuitini di comando

CREE	75mA	100mA	150mA
45°C	A	B	C
65°C		D	
85°C		E	

Prolight	50mA	75mA	100mA
45°C	A	B	C
65°C		D	
85°C		E	

Figura 3.15: Condizioni di stress

basati sull' integrato LM317 e su un resistore variabile. Questi circuiti sono stati introdotti per dare una corrente costante in uscita una volta che all'ingresso si ha una tensione sufficiente. Si è anche fatto in modo di stabilizzarli con un condensatore. Ognuno di questi circuiti di driving è stato impostato cambiando la resistenza variabile per dare la corrente di stress in uscita richiesta.

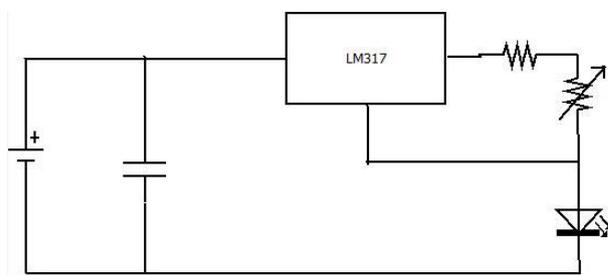


Figura 3.16: Schema circuito di comando per gli stress

Sono stati messi in parallelo i due circuiti che comandavano le singole basette a 50 e 150 mA. Questi circuiti erano comandati da una delle uscite dell'alimentatore. L'altra uscita invece comandava altri 4 circuiti messi in parallelo. Si è sfruttato il fatto che c'erano 4 basette da stressare a 75mA e 4 a 100mA e si è deciso di mettere in serie 2 a 2 queste basette. Quindi ogni circuitino comandava due basette di led a 75 o 100mA.

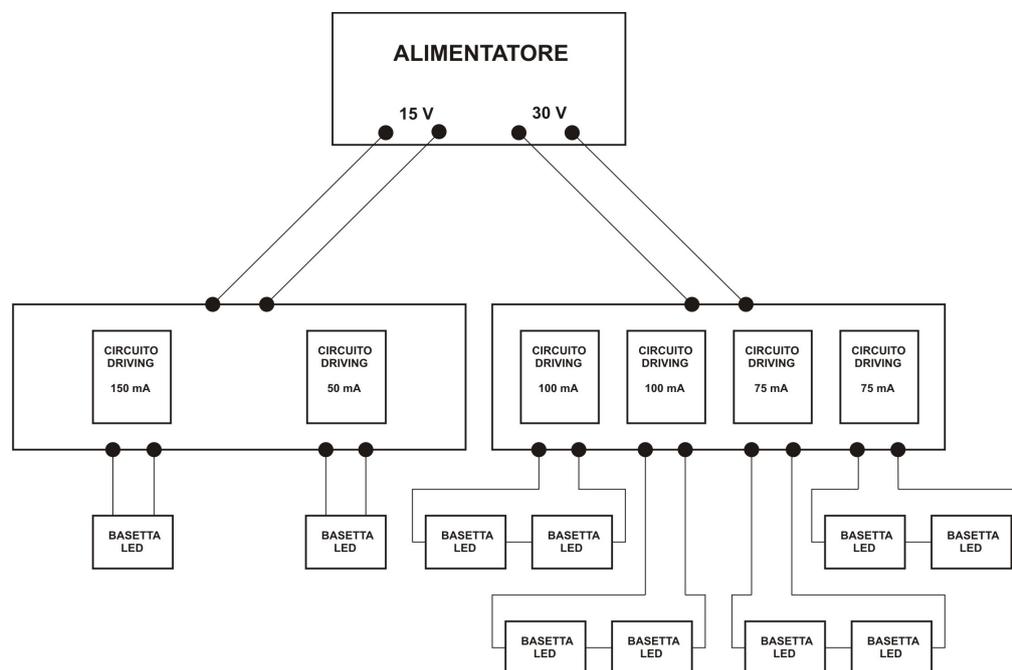


Figura 3.17: Schema della configurazione per lo stress

CAPITOLO

4

RISULTATI

4.1 Risultati caratterizzazione

4.1.1 Led di potenza ProLight 3LWE con 2 chip diversi

Si sono analizzati i led ProLight 3LWE con chip Epistar (a basso costo) e con chip EZ900 della Cree. Come già precedentemente detto per confrontare questi led di potenza con package uguale e diverso chip si è fatta la caratterizzazione elettrica e ottica. Per quanto riguarda le misure delle I-V di questi dispositivi ci si è limitati alla polarizzazione diretta facendo le misure da 0 a 4V con passo di 50mV. Dalla caratteristiche I-V si nota chiaramente la

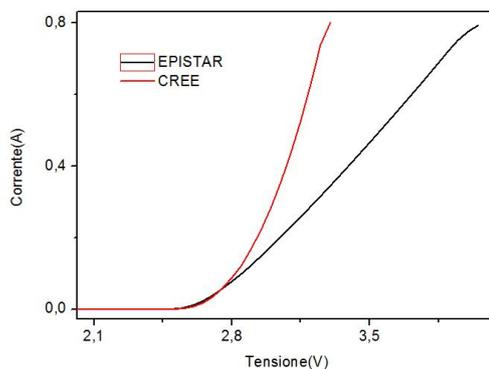
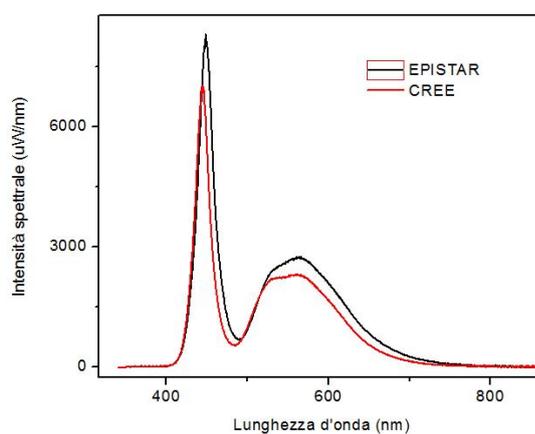


Figura 4.1: Confronto I-V

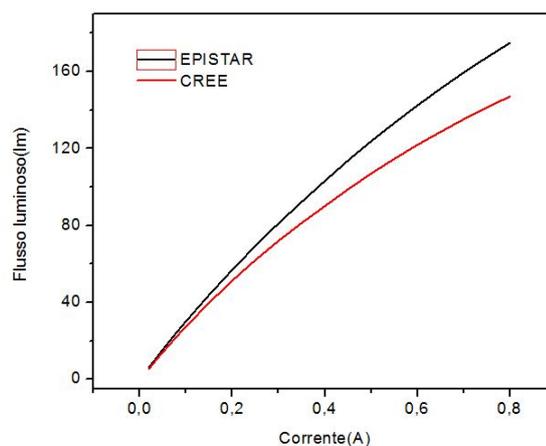
Risultati

tensione più elevata dei led con chip Epistar rispetto a quelli con chip Cree e cioè il pesante effetto della resistenza serie dovuto alla scarsa qualità del chip e alle resistenze dei contatti. La resistenza serie risulta di 1.61 ohm per i led con chip Epistar e di 0.55 ohm per gli altri.

Le misure ottiche sono state fatte a partire da 20mA a passi di 20 fino a 100mA e poi a passi di 50 fino a 800mA.



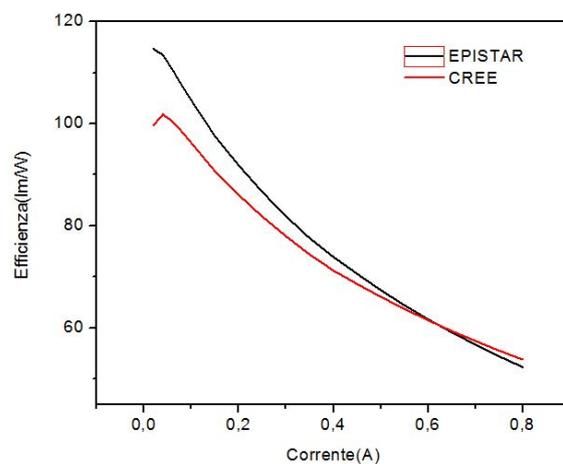
(a)



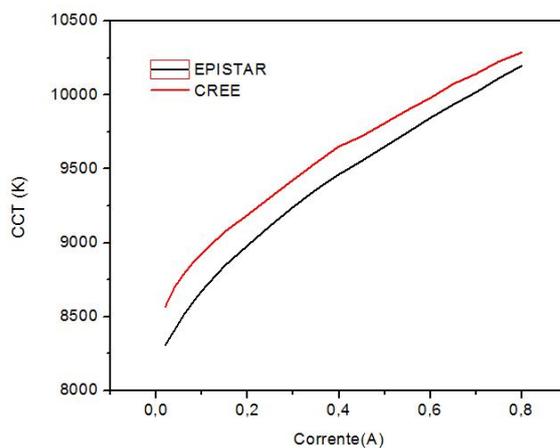
(b)

Figura 4.2: Confronto degli spettri(a) e del flusso luminoso(b)

Dai grafici si può vedere che i led con chip Epistar hanno un flusso luminoso maggiore rispetto ai led con chip Cree e questo si vede anche dal confronto degli spettri. Mentre la temperatura di colore è maggiore nei led con chip Cree.



(a)



(b)

Figura 4.3: Confronto dell'efficienza(a) e della temperatura di colore(b)

Per quanto riguarda l'efficienza per correnti basse sono più efficienti gli Epistar mentre sopra i 600mA sono più efficienti i Cree e questo è dovuto alla resistenza serie parassita molto alta di cui si è parlato prima nei led con chip Epistar. Una resistenza parassita in serie a un led a correnti alte vuol dire una caduta di potenziale non trascurabile sulla stessa e quindi un aumento della tensione e della potenza elettrica sul led che porta a una diminuzione dell'efficienza.

4.1.2 Led di potenza Cree XP-E base e ad alta efficienza

La differenza tra i led Cree XP-E base e quelli ad alta efficienza sta nell'utilizzo in quest'ultima della tecnologia Direct Attach nella creazione del chip.

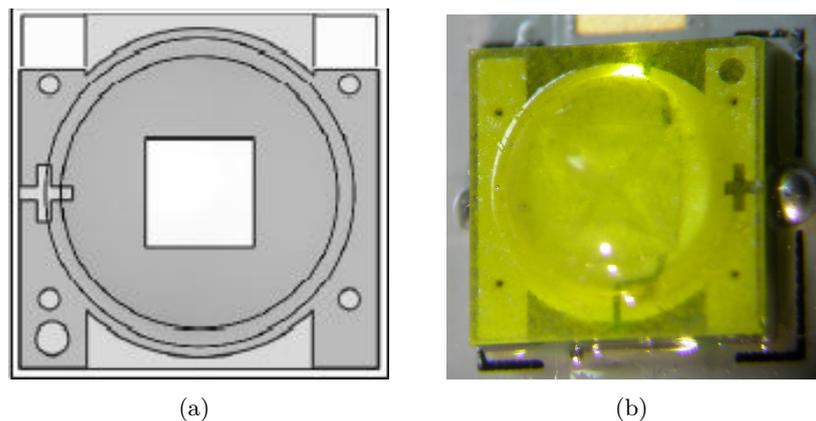


Figura 4.4: Diagramma del chip XP-E (a)base e(b)alta efficienza

Questa tecnica consiste in un metodo migliore di attaccamento e incollamento del chip. Come si può vedere la particolarità del chip è quella di presentare una specie di croce obliqua che si può notare anche ad occhio nudo osservando i led.

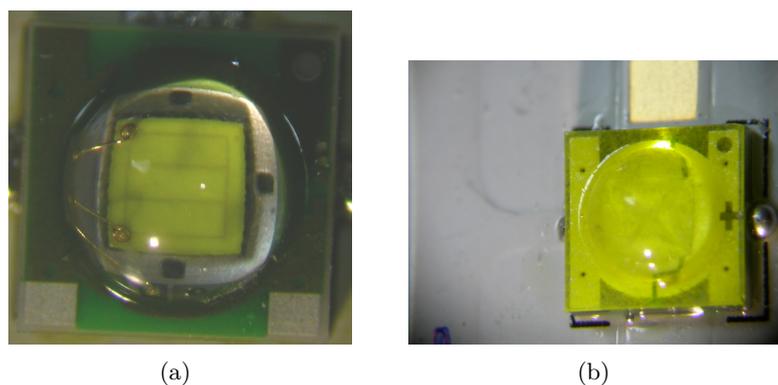


Figura 4.5: Cree XP-E(a) Cree XP-E High Efficiency(b)

Questa nuova tecnologia garantisce maggior flusso luminoso, una tensione più bassa e una minor resistenza termica.

Per confrontare i Cree XP-E base con quelli ad alta efficienza si è fatta la caratterizzazione elettrica e ottica su due led per tipo mediando i risultati. Per le misure elettriche si sono fatte le caratteristiche I-V solo in diretta da 0 a 4 V con passo di 50mV.

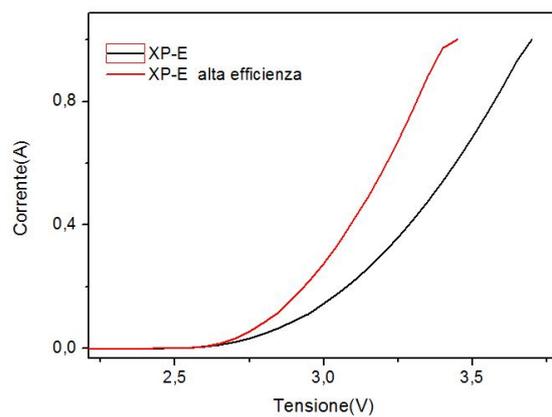


Figura 4.6: Confronto I-V

Le misure ottiche sono state fatte a partire da 50mA fino a 700mA con passo di 50mA.

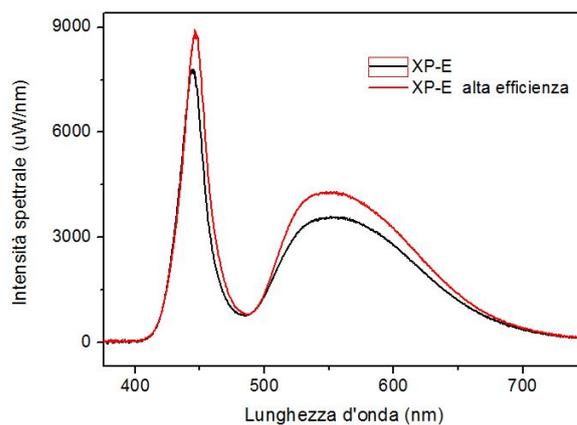


Figura 4.7: Confronto degli spettri

Risultati

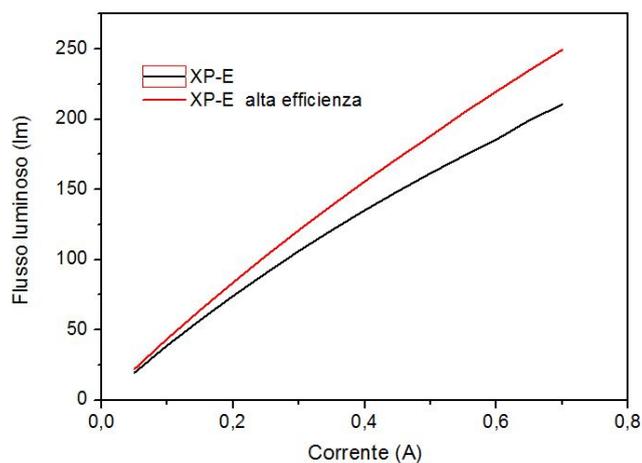


Figura 4.8: Confronto del flusso luminoso

Si può vedere dai grafici precedenti la differenza della caratteristica I-V dei dispositivi. In particolare si vede come nei led ad alta efficienza l'effetto della resistenza serie parassita si fa sentire di meno. Si può vedere anche la differenza nello spettro e nel flusso luminoso ben maggiore nei led a alta efficienza.

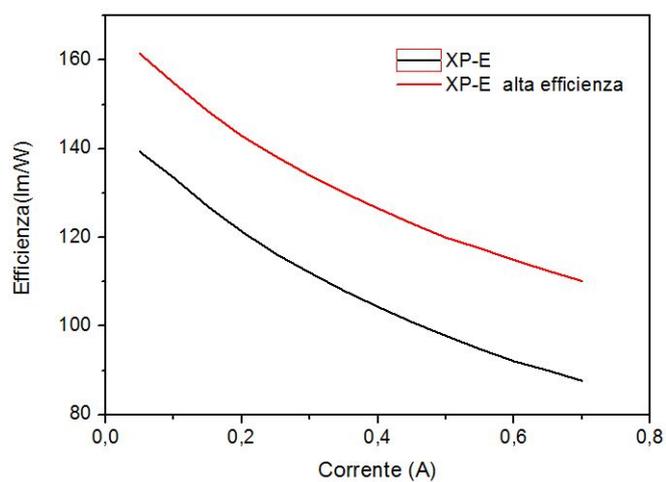


Figura 4.9: Confronto dell'efficienza

Dal grafico dell'efficienza possiamo vedere che ci sono più di 20 lm/W di differenza tra i 2 tipi di led e questa differenza resta quasi costante andando su con la corrente.

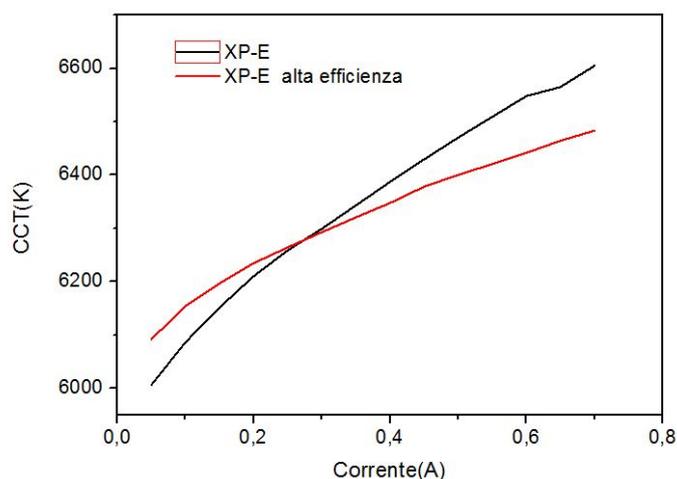


Figura 4.10: Confronto della temperatura di colore

Mentre per quanto riguarda l'andamento della temperatura di colore, si può vedere come essa varia molto di più con l'aumentare della corrente nei led XP-E base rispetto agli XP-E ad alta efficienza e questo è dovuto alle migliori caratteristiche del nuovo chip. Si sono anche messe in confronto le

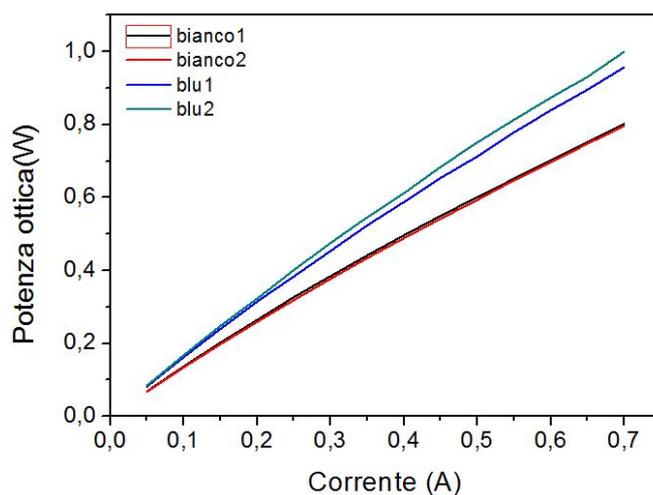


Figura 4.11: Confronto tra le potenze ottiche dei led bianchi ad alta efficienza e i led blu con stesso chip

potenze ottiche di led bianchi e blu con identico chip e da questi dati si è calcolato l'efficienza di conversione dei fosfori dei led bianchi che è risultata circa dell'82%.

4.1.3 Led ProLight TLWE e Cree ML-E

Misure preliminari

Prima della caratterizzazione vera e propria dei led montati sulle basette si sono fatte delle misure preliminari su un led alla volta. Si sono misurati 5 led Cree ML-E di produzione e preproduzione e ProLight TLWE di due lotti diversi A e B e poi si sono mediati i risultati e si sono confrontati.

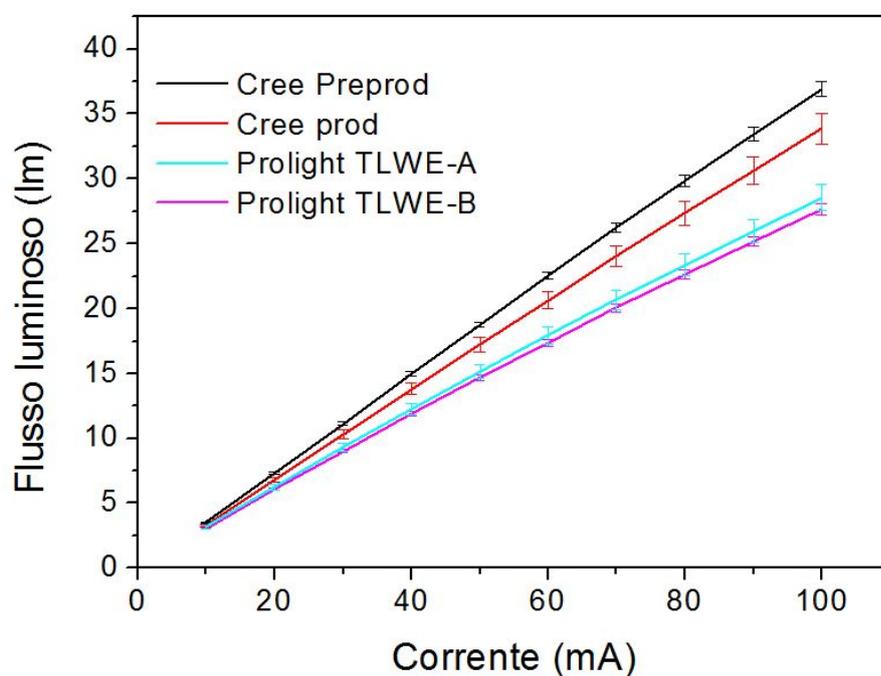


Figura 4.12: Confronto del flusso luminoso

Da questo grafico si vede che i led Cree hanno un flusso maggiore rispetto ai ProLight, e in particolare che i preproduzione cioè la versione più recente sono migliori dei produzione, mentre non c'è grossa differenza tra i 2 lotti della ProLight.

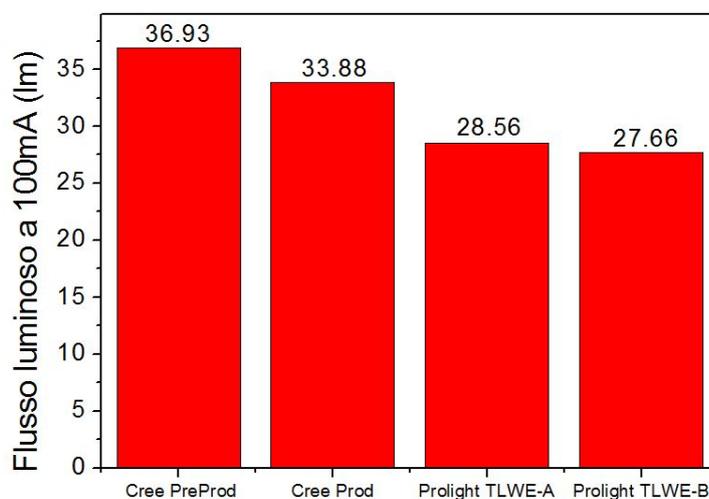


Figura 4.13: Confronto del flusso luminoso a 100mA

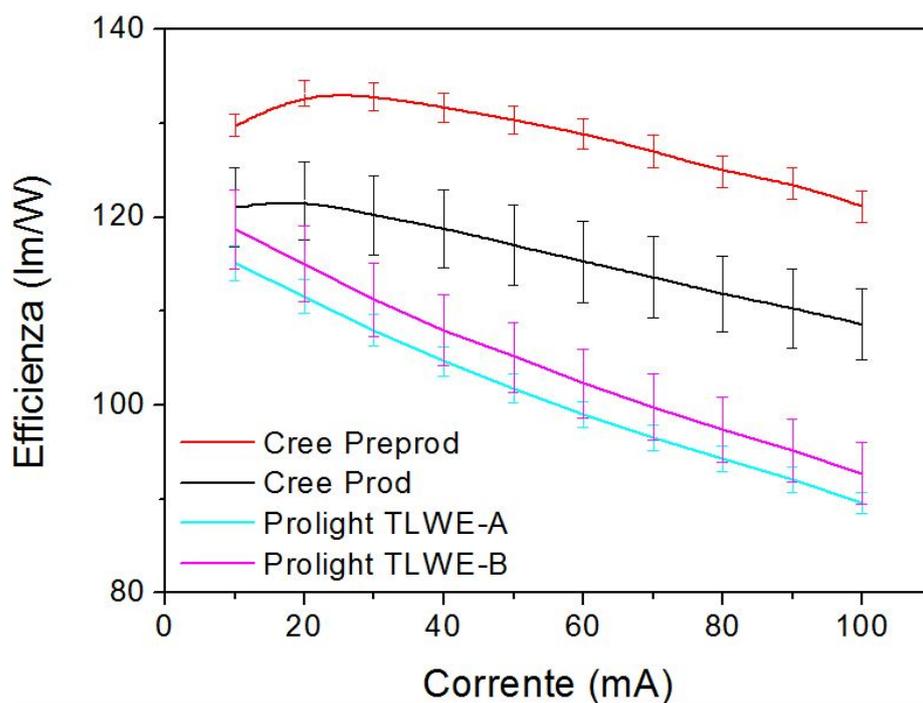


Figura 4.14: Confronto dell'efficienza

Anche per quanto riguarda l'efficienza si può vedere la superiorità dei led Cree e in particolare dei preproduzione.

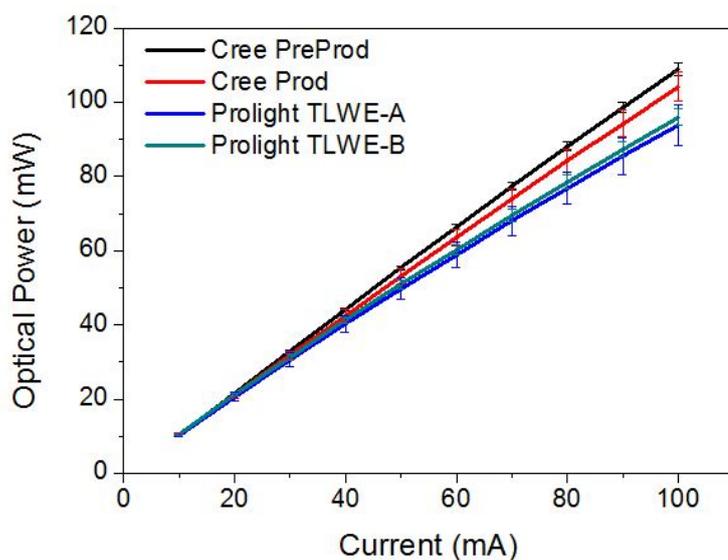


Figura 4.15: Confronto della potenza ottica

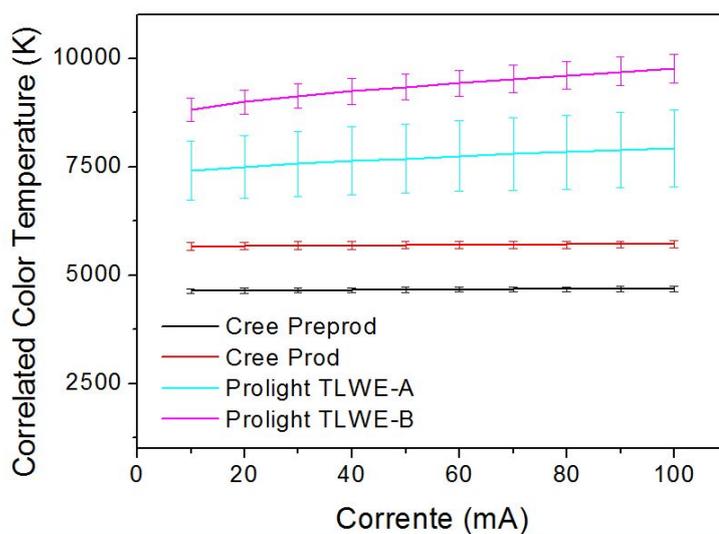


Figura 4.16: Confronto della temperatura di colore

Per quanto riguarda la temperatura di colore si vede la grande differenza tra i Cree e i ProLight con quest'ultimi che hanno una temperatura di colore molto maggiore e quindi una luce bianca più fredda verso il blu.

Caratterizzazione termica pre-stress

ProLight A Per i led di questa basetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 28.8K/W$

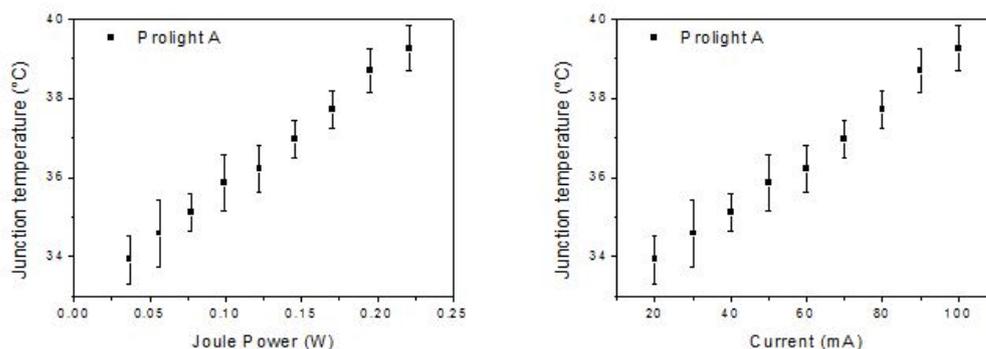


Figura 4.17: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

ProLight B Per i led di questa basetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 27.3K/W$

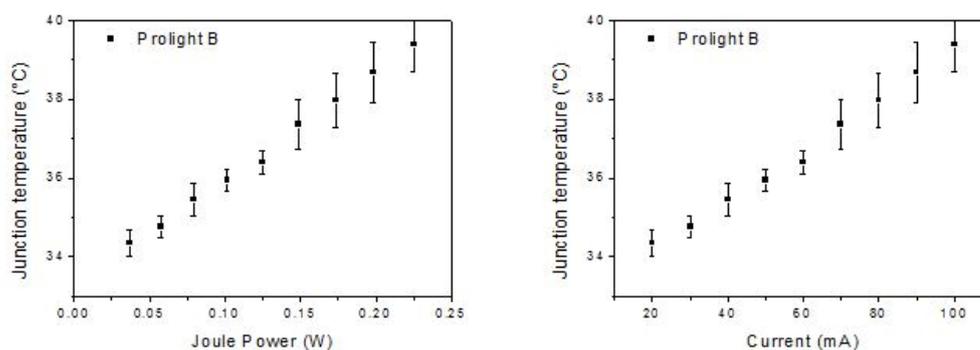


Figura 4.18: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Risultati

ProLight C Per i led di questa basetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 31.1K/W$

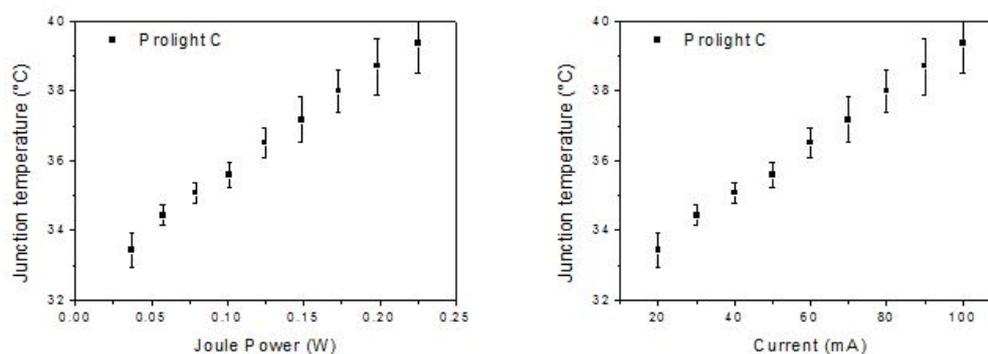


Figura 4.19: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

ProLight D Per i led di questa basetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 25.8K/W$

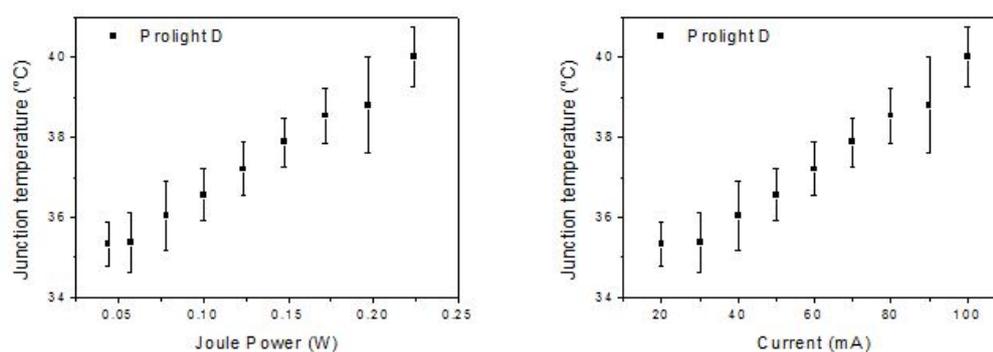


Figura 4.20: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

ProLight E Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 28.2K/W$

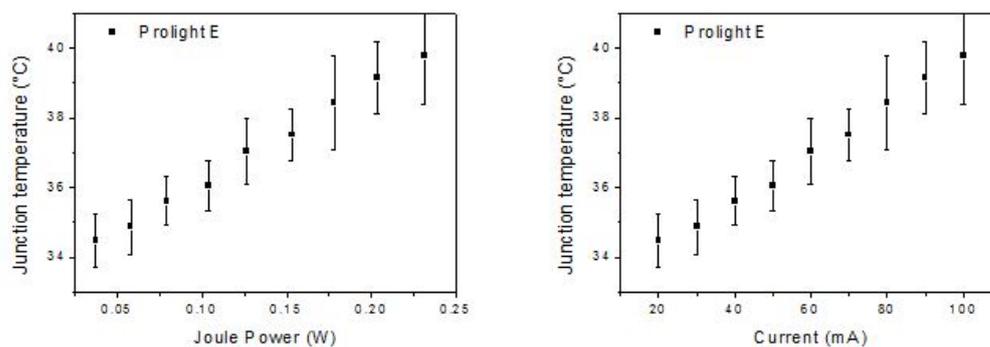


Figura 4.21: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Cree A Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 28.1K/W$

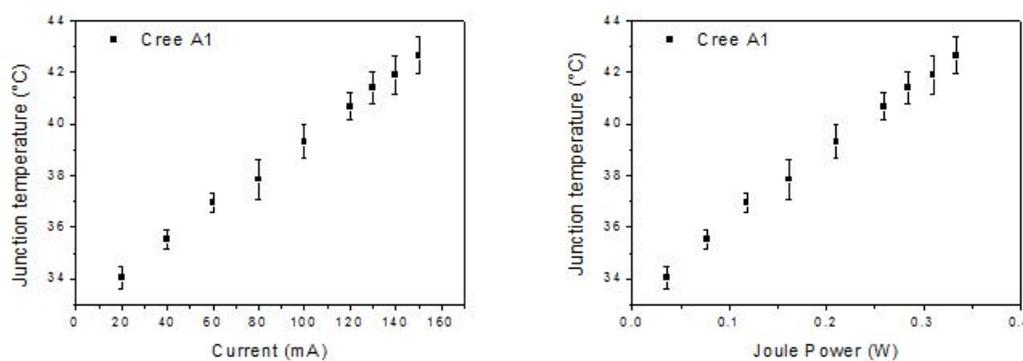


Figura 4.22: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Risultati

Cree B Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 27.3K/W$

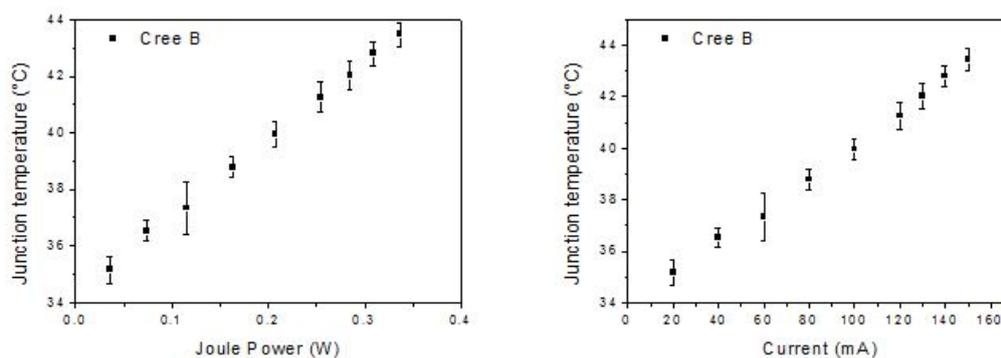


Figura 4.23: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Cree C Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 25.7K/W$

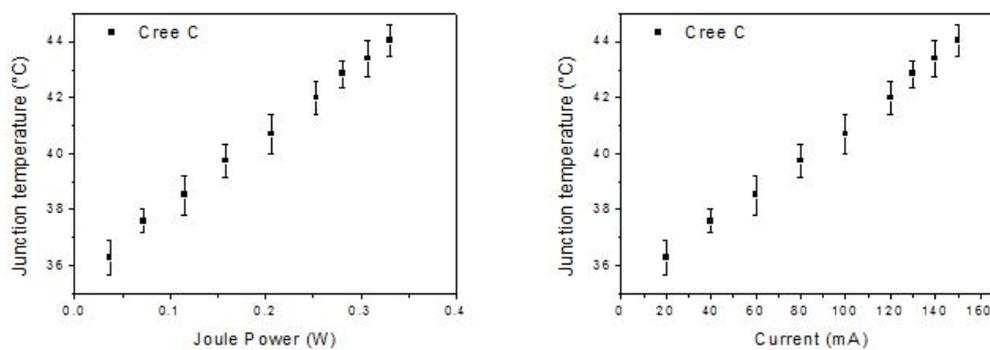


Figura 4.24: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Cree D Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 25.9K/W$

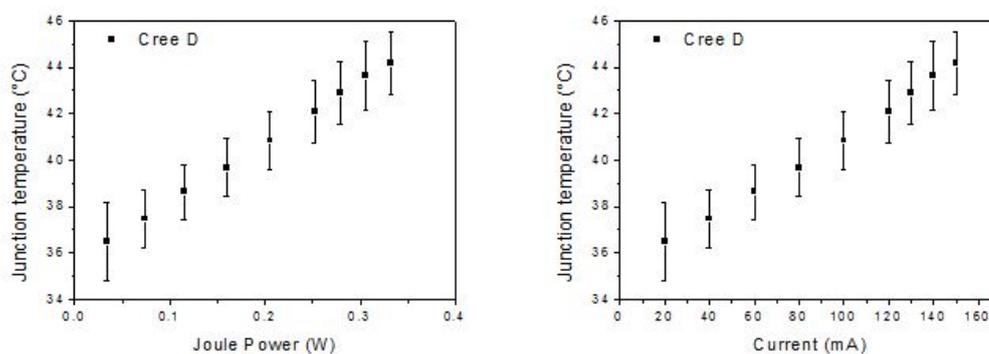


Figura 4.25: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Cree E Per i led di questa bassetta è risultata una resistenza termica media $R_{th} = 26K/W$

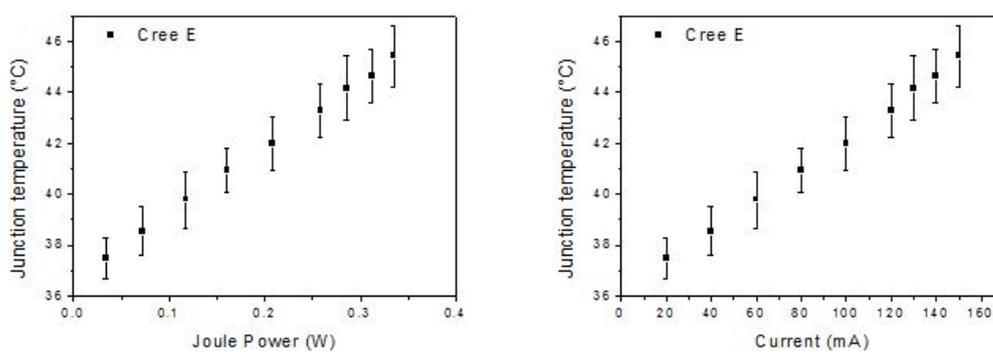


Figura 4.26: Grafici temperatura di giunzione-potenza e temperatura di giunzione-corrente

Risultati

Caratterizzazione elettrica

ProLight A La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

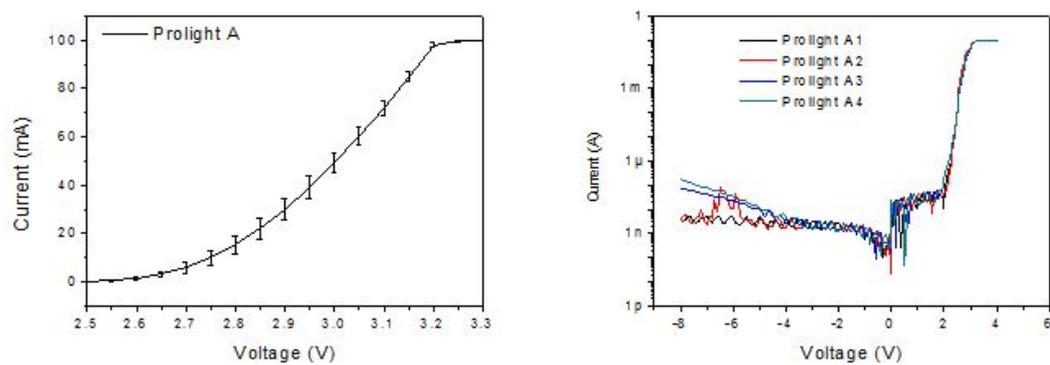


Figura 4.27: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

ProLight B La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

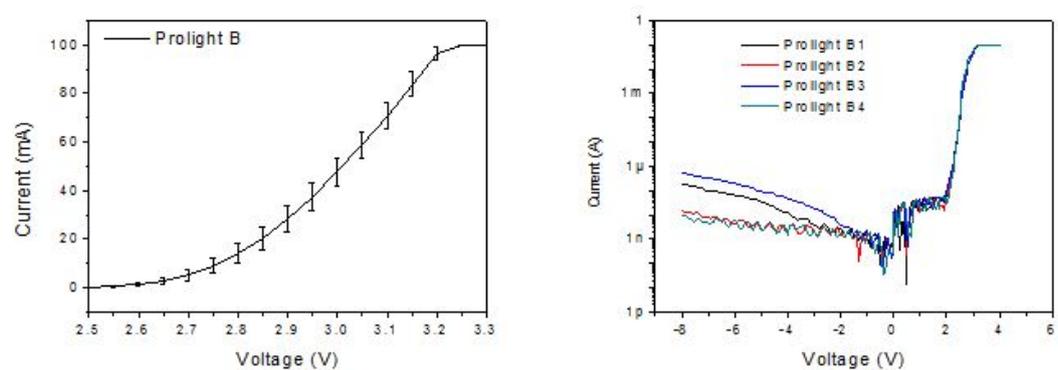


Figura 4.28: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

ProLight C La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

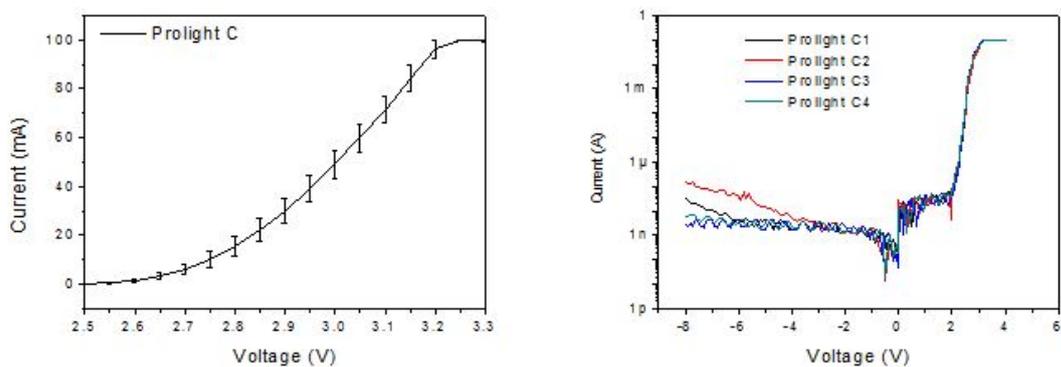


Figura 4.29: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

ProLight D La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

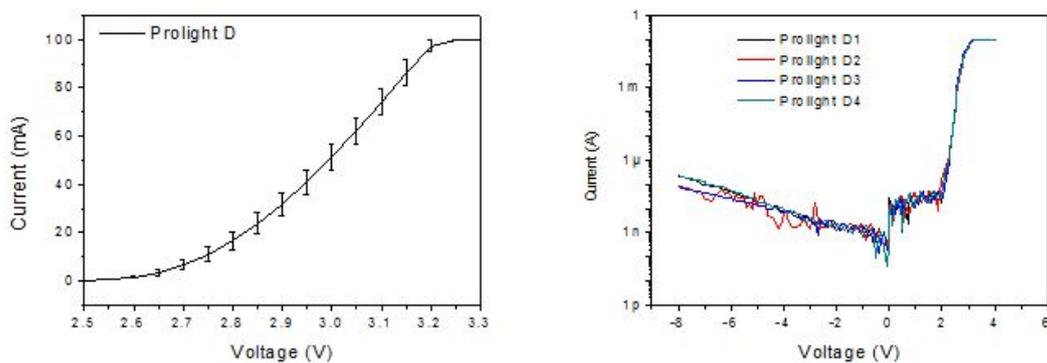


Figura 4.30: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

Risultati

ProLight E La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

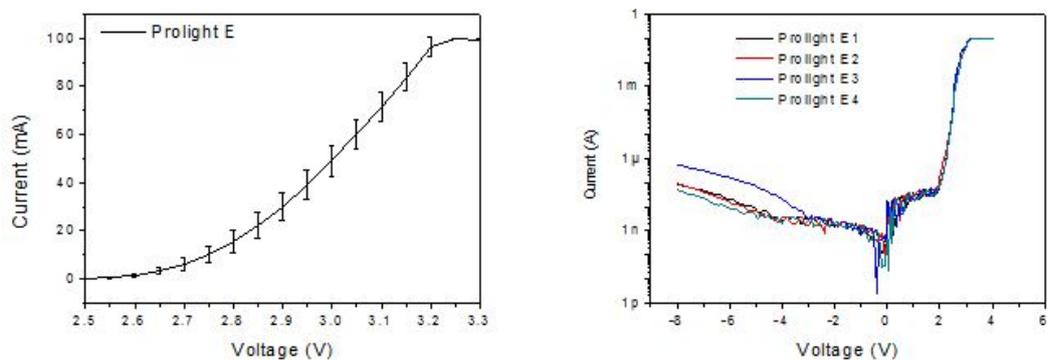


Figura 4.31: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

La caratteristica I-V in scala logaritmica dei led ProLight indica l'assenza di un led di protezione per la polarizzazione inversa.

Cree A La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

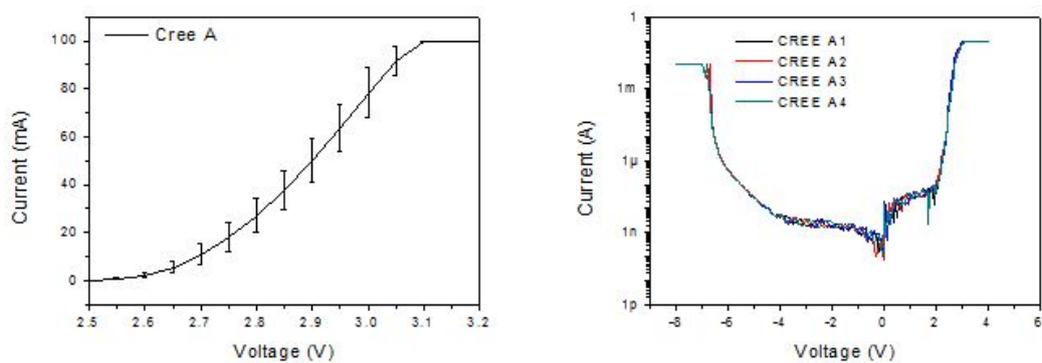


Figura 4.32: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

Cree B La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

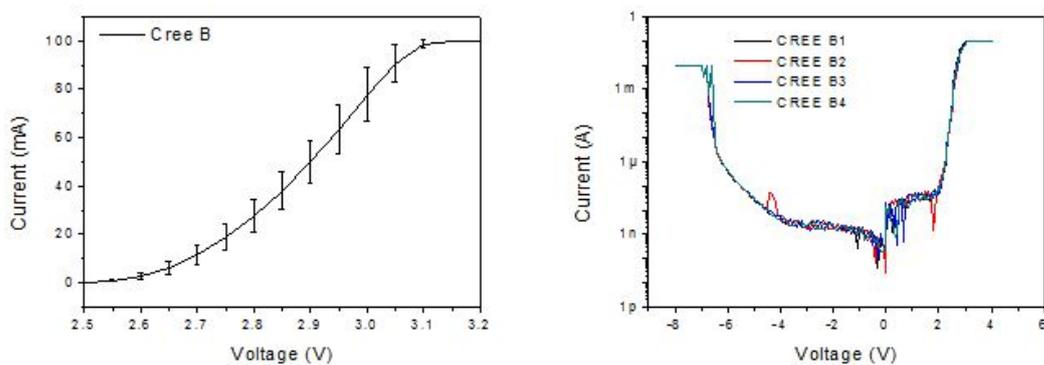


Figura 4.33: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

Cree C La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

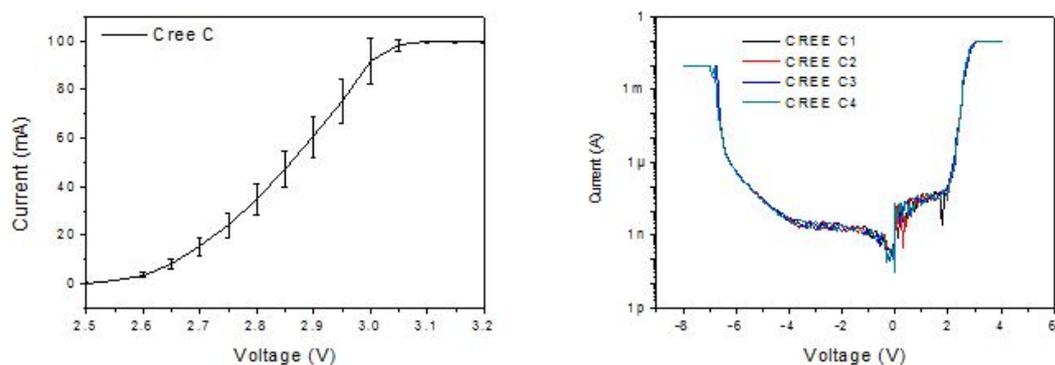


Figura 4.34: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

Risultati

Cree D La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

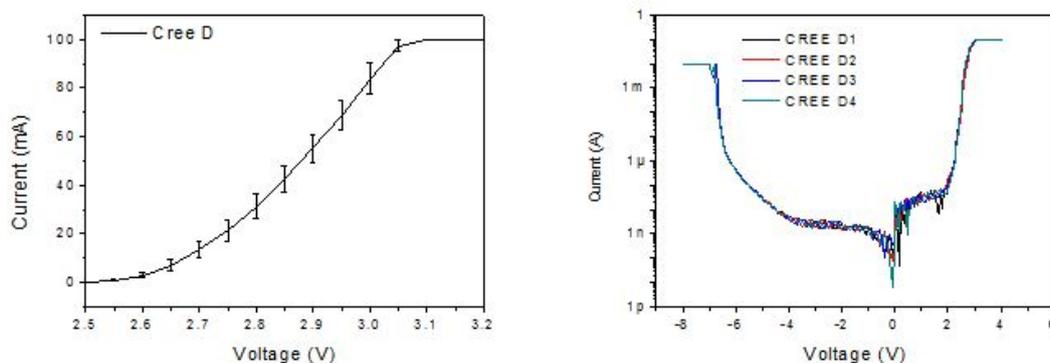


Figura 4.35: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

Cree E La caratterizzazione elettrica si basa sulla caratteristica I-V del led.

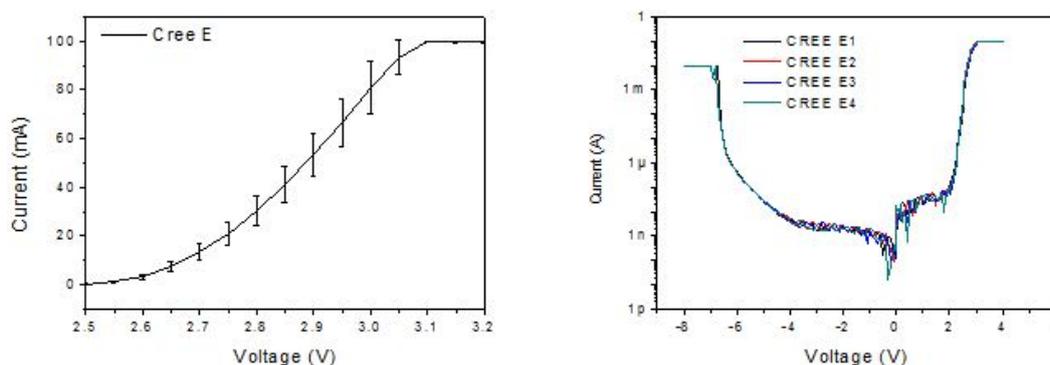
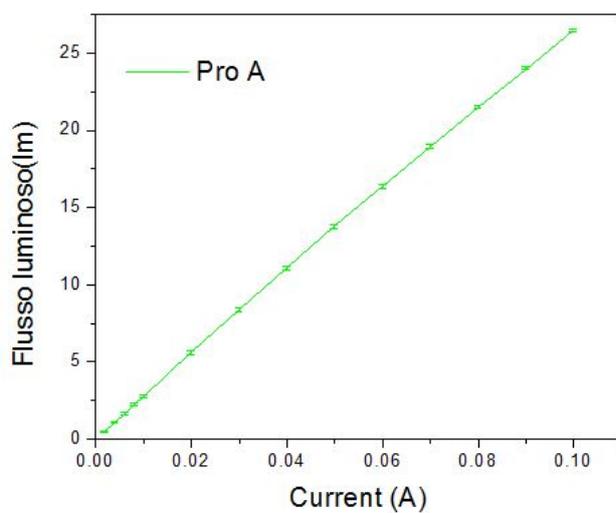


Figura 4.36: Grafici I-V in scala lineare e logaritmica

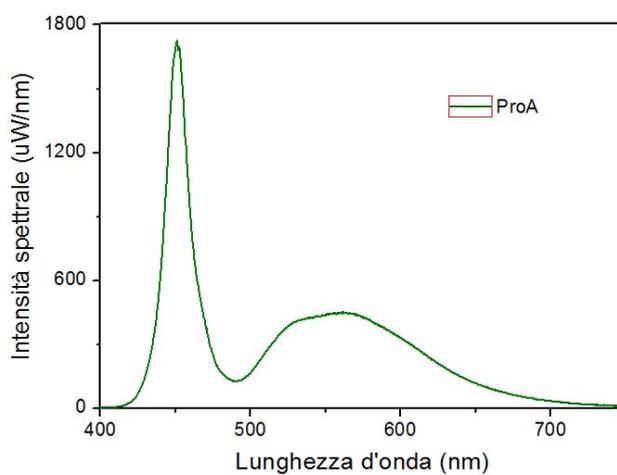
La caratteristica I-V in scala logaritmica e in particolare la corrente che sale in polarizzazione inversa indica la presenza di un diodo zener in parallelo al led. Il diodo zener ha la funzione di proteggere il led nel caso in cui venga polarizzato inversamente.

Caratterizzazione ottica

ProLight A La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

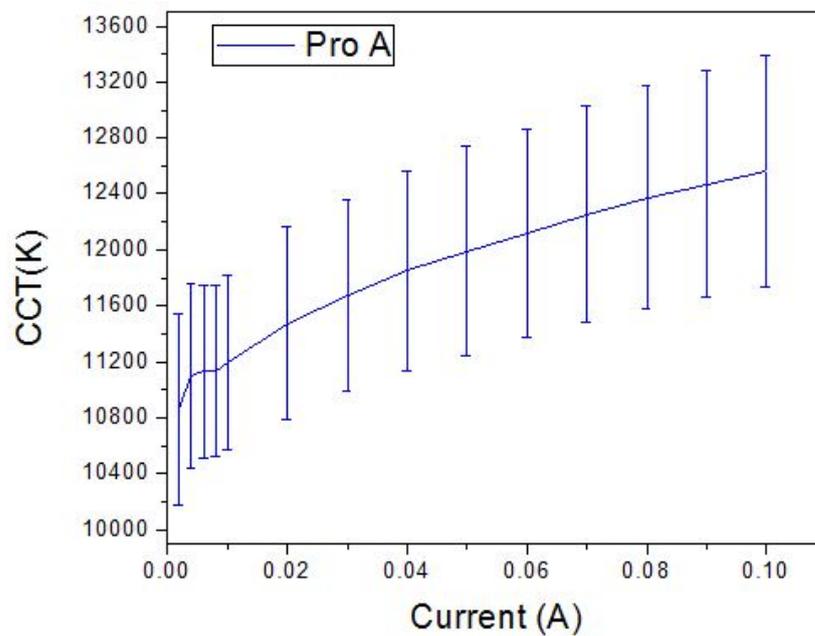


(a)

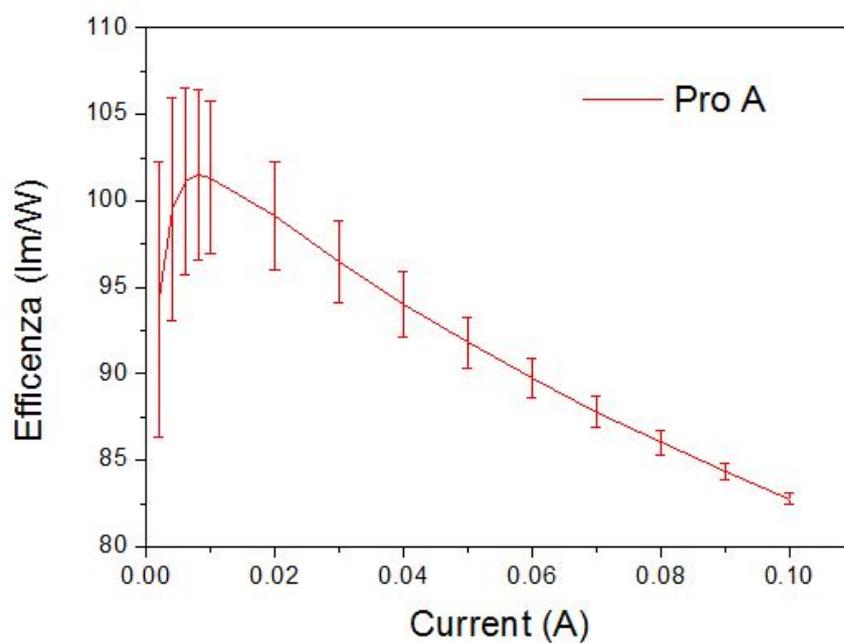


(b)

Figura 4.37: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



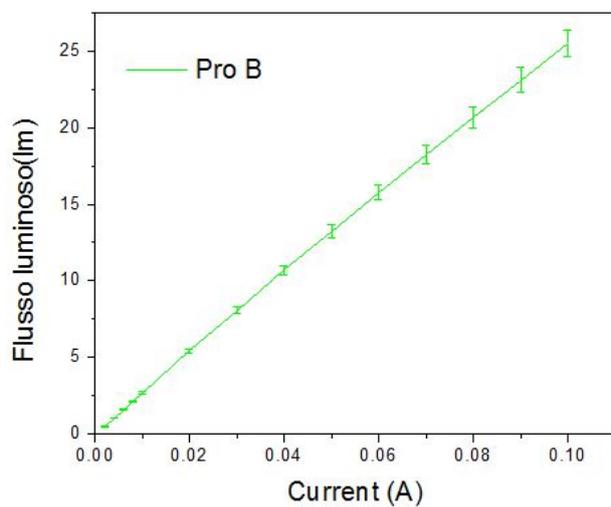
(a)



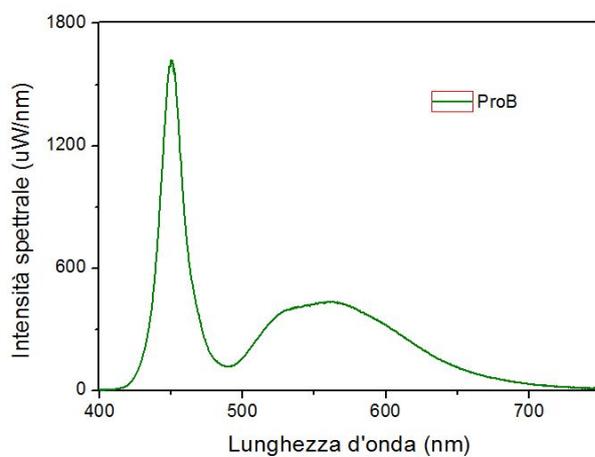
(b)

Figura 4.38: CCT (a) e efficienza(b)

ProLight B La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

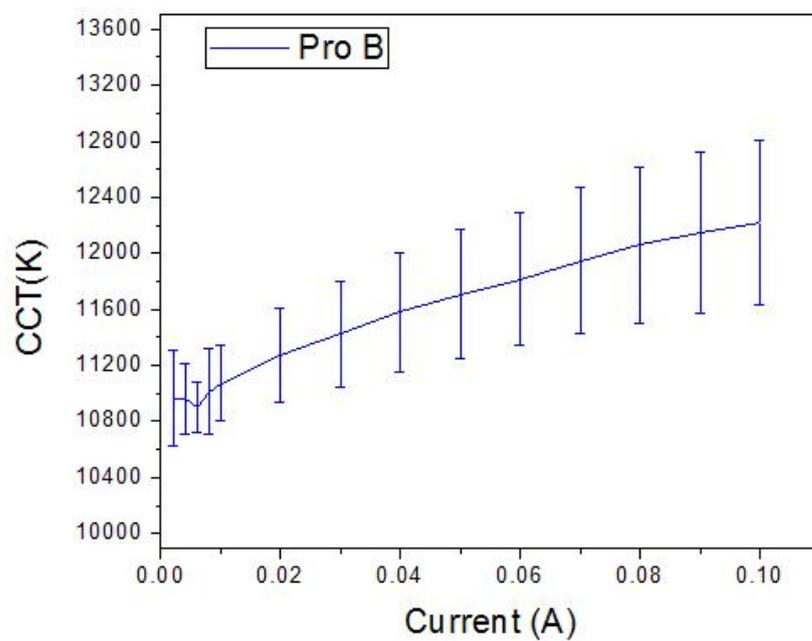


(a)

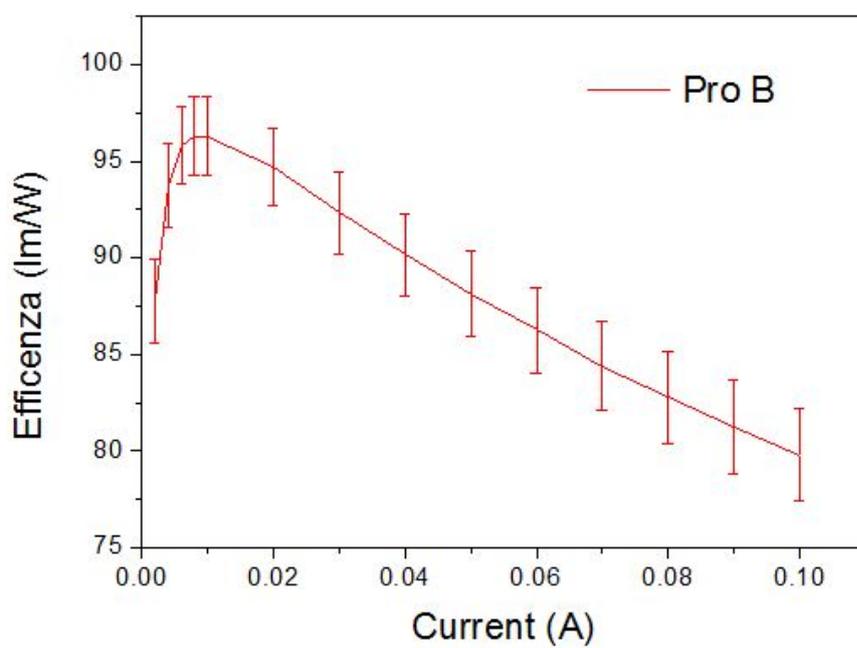


(b)

Figura 4.39: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



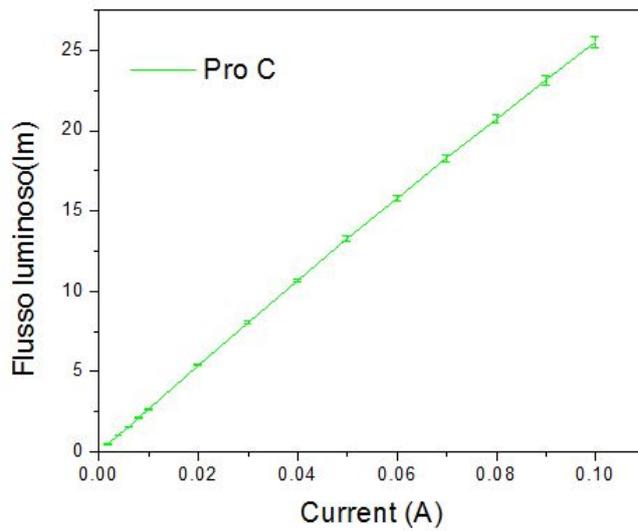
(a)



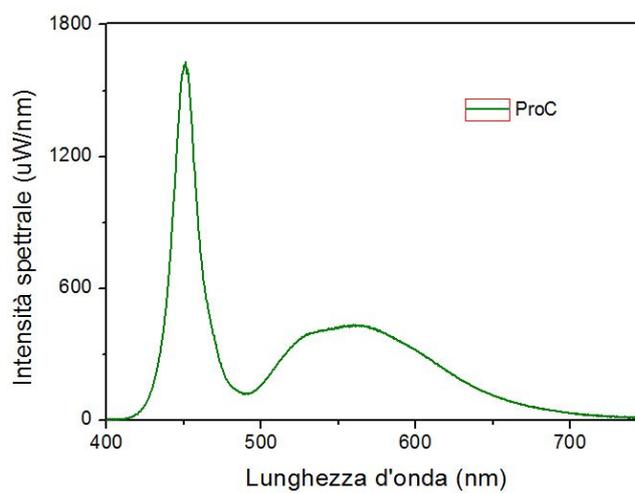
(b)

Figura 4.40: CCT (a) e efficienza(b)

ProLight C La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

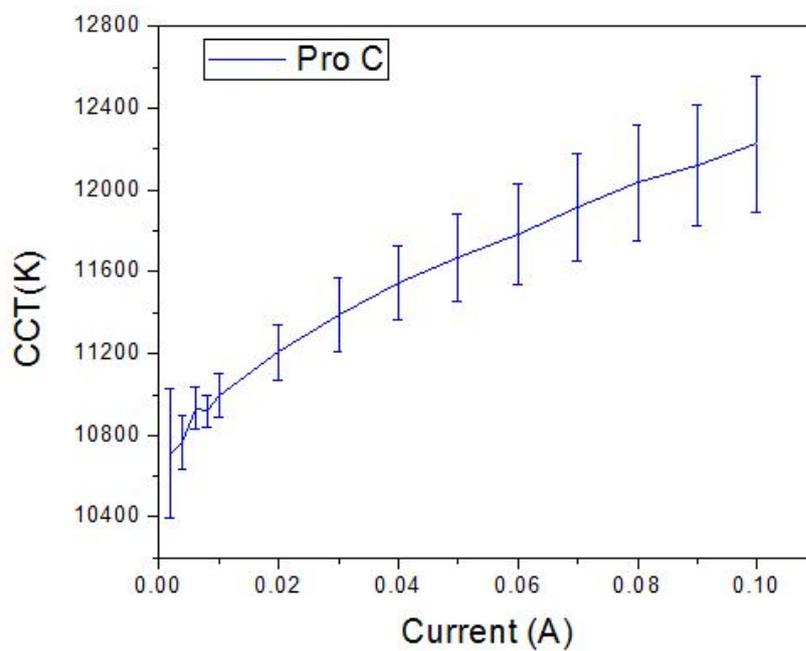


(a)

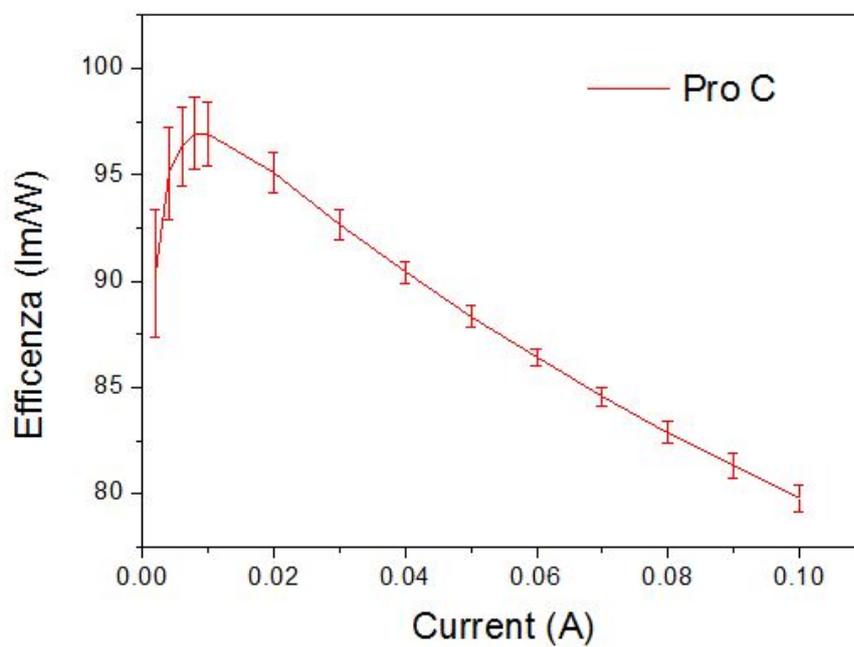


(b)

Figura 4.41: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



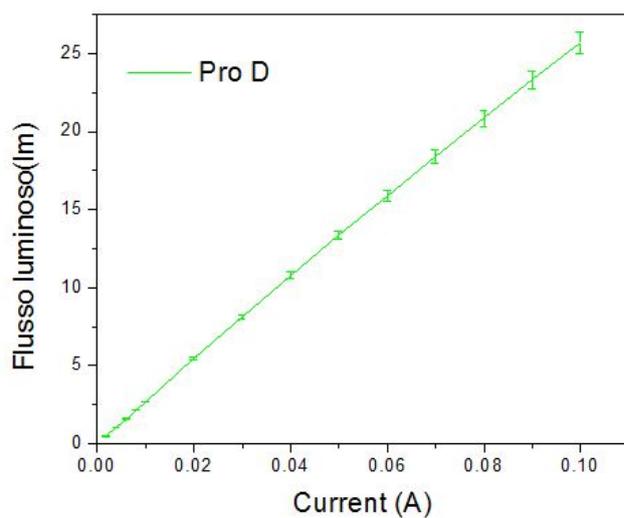
(a)



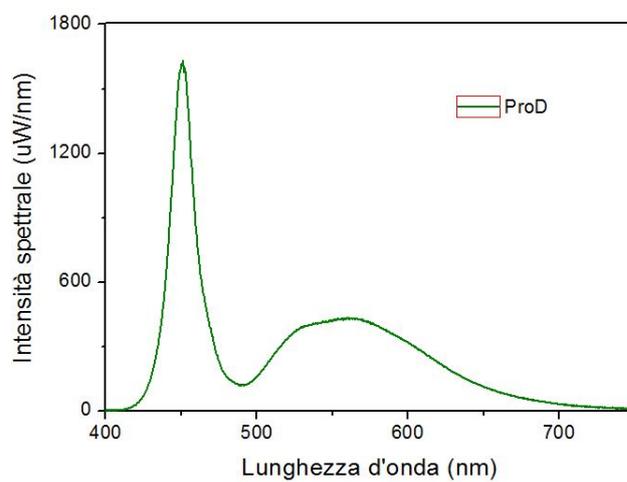
(b)

Figura 4.42: CCT (a) e efficienza(b)

ProLight D La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

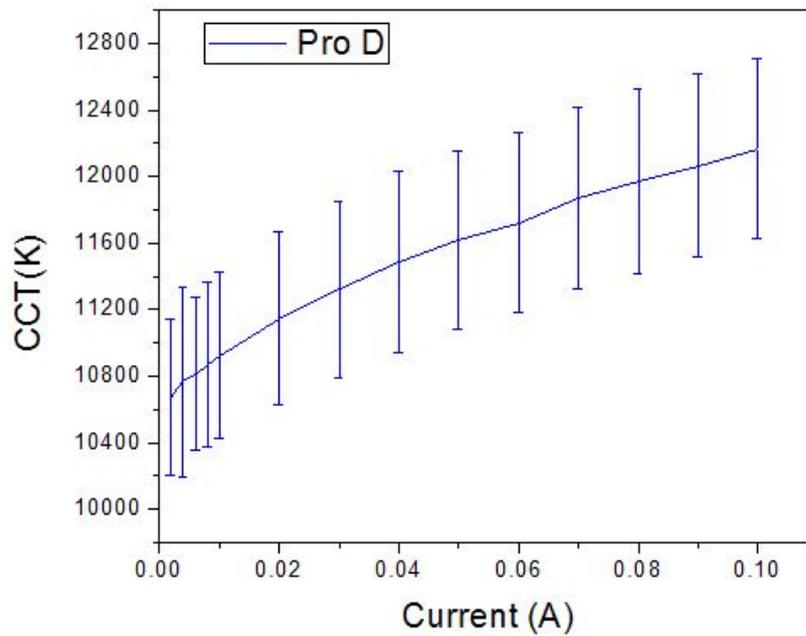


(a)

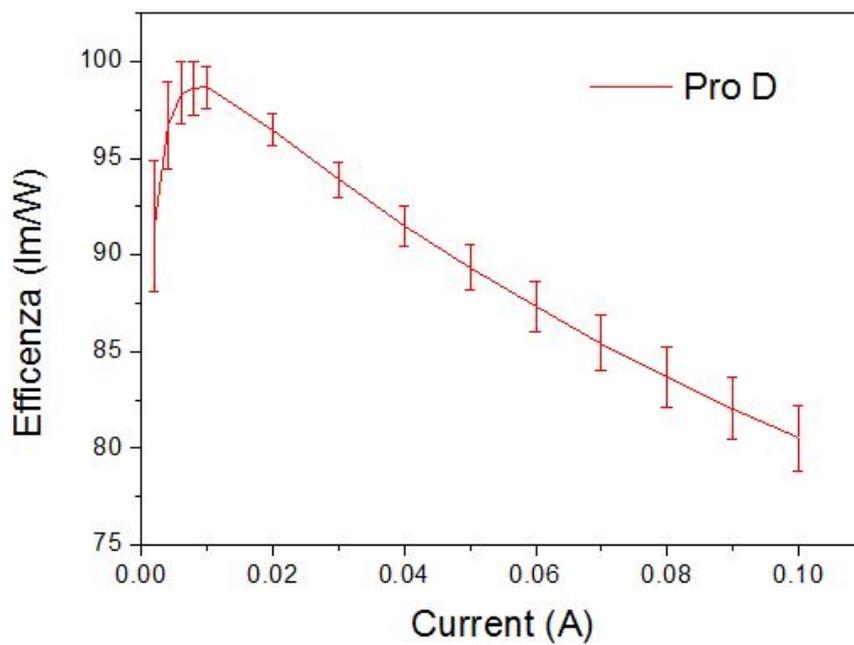


(b)

Figura 4.43: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



(a)



(b)

Figura 4.44: CCT (a) e efficienza(b)

ProLight E La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

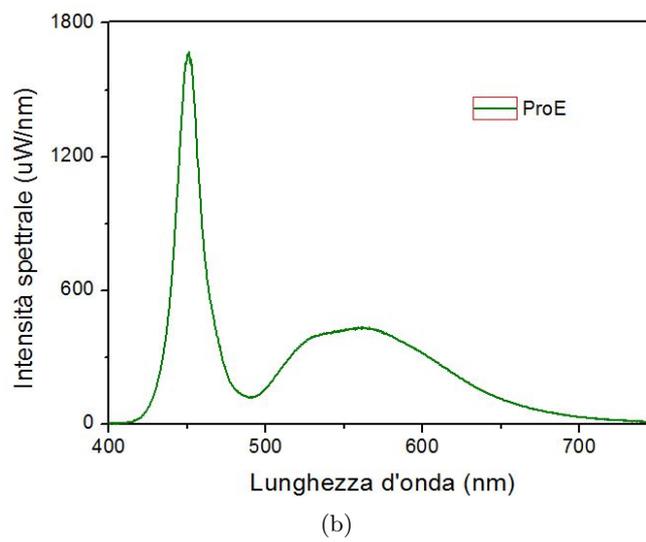
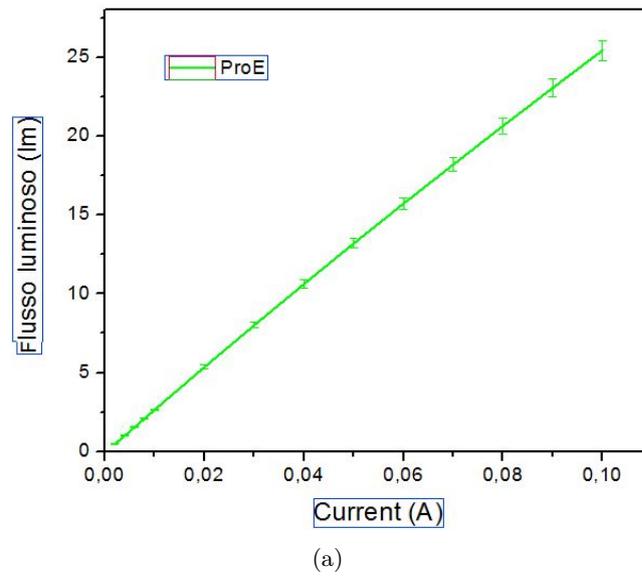
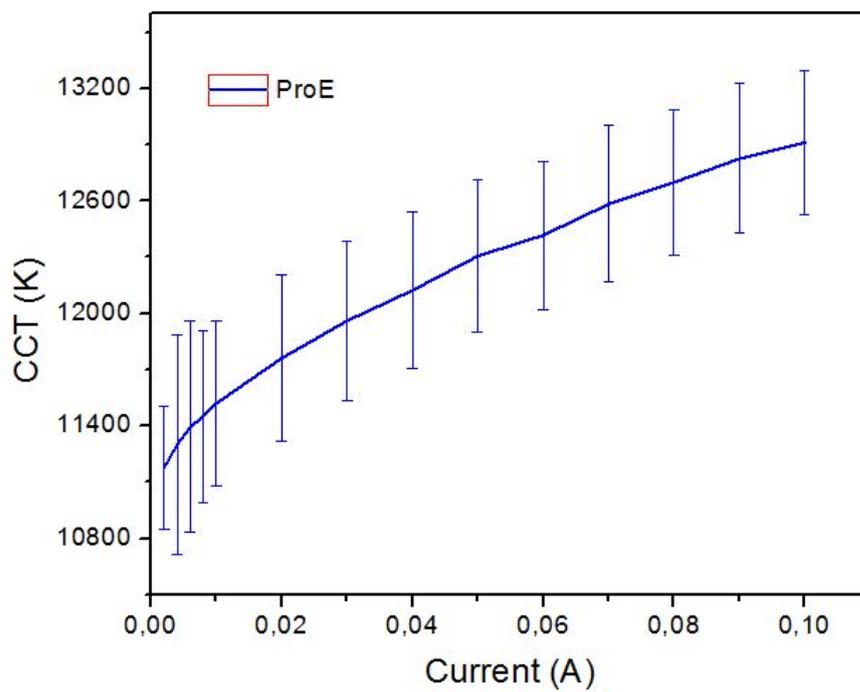
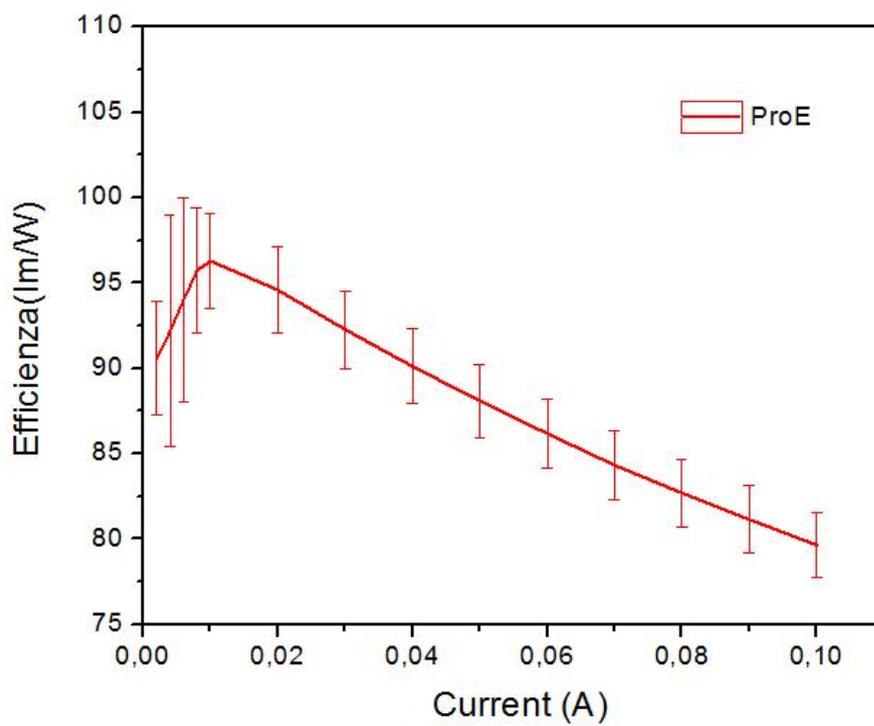


Figura 4.45: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



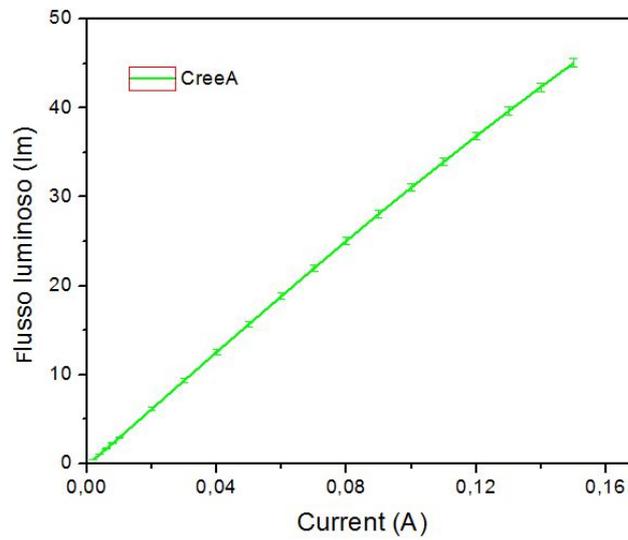
(a)



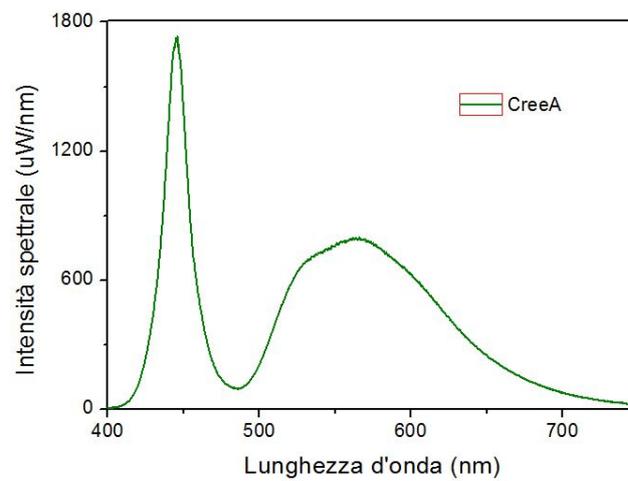
(b)

Figura 4.46: CCT (a) e efficienza(b)

CreeA La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

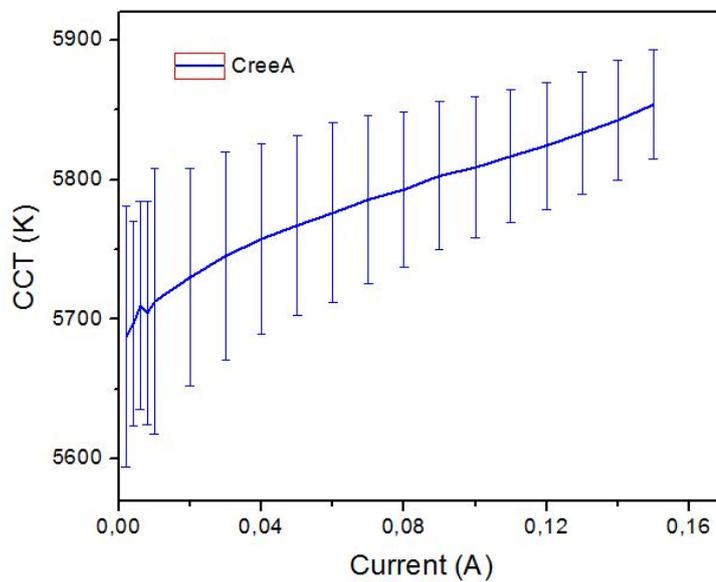


(a)

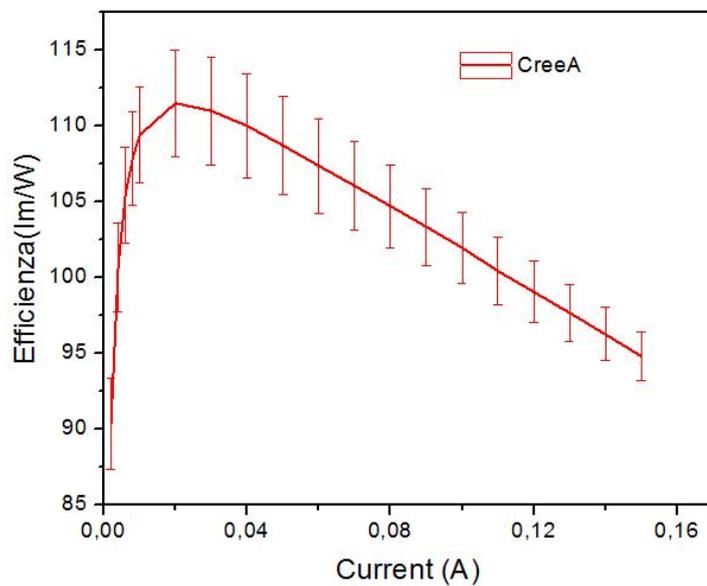


(b)

Figura 4.47: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



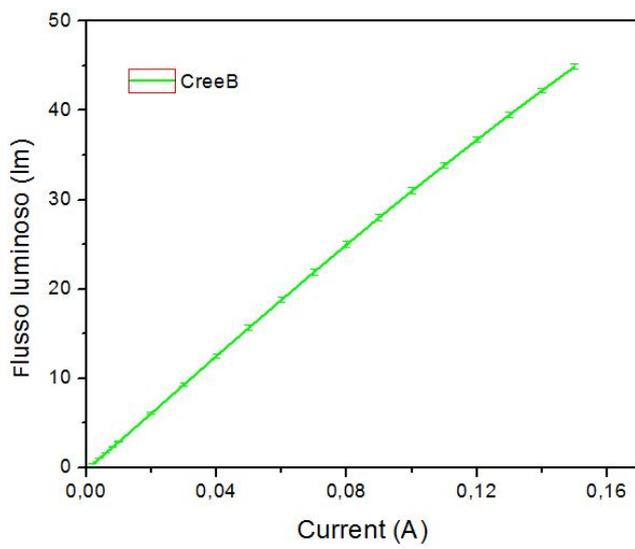
(a)



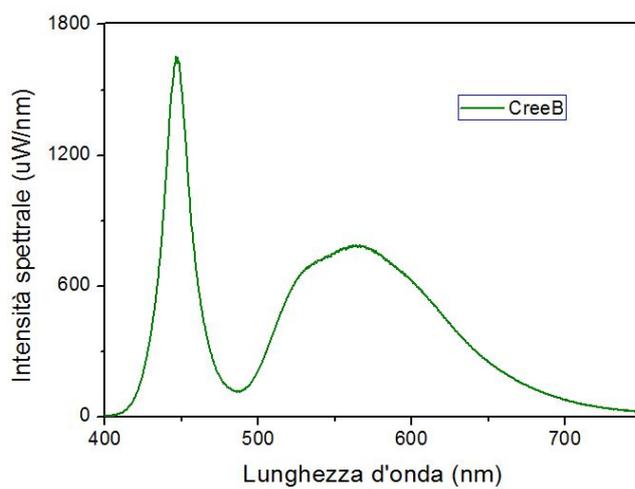
(b)

Figura 4.48: CCT (a) e efficienza(b)

CreeB La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

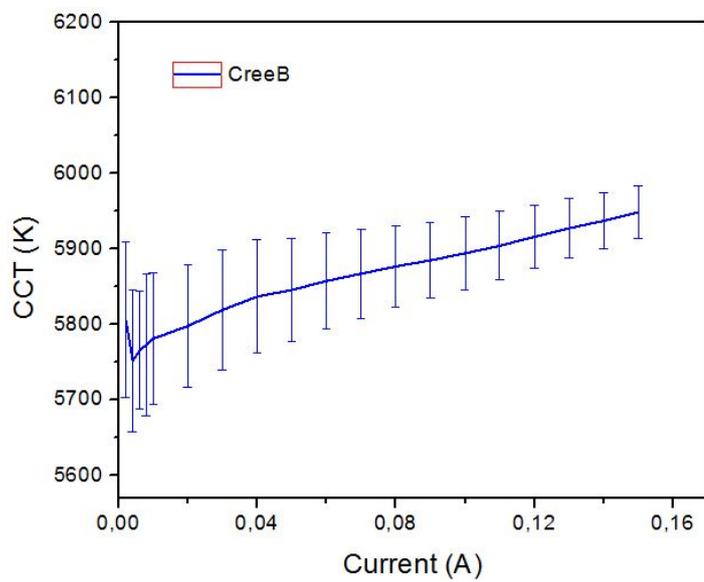


(a)

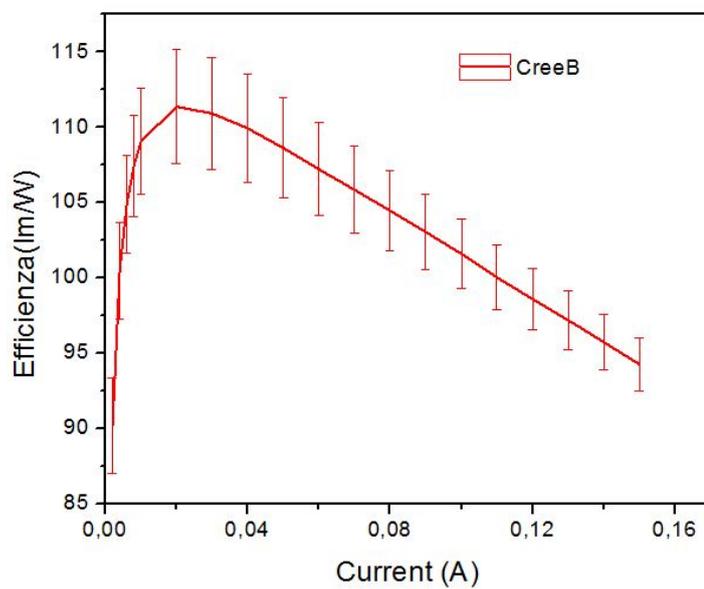


(b)

Figura 4.49: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



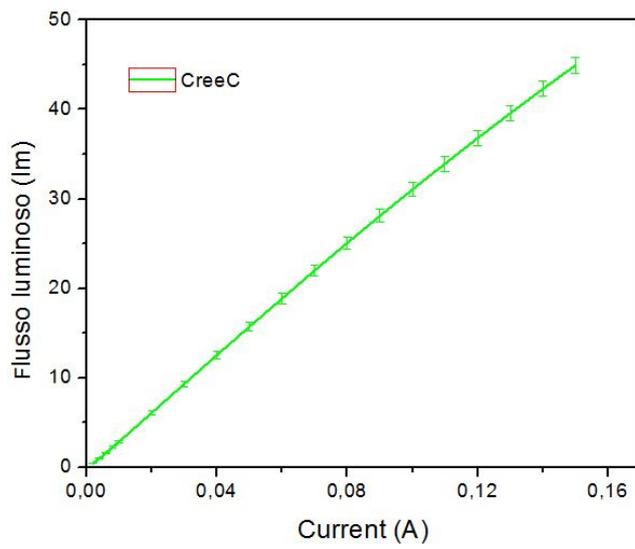
(a)



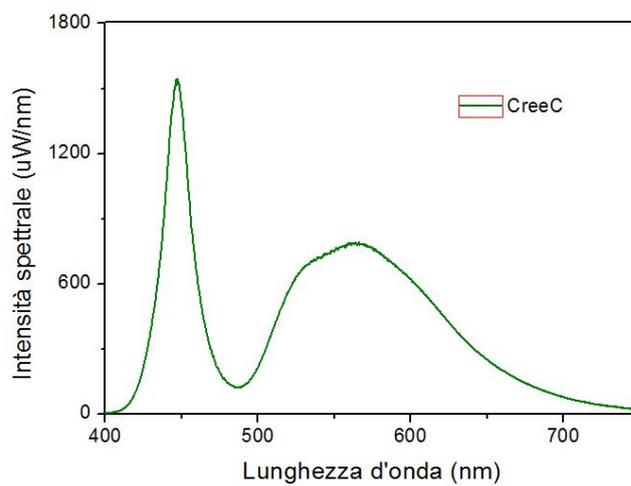
(b)

Figura 4.50: CCT (a) e efficienza(b)

CreeC La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

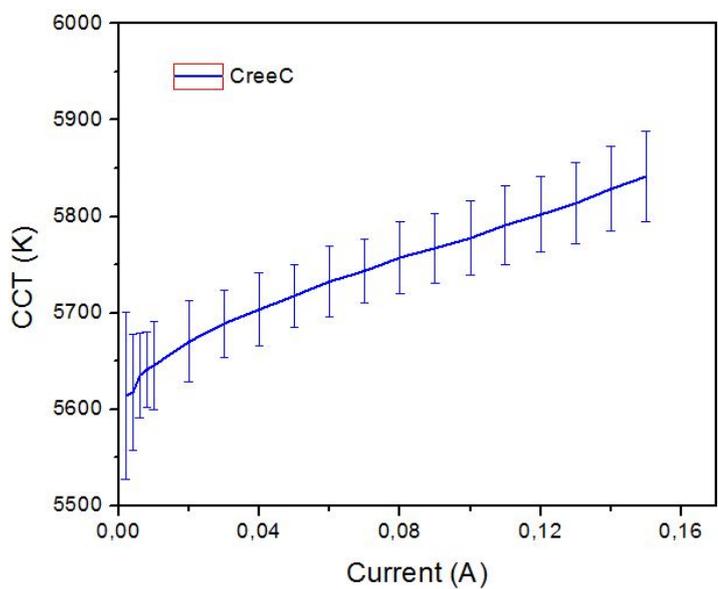


(a)

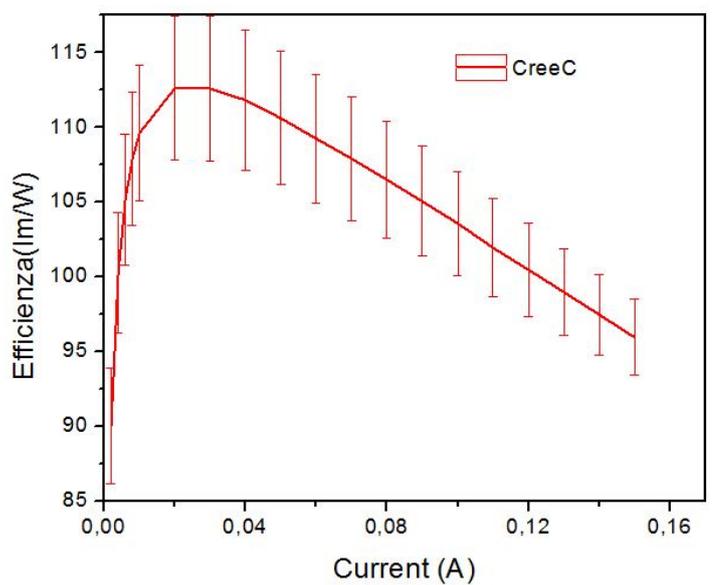


(b)

Figura 4.51: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



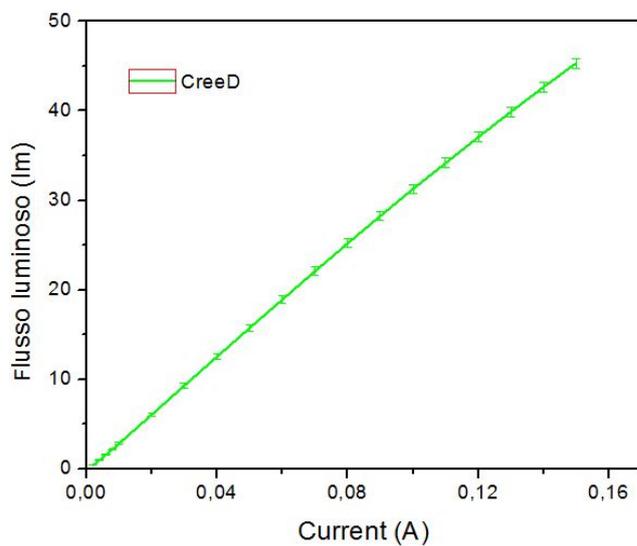
(a)



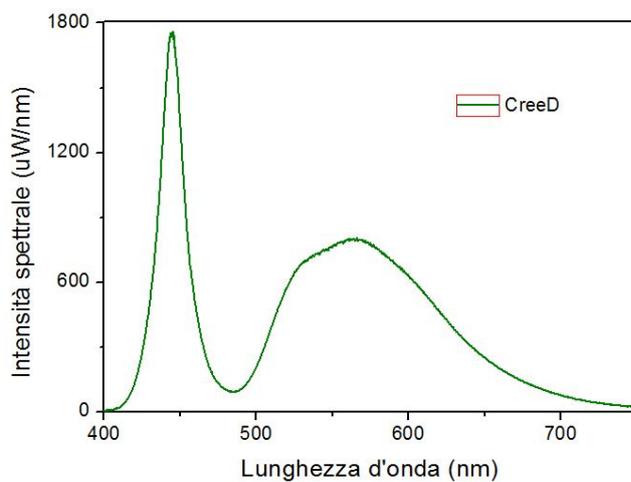
(b)

Figura 4.52: CCT (a) e efficienza(b)

CreeD La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

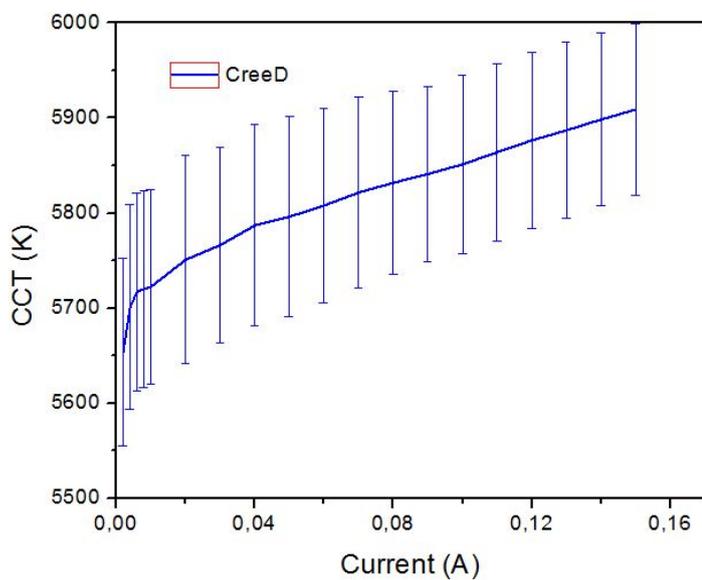


(a)

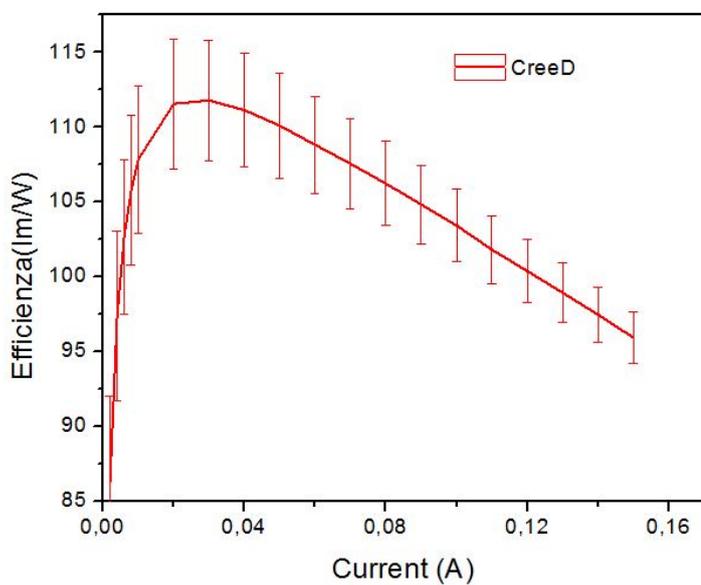


(b)

Figura 4.53: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



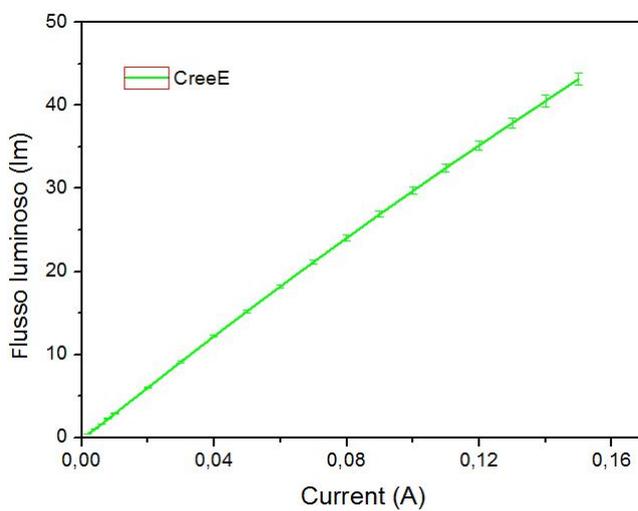
(a)



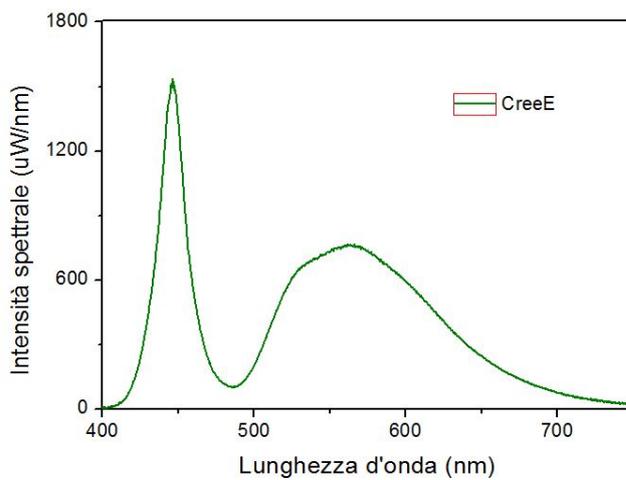
(b)

Figura 4.54: CCT (a) e efficienza(b)

CreeE La caratterizzazione ottica consiste nelle misure L-I, CCT-I e negli spettri.

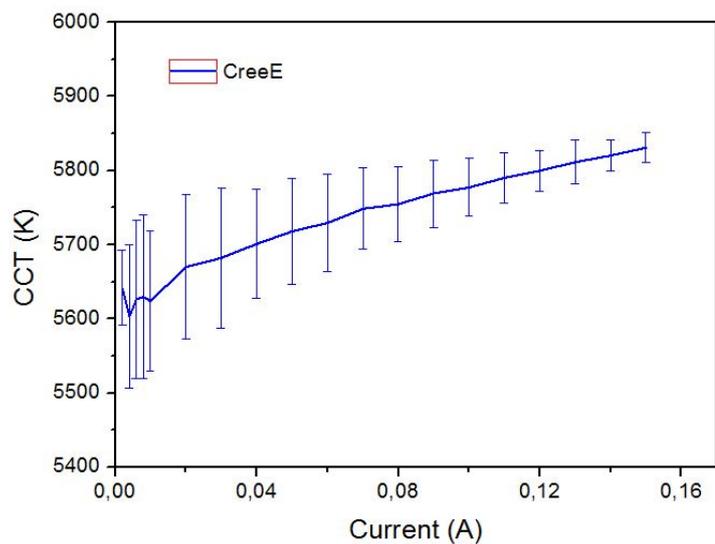


(a)

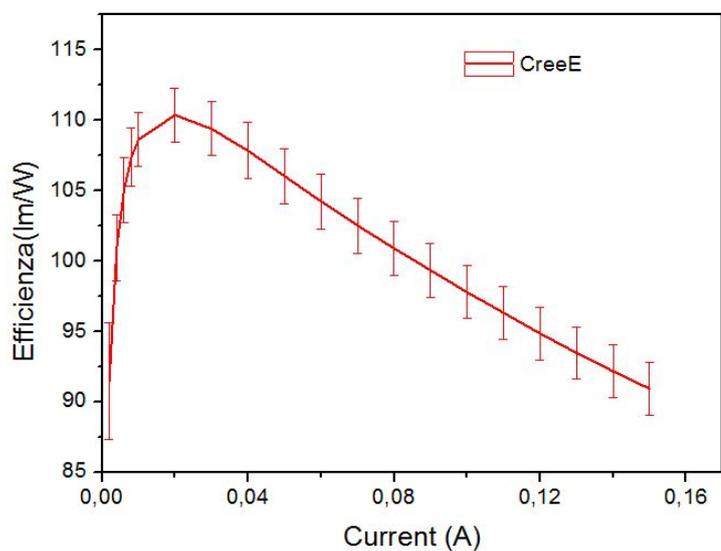


(b)

Figura 4.55: Flusso luminoso (a) e spettro(b)



(a)



(b)

Figura 4.56: CCT (a) e efficienza(b)

4.2 Risultati stress

4.2.1 Cree ML-E

Cree A: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=75\text{mA}$

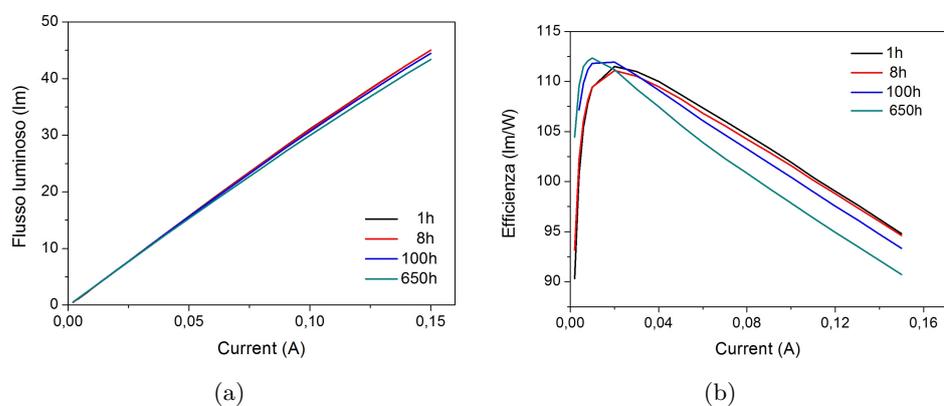


Figura 4.57: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

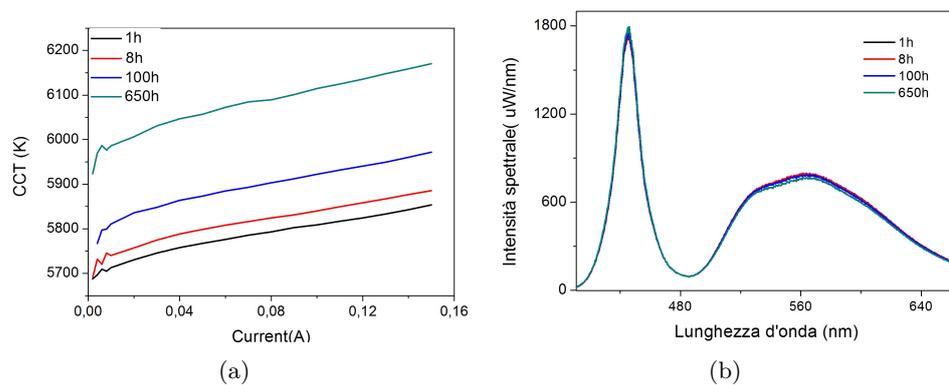


Figura 4.58: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

Risultati

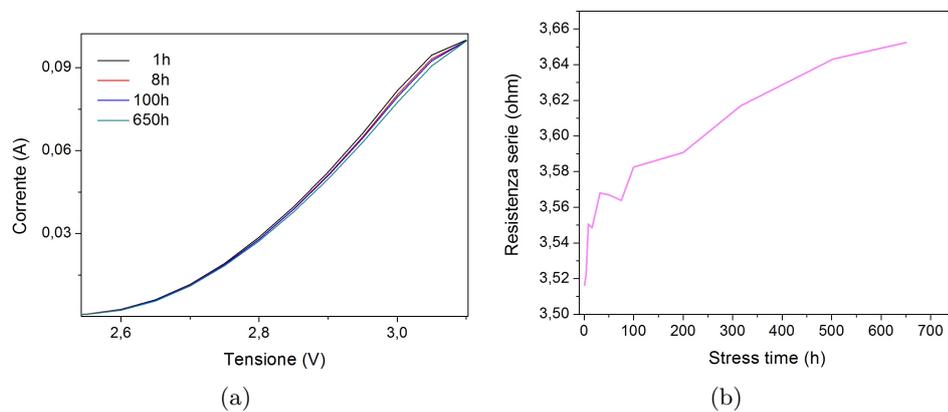


Figura 4.59: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

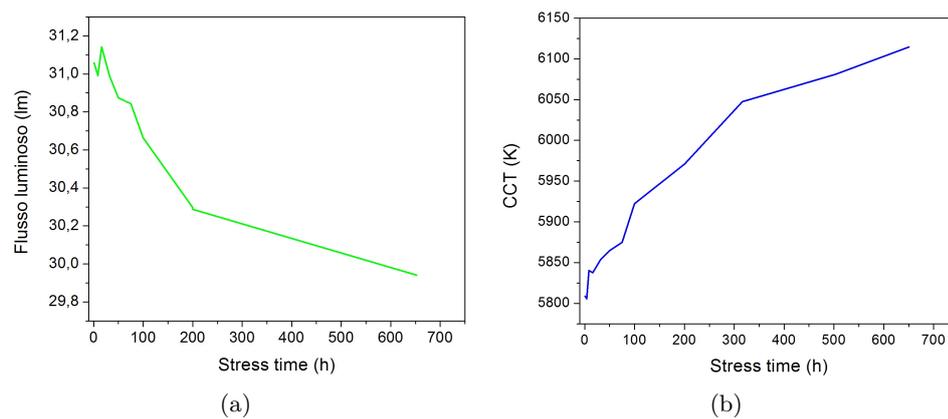


Figura 4.60: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Cree B: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{mA}$

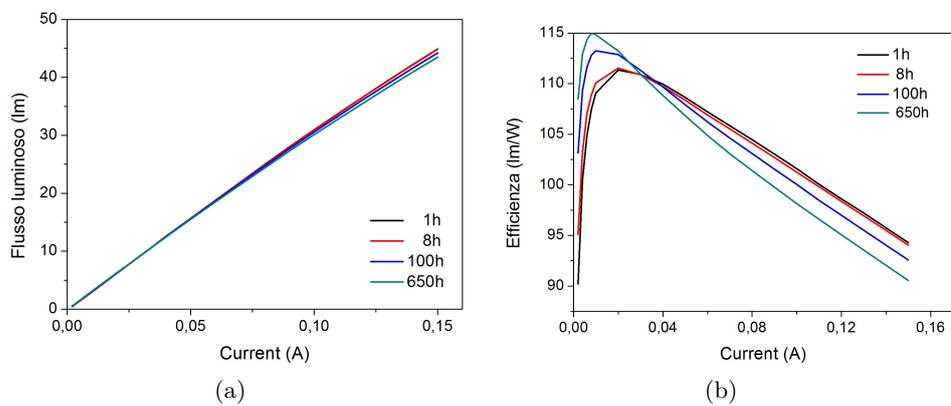


Figura 4.61: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

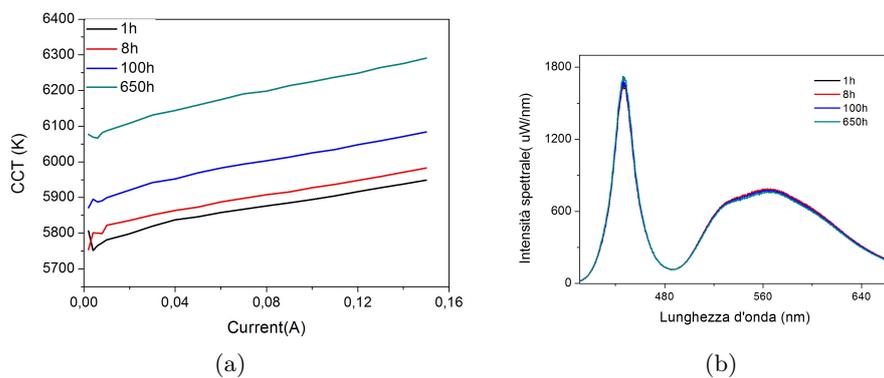


Figura 4.62: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

Risultati

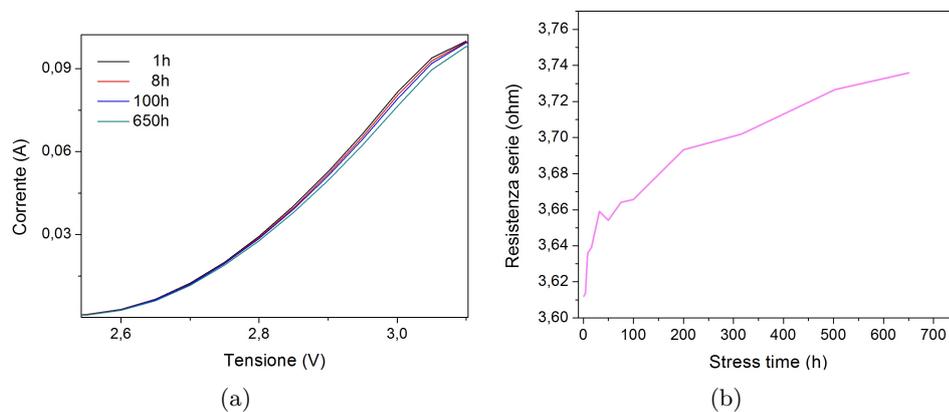


Figura 4.63: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

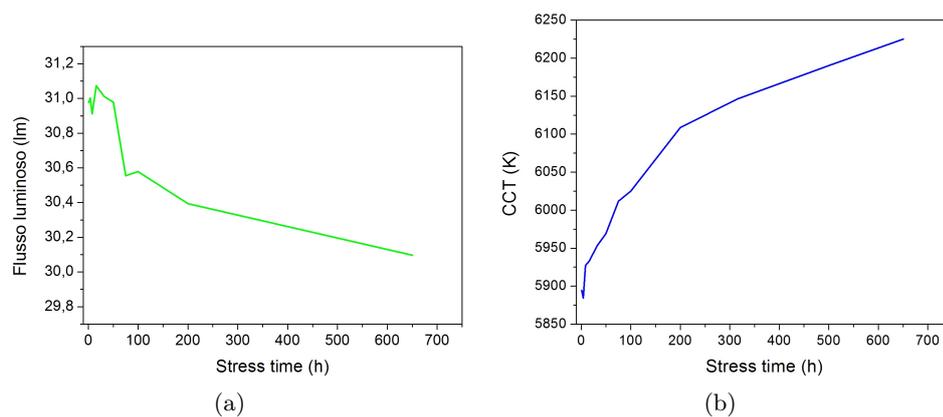


Figura 4.64: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Cree C: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=150\text{mA}$

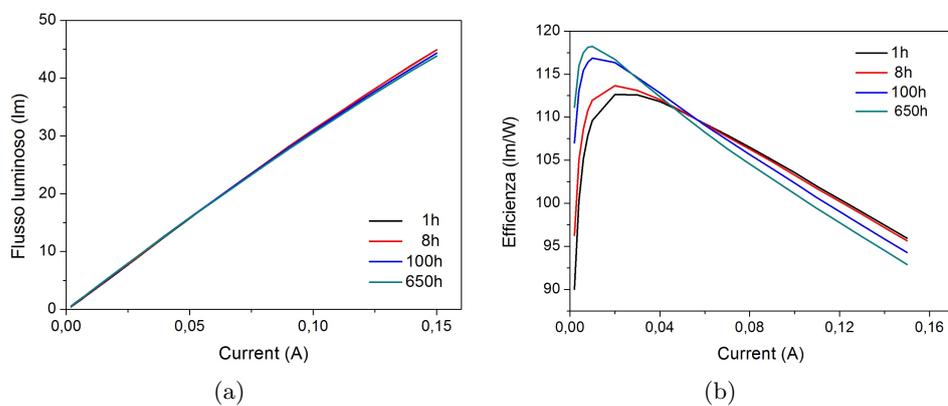


Figura 4.65: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

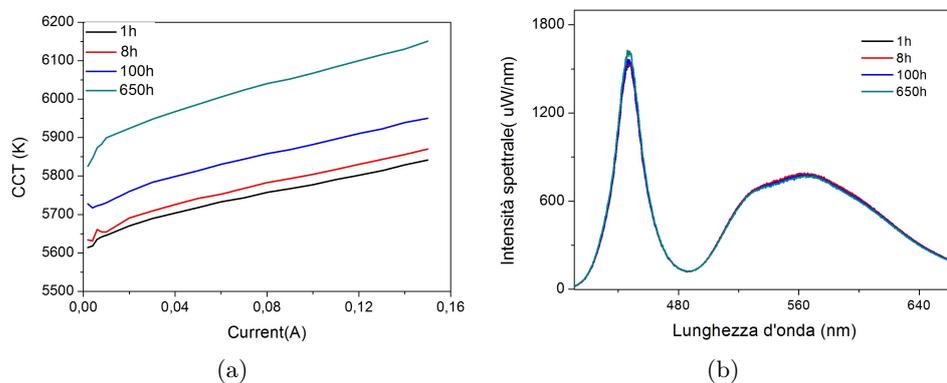


Figura 4.66: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

Risultati

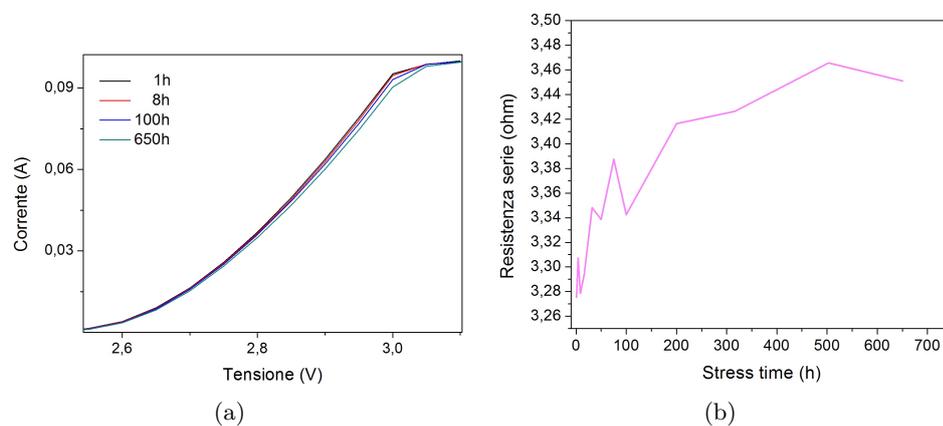


Figura 4.67: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

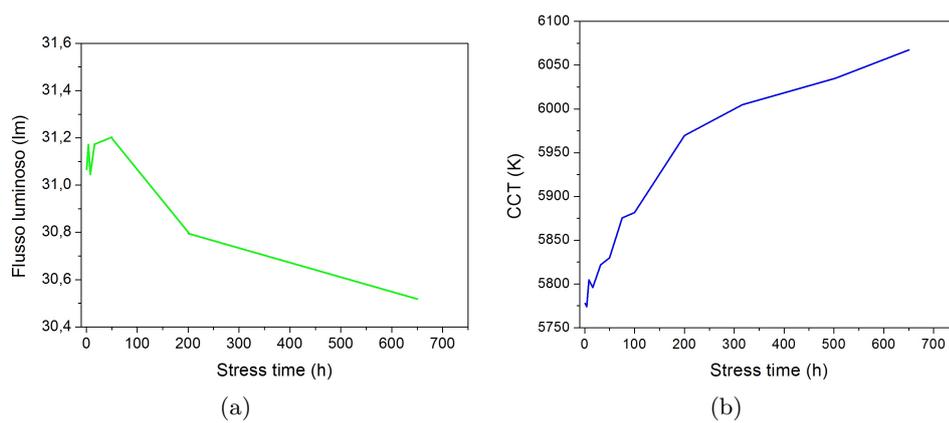


Figura 4.68: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Cree D: $T=65^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{mA}$

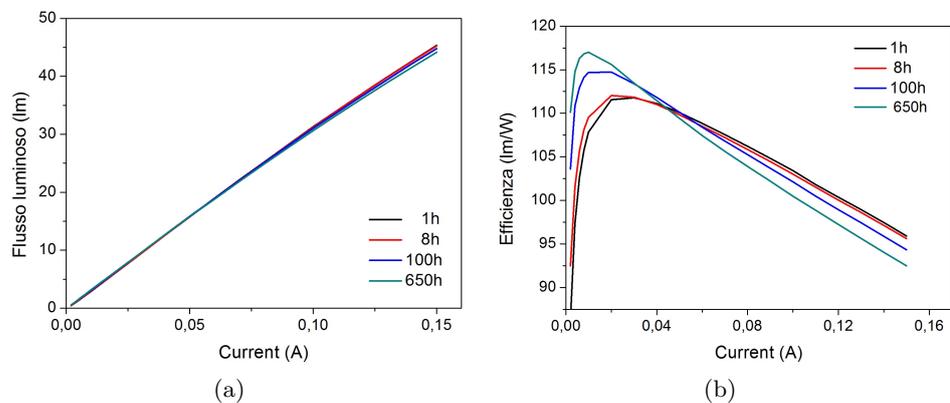


Figura 4.69: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

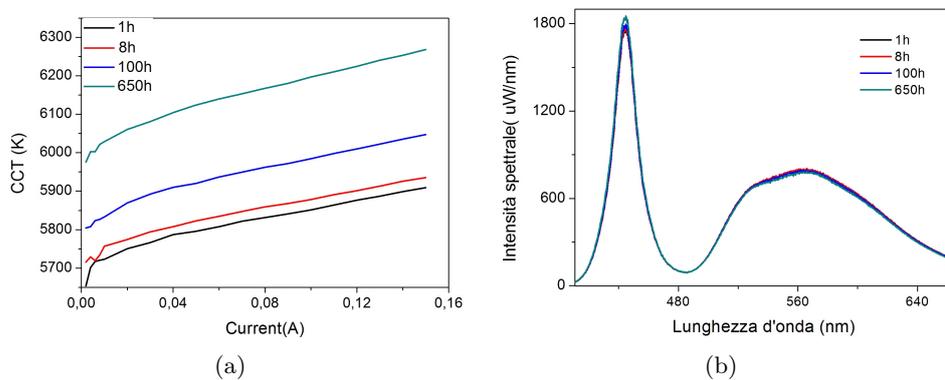


Figura 4.70: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

Risultati

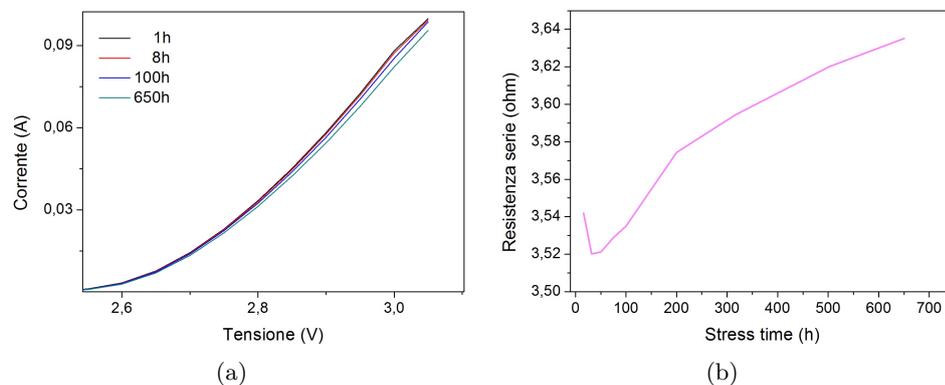


Figura 4.71: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

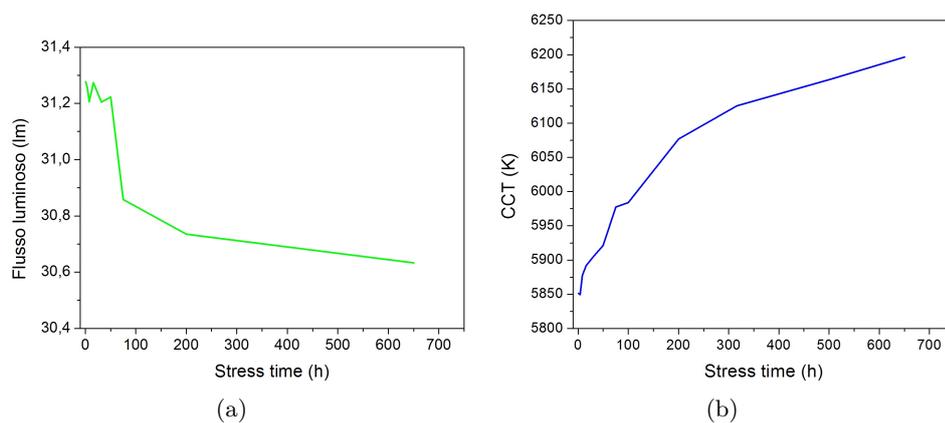


Figura 4.72: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Cree E: $T=85^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{mA}$

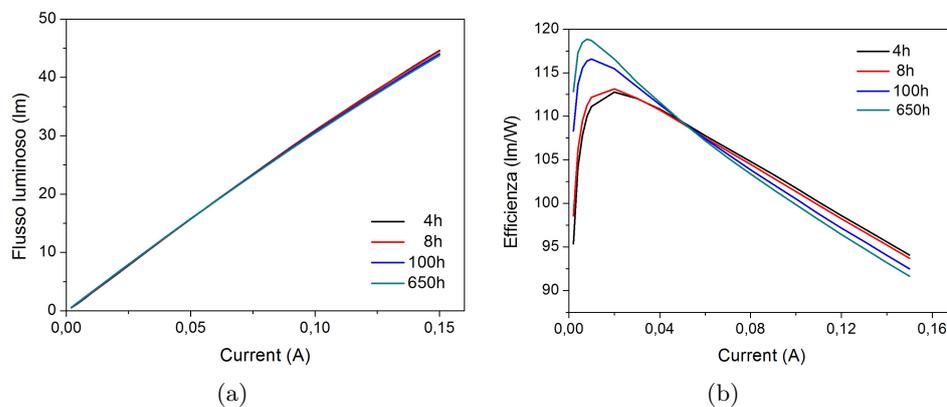


Figura 4.73: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

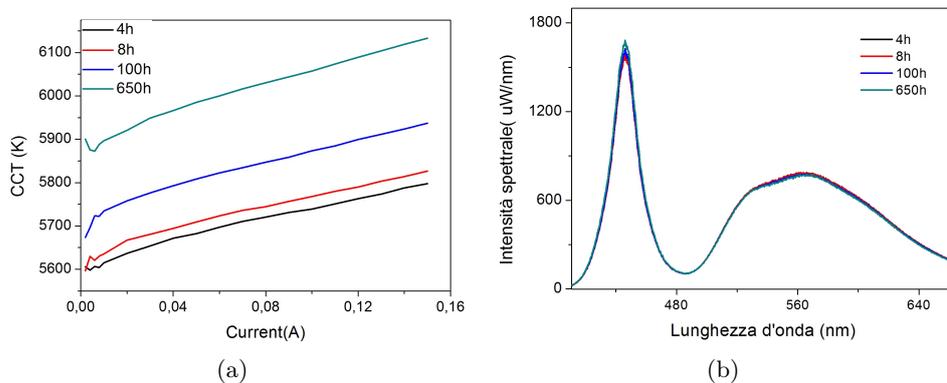


Figura 4.74: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

Risultati

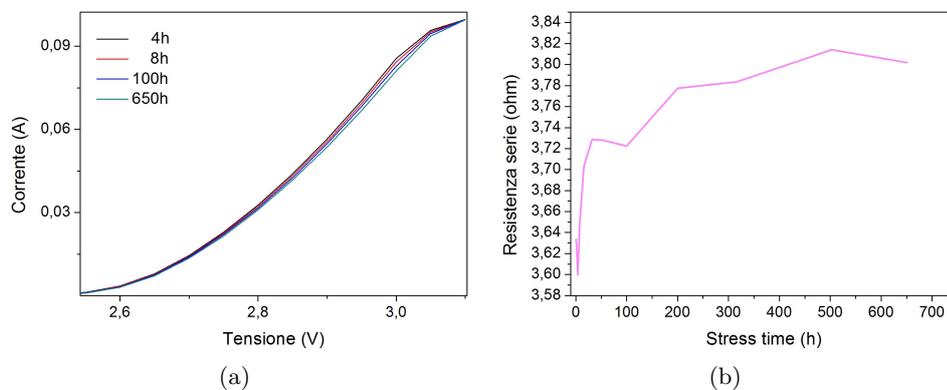


Figura 4.75: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

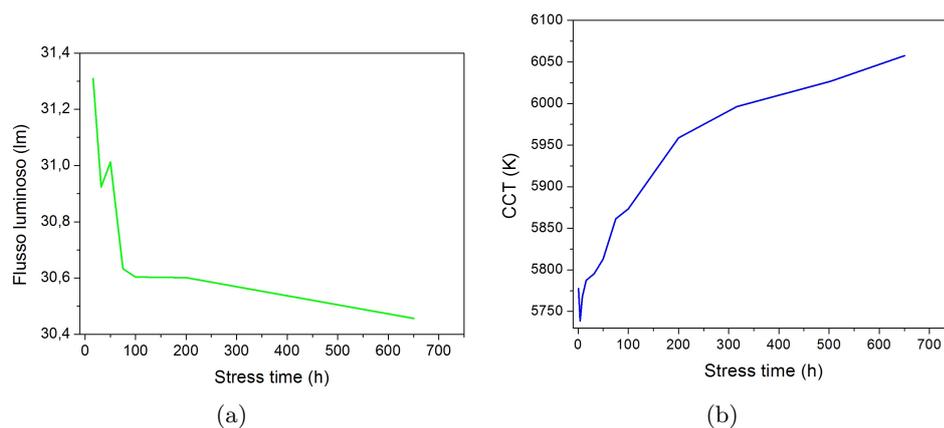


Figura 4.76: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Dai grafici che mostrano il variare dell'efficienza con le ore di stress si può notare come con l'aumento delle ore di stress il picco dell'efficienza si sposti leggermente a correnti più basse. Analizzando invece la variazione della temperatura di colore si vede che questa è indipendente dalle correnti di comando, il che è giustificato dal fatto che per ora domina il degrado dei fosfori che è indipendente dalla corrente.

Confronti tra diverse condizioni di stress

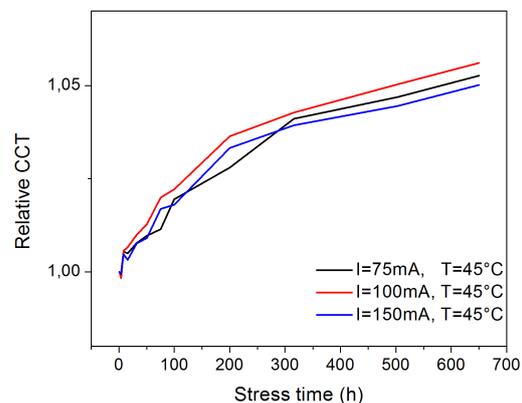


Figura 4.77: Confronto tra la temperatura di colore misurata a 100mA durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

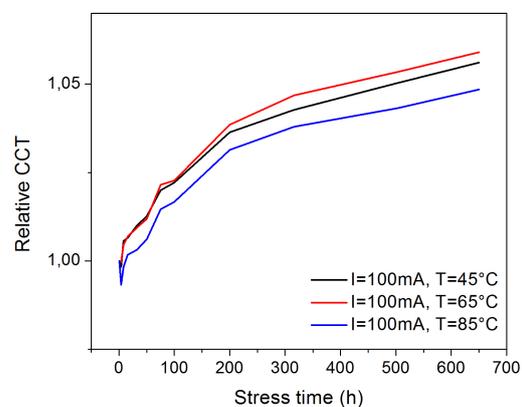


Figura 4.78: Confronto tra la temperatura di colore misurata a 100mA durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Dalle misure precedenti si evidenzia un aumento della temperatura di colore dei led Cree durante tutte le condizioni di stress. Dopo 650h di stress l'aumento del CCT è di circa il 5% rispetto al valore iniziale e non c'è una particolare dipendenza dalle condizioni di temperatura e corrente di stress.

Risultati

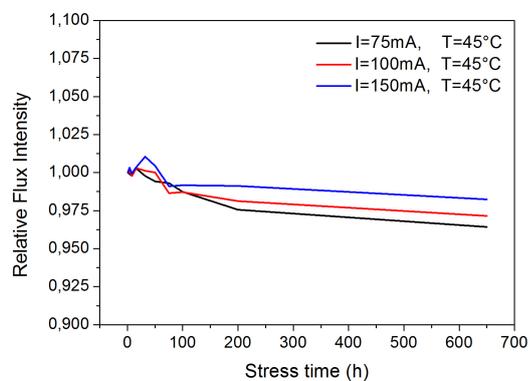


Figura 4.79: Confronto tra il flusso luminoso misurato a 100mA durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

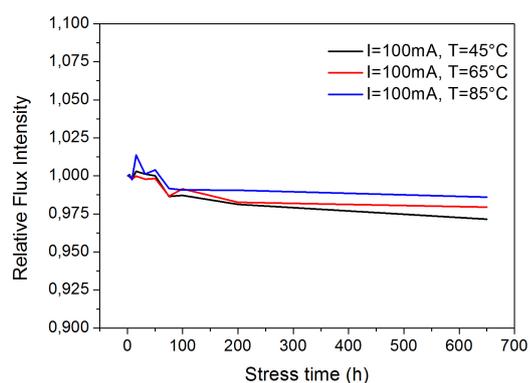


Figura 4.80: Confronto tra il flusso luminoso misurato a 100mA durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Le misure di intensità di flusso effettuate durante le prove di degrado mostrano un calo dell'emissione di circa 3% dopo 650h di stress rispetto al valore iniziale per i led Cree e non c'è una determinata dipendenza dalle condizioni di stress.

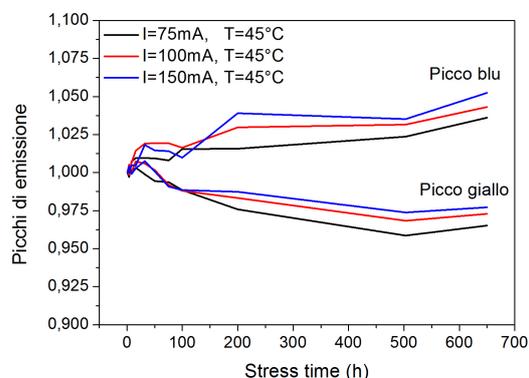


Figura 4.81: Confronto dell' intensità dei picchi blu e giallo misurato a 150mA per i led Cree durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

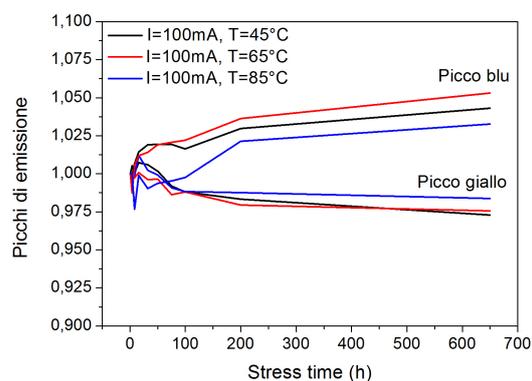


Figura 4.82: Confronto dell' intensità dei picchi blu e giallo misurato a 150mA per i led Cree durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Come si può vedere dopo 650h di stress il picco di emissione del chip led (picco blu) è aumentato di circa il 4% mentre il picco di emissione dei fosfori (picco giallo) è diminuito di circa il 3%. Quindi non si è rilevato un sensibile degrado dei chip led ma semplicemente dei package/fosfori di conversione. Con il degrado dei fosfori c'è una minor efficienza di conversione della radiazione blu in radiazione gialla e quindi si ha la percezione che la radiazione blu emessa dal led aumenti e che diminuisca quella gialla.

Risultati

4.2.2 ProLight TLWE

ProLight A: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=50\text{mA}$

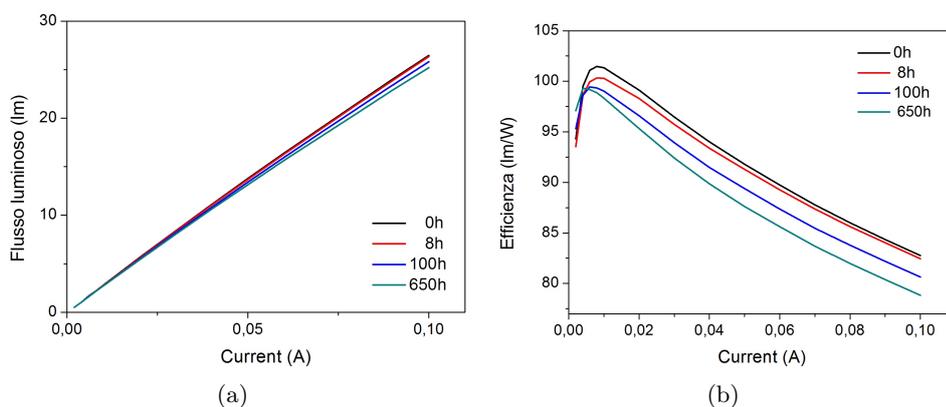


Figura 4.83: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

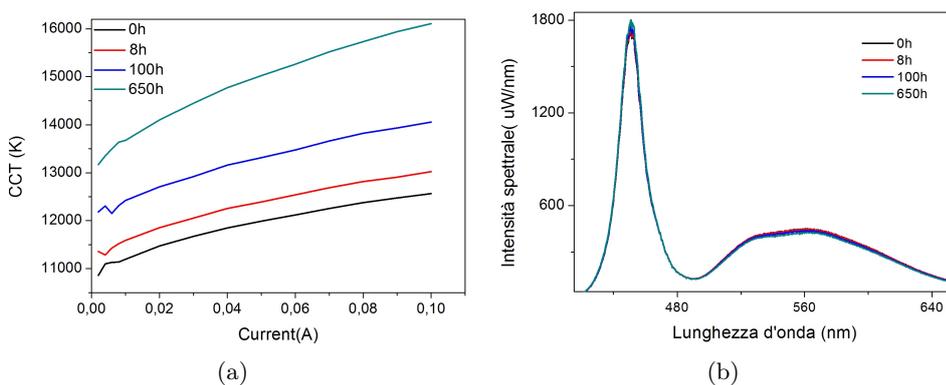


Figura 4.84: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

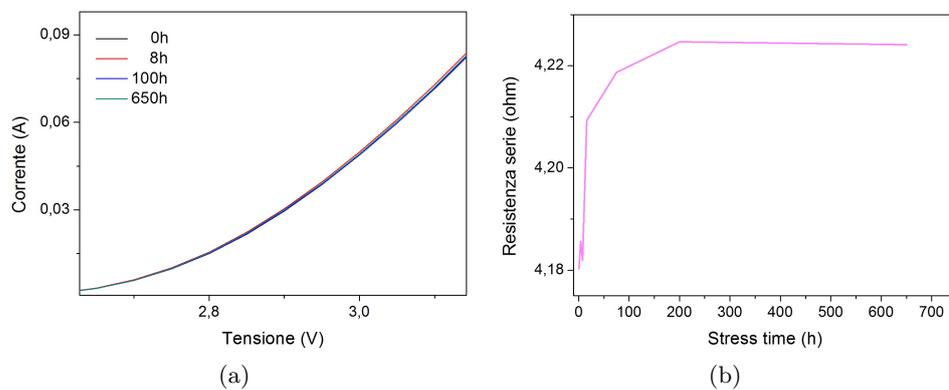


Figura 4.85: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

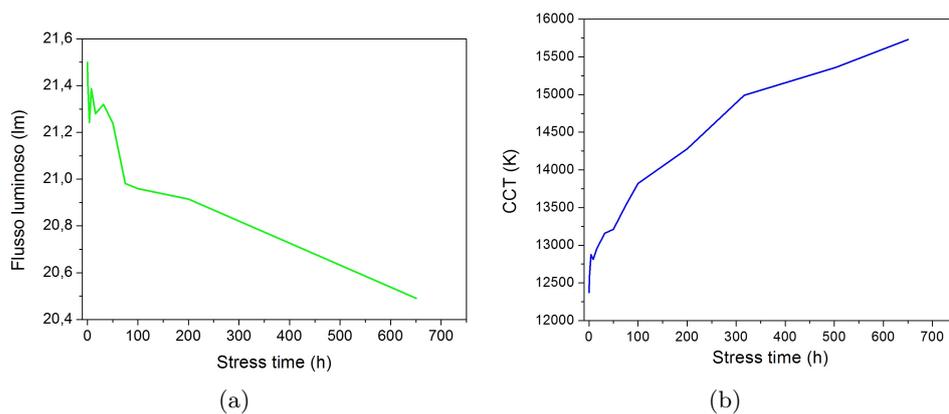


Figura 4.86: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Risultati

ProLight B: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=75\text{mA}$

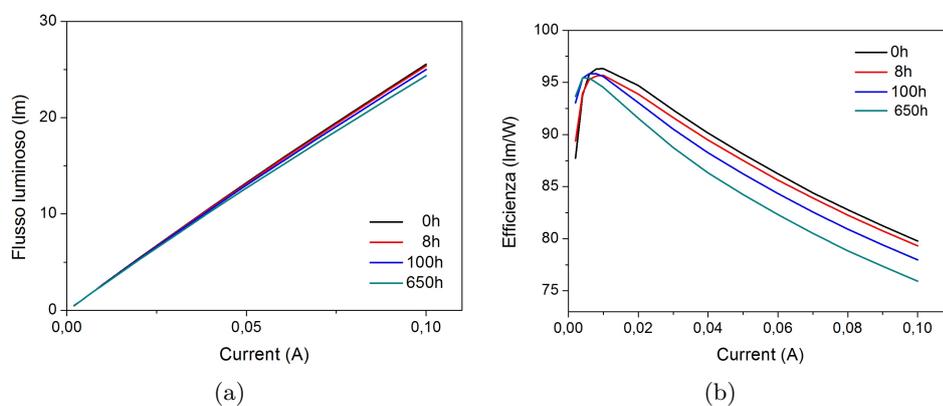


Figura 4.87: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

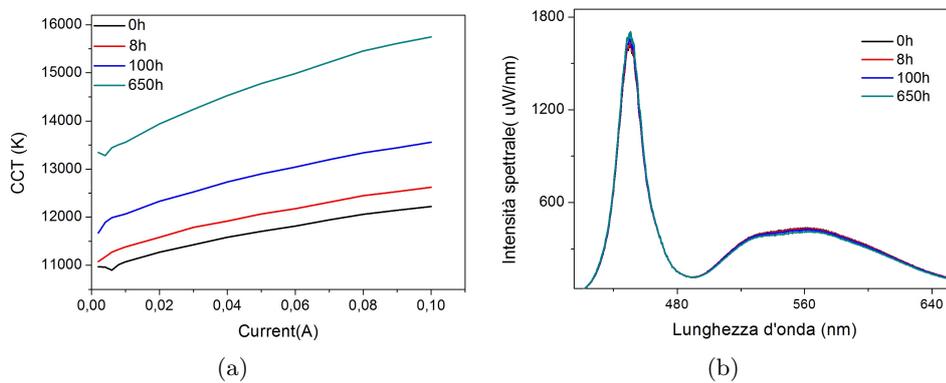


Figura 4.88: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

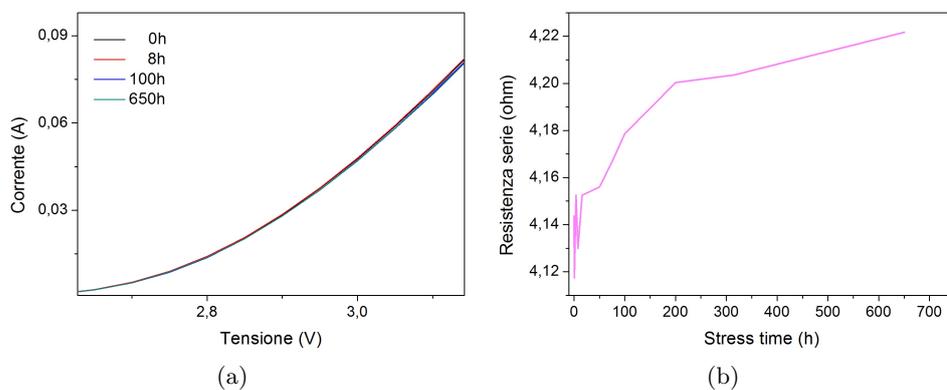


Figura 4.89: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

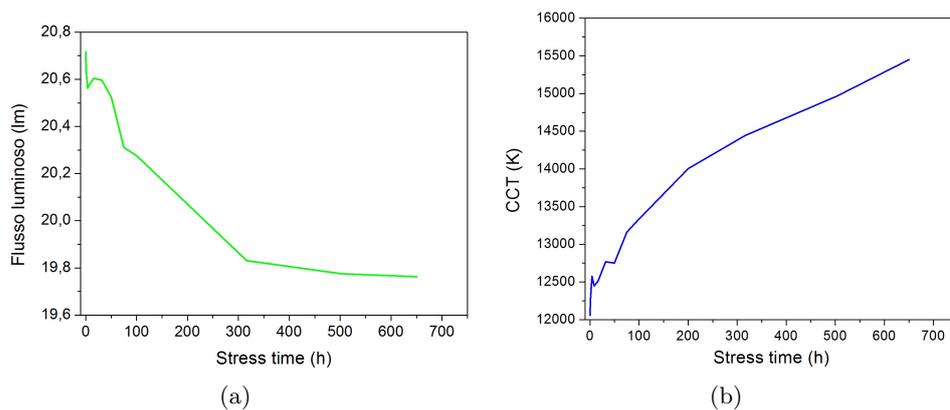


Figura 4.90: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Risultati

ProLight C: $T=45^{\circ}\text{C}$, $I=100\text{mA}$

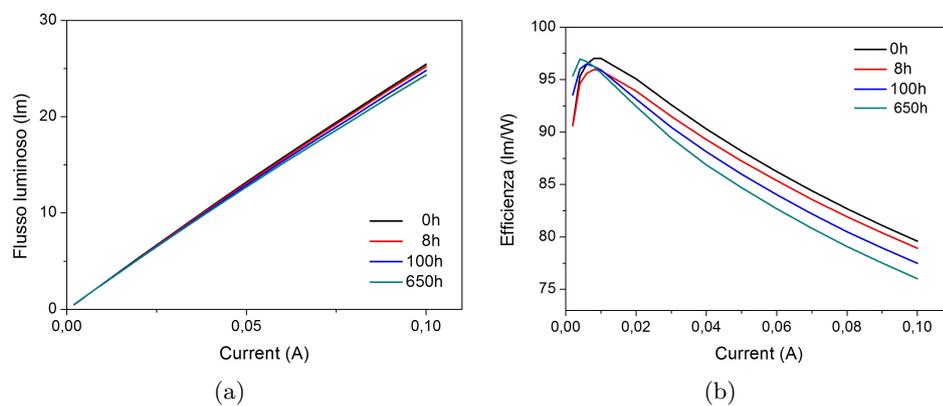


Figura 4.91: Flusso luminoso (a),efficienza(b) dopo varie ore di stress

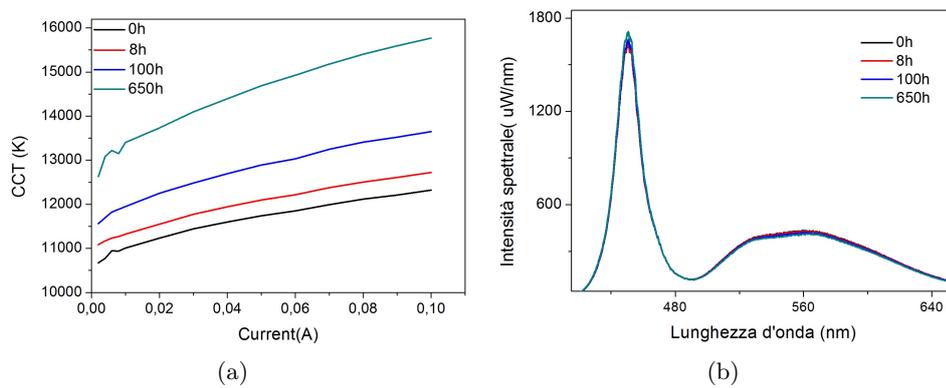


Figura 4.92: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

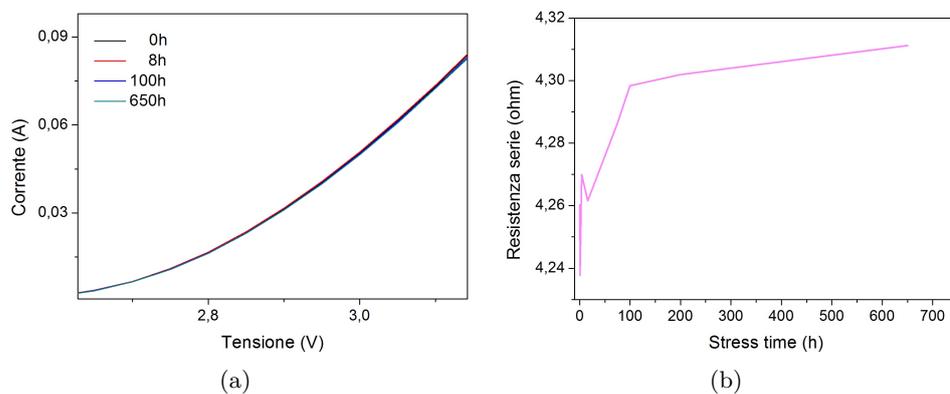


Figura 4.93: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

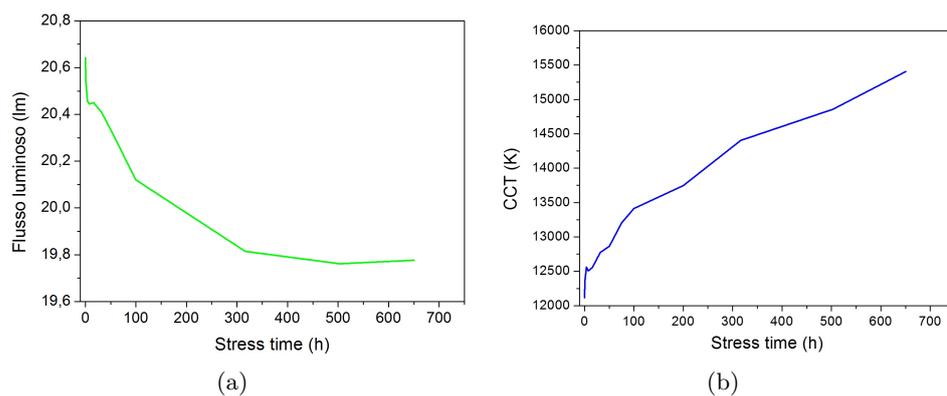


Figura 4.94: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Risultati

ProLight D: $T=65^{\circ}\text{C}$, $I=75\text{mA}$

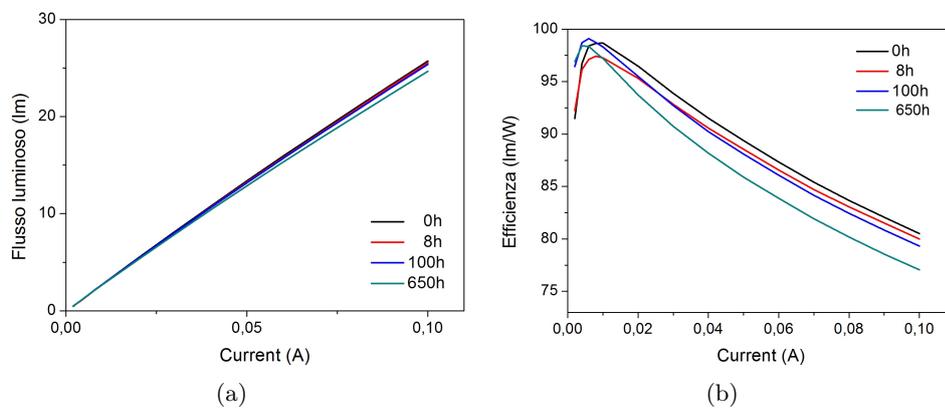


Figura 4.95: Flusso luminoso (a), efficienza(b) dopo varie ore di stress

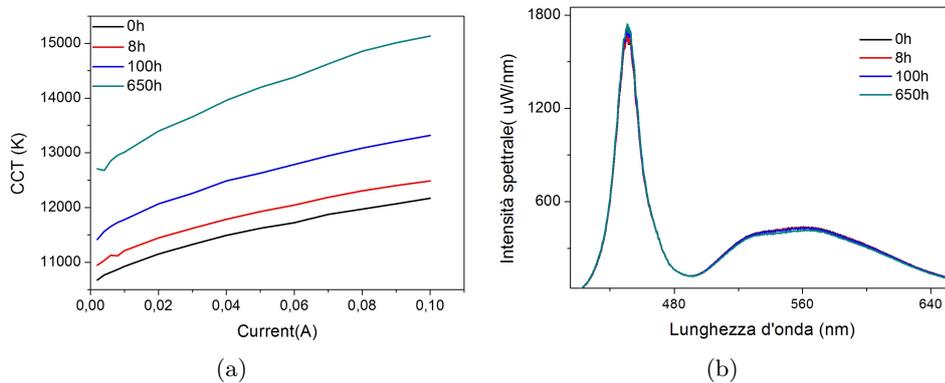


Figura 4.96: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

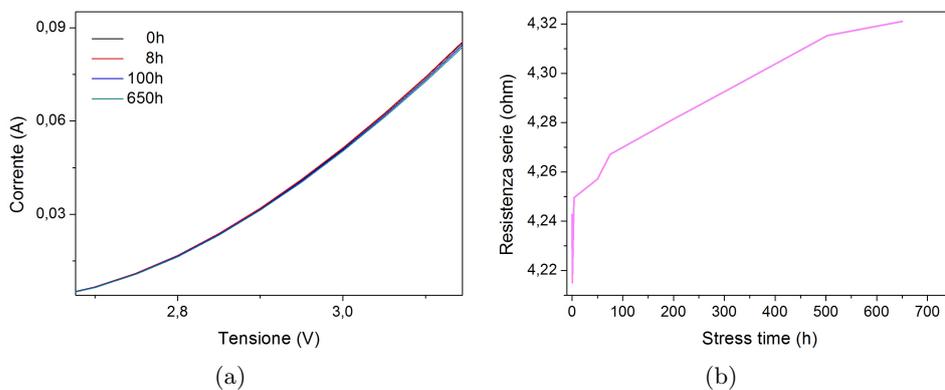


Figura 4.97: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

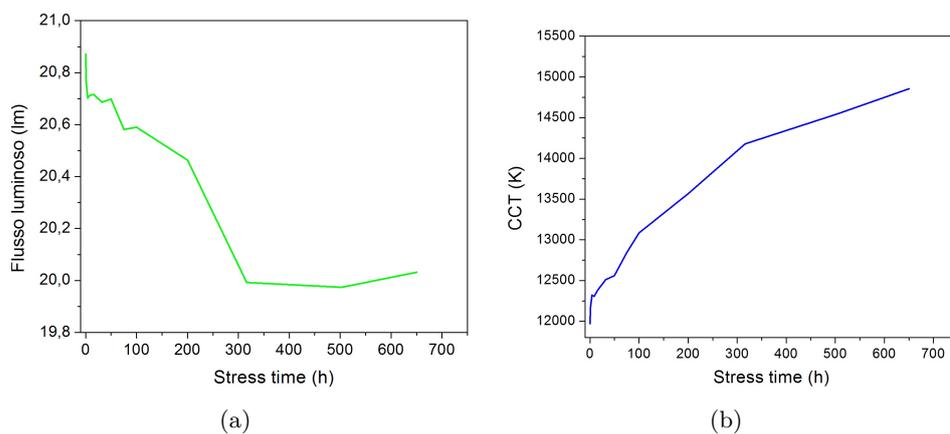


Figura 4.98: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Risultati

ProLight E: $T=85^{\circ}\text{C}$, $I=75\text{mA}$

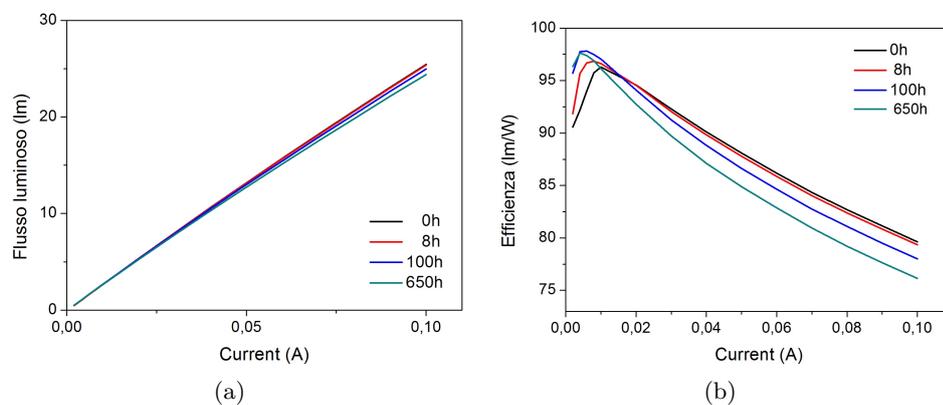


Figura 4.99: Flusso luminoso (a), efficienza(b) dopo varie ore di stress

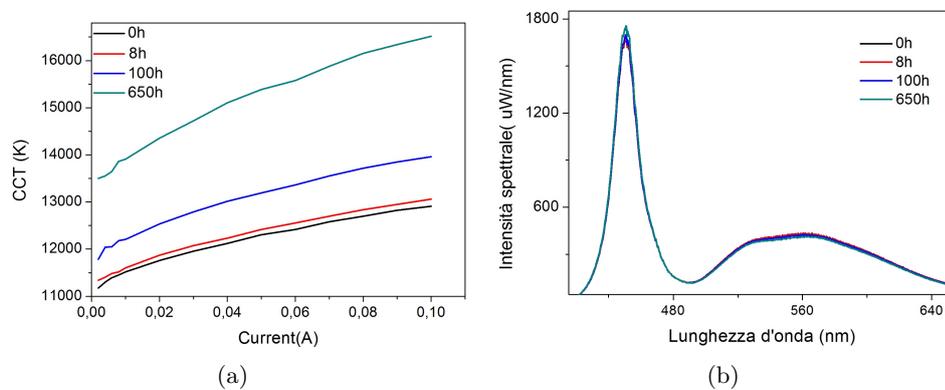


Figura 4.100: CCT(a), spettro(b) dopo varie ore di stress

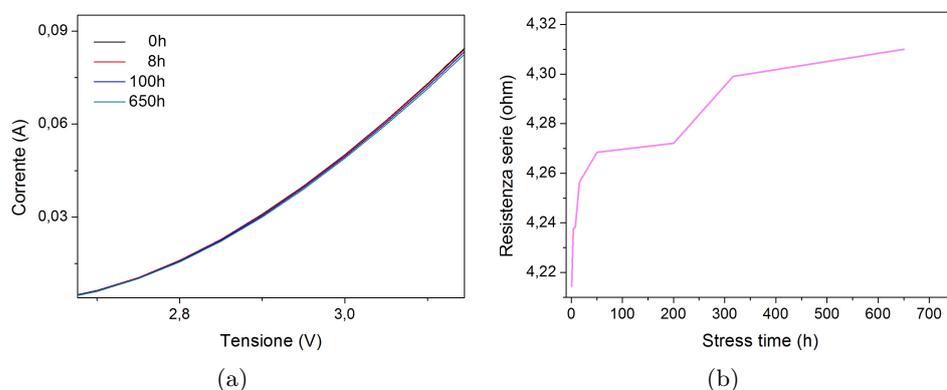


Figura 4.101: I-V dopo varie ore di stress (a) e dinamica della resistenza serie(b)

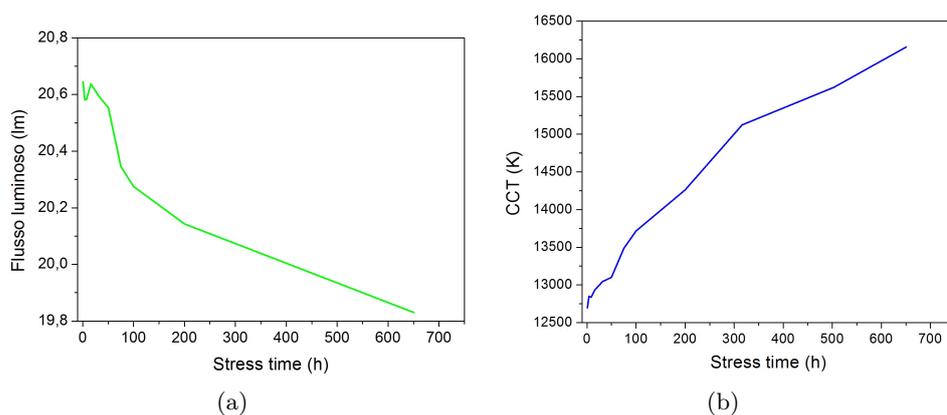


Figura 4.102: Dinamica del flusso luminoso (a) e del CCT(b)

Dai grafici che mostrano il variare dell'efficienza con le ore di stress si può notare come con l'aumento delle ore di stress il picco dell'efficienza si sposti leggermente a correnti più basse. Analizzando invece la variazione della temperatura di colore si vede che questa aumenta in maniera leggermente maggiore a correnti di comando più alte a differenza che nei led Cree.

Confronti tra diverse condizioni di stress

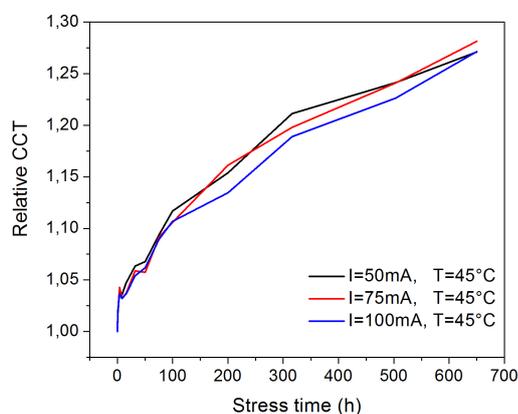


Figura 4.103: Confronto tra la temperatura di colore misurata a 80mA durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

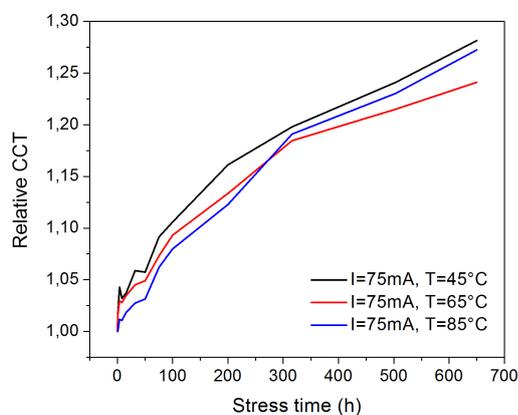


Figura 4.104: Confronto tra la temperatura di colore misurata a 80mA durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Dalle misure precedenti si evidenzia un aumento della temperatura di colore dei led ProLight durante tutte le condizioni di stress. Dopo 650h di stress l'aumento del CCT è di circa il 25% rispetto al valore iniziale e non c'è una particolare dipendenza dalle condizioni di temperatura e corrente di

stress. Questa grossa differenza tra le temperature di colore non si riesce a vedere ad occhio nudo.

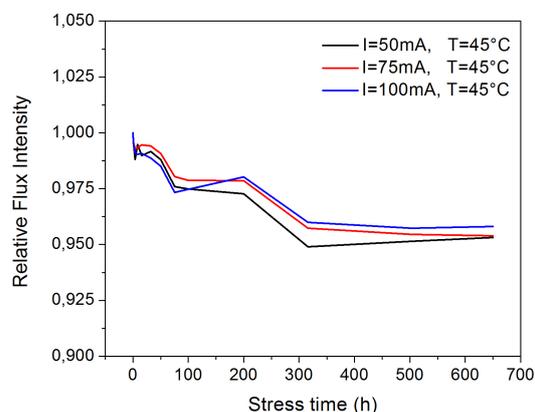


Figura 4.105: Confronto tra il flusso luminoso misurato a 80mA durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

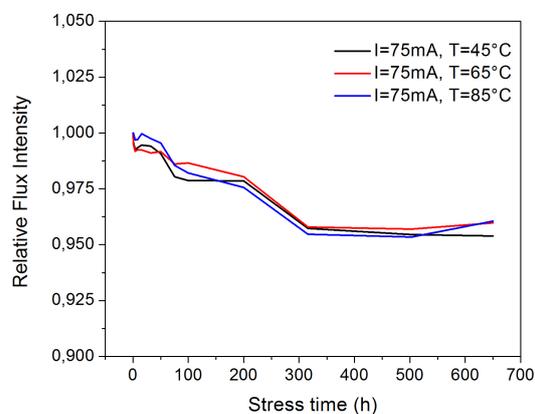


Figura 4.106: Confronto tra il flusso luminoso misurato a 80mA durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Le misure di intensità di flusso effettuate durante le prove di degrado mostrano un calo dell'emissione di circa 4-5% dopo 650h di stress rispetto al valore iniziale per i led Prolight e non c'è una determinata dipendenza dalle condizioni di stress.

Risultati

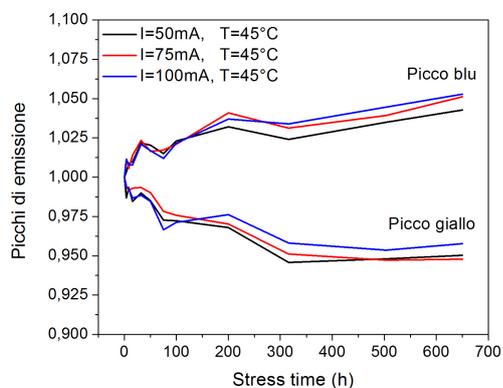


Figura 4.107: Confronto dell' intensità dei picchi blu e giallo misurato a 100mA per i led Prolight durante il degrado dei dispositivi a diverse correnti di stress

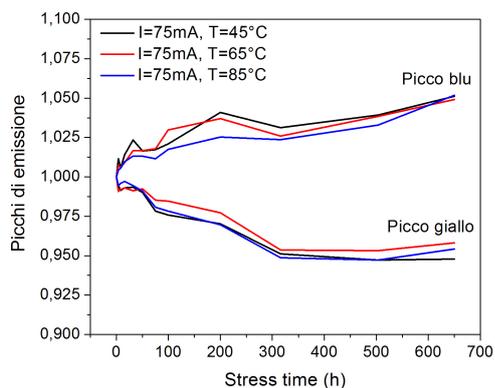


Figura 4.108: Confronto dell' intensità dei picchi blu e giallo misurato a 100mA per i led Prolight durante il degrado dei dispositivi a diverse temperature di stress

Come si può vedere dopo 650h di stress il picco di emissione del chip led (picco blu) è aumentato di circa il 5% mentre il picco di emissione dei fosfori (picco giallo) è diminuito di circa il 5%. Quindi non si è rilevato un sensibile degrado dei chip led ma semplicemente dei package/fosfori di conversione. Con il degrado dei fosfori c'è una minor efficienza di conversione della radiazione blu in radiazione gialla e quindi si ha la percezione che la radiazione blu emessa dal led aumenti e che diminuisca quella gialla.

CAPITOLO

5

CONCLUSIONI

Riassumiamo brevemente i risultati più importanti ottenuti durante la tesi.

Il lavoro svolto consiste di 2 fasi:

1. Caratterizzazione delle proprietà elettriche, ottiche e termiche di strutture di led bianchi commerciali di due diversi produttori.
2. Analisi di degrado a diverse condizioni operative e comparazione tra led commerciali di due diversi produttori

Per quanto riguarda la caratterizzazione è stata fatta la caratterizzazione elettrica, ottica e termica dei led Cree ML-E e dei Prolight TLWE. Facendo il confronto tra essi si è vista la superiorità prestazionale dei Cree ML-E e la grande differenza nella temperatura di colore dei due tipi di led. Infatti i Prolight hanno una temperatura di colore intorno ai 10000K molto maggiore rispetto ai Cree (6000K) e quindi emettono un bianco più freddo tendente al blu. Inoltre si può vedere dalle caratteristiche I-V in scala logaritmica la presenza di un diodo zener di protezione per la polarizzazione inversa nei Cree che invece non c'è nei Prolight.

Per studiare l'affidabilità si sono scelte 5 condizioni di stress diverse per ogni tipo di led e si è fatto lo stress in corrente e temperatura. Si sono prese 3 condizioni di stress a corrente costante e temperatura variabile e 3 a temperatura costante e corrente variabile per vedere separatamente gli effetti

Conclusioni

dello stress. Alla fine di questo lavoro si è arrivati a 650 ore di stress e a questi risultati:

- le misure del flusso luminoso effettuate dopo 650 ore di degrado mostrano un calo dell'emissione di circa 4–5% rispetto al valore iniziale per i led Prolight e del 3% per i led Cree.
- per entrambi i dispositivi Cree e Prolight si evidenzia un aumento della temperatura di colore,rispettivamente del 5% e del 25% dopo 650 ore di stress. La variazione del punto di bianco risulta molto più marcata per i led Prolight che non per i led Cree e questo è messo in evidenza dal maggiore distanziamento durante il degrado tra i due picchi di emissione del chip led (picco blu) e dei fosfori (picco giallo). Quindi è stata maggiore la riduzione dell'efficienza dei fosfori per i led Prolight.
- i risultati del degrado su entrambi i tipi di led non mostrano dopo 650 ore una particolare dipendenza dalle condizioni di corrente e temperatura di stress. Fino a questo momento infatti non si è rilevato un sensibile degrado dei chip led, ma semplicemente dei package/fosfori di conversione.
- il fatto che siano degradati solo i fosfori limita la sensibilità delle cinetiche alle diverse condizioni operative in quanto:
 1. il degrado del package/fosfori è principalmente dovuto ad effetti termici
 2. le basse potenze elettriche in gioco e la ridotta resistenza termica dei dispositivi limitano la differenza di auto riscaldamento tra le varie condizioni di stress
 3. le temperature di stress sono all'interno dei range operativi dei dispositivi.
- una maggiore dipendenza dalle condizioni operative sarà misurabile presumibilmente quando il degrado dei chip diventerà rilevante (previsto attorno al migliaio di ore).

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. F. Schubert, *Light Emitting Diodes, 2nd Edition, 2nd ed. Cambridge University Press, 2006*
- [2] Arturas Zukauskas, Michael S. Shur, Remis Gaska *Introduction to solid-state lighting*
- [3] J. Singh *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures, Cambridge*
- [4] Takafumi Yao, Soon-Ku Hong, *Oxide and Nitride Semiconductors, Springer*
- [5] Rudiger Quay, *Gallium Nitride Electronics, Springer*
- [6] Y. Xi and E. F. Schubert *Junction temperature measurement in GaN ultraviolet light emitting diodes using diode forward voltage method, Appl. Phys. Lett., vol.86, no. 12, pp. 2163-2165, 2004.*
- [7] S. Kasap *Handbook of Electronic and Photonic Materials; Springer, 2006*
- [8] H.P. Maruska, J.J. Tietjen, *Appl. Phys. Lett. 15, 327 (1969)*
- [9] Meneghesso G., Levada S. and Zanoni E. *Reliability of visible GaN LEDs in plastic package; Microelectronics Reliability, Vol. 43, pp.1737-1742, (2003)*
- [10] S. M. Myers, S.H. Seager, A. F. Wright, and B. L. Vaandrager *Electron-beam dissociation of the MgH complex in p-type GaN; J. Appl. Phys., vol. 92, no. 11, pp. 6630-6635, (2002)*

Conclusioni

- [11] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, Jap. J. Appl. Phys. 31 1258 (1992).
- [12] S. Nakamura et al., Appl. Phys. Lett., 58 (1991). 1991 American Institute of Physics
- [13] The activation of Mg in GaN by annealing with minority-carrier injection; M. Miyachi, T. Tanaka, Y. Kimura, and H. Ota, Appl. Phys. Lett., vol. 72, no. 9, pp. 1101-1104, (1998).
- [14] *Human Color Vision*; Peter K. Kaiser, Robert M. Boynton, Optical Society of America, (1996).
- [15] *High temperature electro-optical degradation of InGaN/GaN HBLEDs* ; M. Meneghini, L. Trevisanello, C. Sanna, G. Mura, M. Vanzi, G. Meneghesso and E. Zanoni; Microelectronics Reliability, Volume 47, Issues 9-11, September-November 2007, Pages 1625-1629.
- [16] *Status and prospects for phosphor-based white LED packaging*; Zongyuan Liu, Sheng Liu, Kai Wang, Xiaobing Luo; Higher Education Press and Springer-Verlag (2009)
- [17] *Evaluation of GaN growth improvement techniques*; Nasser N. Morgan et al. 2002
- [18] D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin, and S. L. Rudaz, "*Illumination with solid state lighting technology* IEEE J. on Sel. Top. in Quantum Electr., vol. 8, no. 2, pp. 310–320, 2002.
- [19] Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichihashi, and A. Usui, "*Preparation of freestanding GaN wafers by hydride phase vapor epitaxy with void-assisted separation*," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42, pp. L1–L3, January 2003
- [20] S. Strite and H. Morkoc, "*GaN, AlGaN and InN: a review*," J. Vac. Sci. Technol., vol. 10, no. 4, 1992.
- [21] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, "*Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer*," Appl. Phys. Lett., vol. 48, pp. 353–355, 1986
- [22] V. Harle, B. Hahn, H.-J. Lugauer, S. Bader, G. Bruderl, D. Eisert, U. Strauss, U. Zehnder, A. Lell, and N. Hiller, "*GaN-Based LEDs and Lasers on SiC*," Phys. Stat. Sol. A, vol. 180, pp. 5–13, 2000
- [23] S. N. Mohammad and H. Morkoc, "*Progress and Prospects of group-III Nitride Semiconductors*," Progr. Quant. Electr., vol. 20, no. 5/6

- [24] B. Monemar, “*III-V nitrides-important future electronic materials,*” *Journal of Material Science: materials in electronics*, vol. 10, p. 234, 1999 361–525, 1996
- [25] M. Osinski, “*Gallium-nitride-based technologies,*” SPIE press critical review, vol. CR83, 2001
- [26] J. H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano, and C. Wetzel, “*Properties, processing and applications of gallium nitride and related semiconductors,*”
- [27] J. Neugebauer and C. G. V. de Walle, *J. Appl. Phys.*, 1999, 85, 3003
- [28] S. Hautakangas, J. Oila, M. Alatalo, K. Saarinen, L. Liskay, D. Seghier, and H. P. Gislason, “*Vacancy defects as compensating centres in Mg-doped GaN,*” *Physical review letters*, vol. 90, no. 13, p. 137402, April 2003.
- [29] T.-C. Wen, S.-C. Lee, W.-I. Lee, T.-Y. C. and S. H. Chen, and J.-S. Tsang, “*Activation of p-type GaN in pure oxygen ambient,*” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 5B, pp. L 495–L 497, May 2001
- [30] J.-S. Jang, S.-J. Park, and T.-Y. Seong, “*Effects of surface treatment on the electrical properties of ohmic contacts to (In)GaN for high performance optical devices,*” *Phys. stat. sol.*, vol. 94, no. 2, pp. 576–582, 2002
- [31] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, “*GaN: processing, defects, and devices,*” *Journal of applied physics*, vol. 86, no. 1, pp. 1–78, July 1999
- [32] *Electron-beam dissociation of the MgH complex in p-type GaN*; S. M. Myers, S. H. Seager, A. F. Wright, and B. L. Vaandrager, *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 11, pp. 6630(6635), (2002)
- [33] *The activation of Mg in GaN by annealing with minority-carrier injection*; M. Miyachi, T. Tanaka, Y. Kimura, and H. Ota, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 9, pp. 1101-1104, (1998)
- [34] *High temperature instabilities of GaN LEDs related to passivation (2007)* 43rd Annual Workshop on Compound Semiconductor Materials and Devices - WOCSEMMAD '07 - Savannah, Georgia - Int. Conf. Proceedings Authors: Meneghini M, Trevisanello L.R, Meneghesso G, Zanoni E
- [35] *Reversible degradation of GaN LEDs related to passivation (2007)* International Reliability Physics Symposium, IRPS 2007 - Phoenix (AZ) [SAR Associates] ISBN:1-4244-0919-5 - Int. Conf. Proceedings Authors: Meneghini M, Trevisanello L.-R, Penzo R, Benedetti M, Zehnder U, Strauss U, Meneghesso G, Zanoni E

Conclusioni

- [36] *Failure mechanisms of gallium nitride LEDs related with passivation (2005)* IEEE International Electron Device Meeting (IEDM 2005) - Int. Conf. Proceedings Authors: M. Meneghini, L.-R. Trevisanello, S. Levada, G. Meneghesso, G. Tamiazzo, E. Zanoni, T. Zahner, U. Zehnder, V. Haerle, U. Strauss
- [37] O.V. Losev (November 1928). *Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals*. Philosophical Magazine 5: 1024–1044
- [38] *Arpad A. Bergh, P. J. Dean, "Light-Emitting Diodes"* Proceedings of the IEEE, Vol. 60, No. 2(1972), pp. 156- 223.