Università degli studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Elettronica

Progettazione e caratterizzazione di un sistema di illuminazione LARP: Laser-Activated-Remote-Phosphors

Relatore
Prof. Matteo Meneghini

Laureando
Maksym Yushchenko

5 dicembre 2016
Anno Accademico 2015/2016

Indice

Sommario **v**

Abstract **vii**

Ringraziamenti **ix**

Introduzione **1**

1 Illuminazione a stato solido basata su diodi laser **5**

1.1 *Solid-state lighting* (SSL) tramite LED e fosfori remoti 5
1.1.1 Stato dell'arte 5
1.1.2 *Color mixing* con fosfori remoti 7
1.1.3 Efficienza e problematiche di sistemi basati su LED 10
1.2 Sistemi SSL *Laser Activated Remote Phosphors* (LARP) 13
1.2.1 Caratteristiche e vantaggi di SSL basato su diodi laser 13
1.2.2 Stato dell'arte e applicazioni 14
1.2.3 Problematiche dei sistemi LARP 17
1.3 Diodi Laser Blu basati su InGaN 19
1.3.1 Struttura e principio di emissione 19
1.3.2 Proprietà elettriche 25
1.3.3 Effetto della temperatura 28
1.3.4 Sicurezza 29
1.4 Fosfori remoti per Solid-State Lighting 32
1.4.1 Requisiti dei fosfori per SSL 32
1.4.2 Fenomeni radiativi e non nei materiali fosforescenti 34
1.4.3 Centri di luminescenza 46
1.4.4 Fosforo YAG:Ce^{3+} 48
1.4.5 Metodi di sintesi del fosforo YAG:Ce^{3+} 53
1.5 Fotometria e colorimetria 56
1.5.1 Visione umana 56
1.5.2 Fotometria 58
1.5.3 Colorimetria 59

2 Affidabilità dei fosfori YAG:Ce^{3+} 65
2.1 Motivazioni 65
2.2 Processo di deposizione dei fosfori 66
2.3 Stress in temperatura 68
2.3.1 Caratterizzazione della fotoluminescenza 68
2.3.2 Step stress 70
2.3.3 Stress a temperatura costante 73
2.4 Analisi SEM 75
2.5 Caratterizzazione della luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+} 77
2.5.1 Setup di misura con chuck termico 77
2.5.2 Quenching a bassa eccitazione 81
2.5.3 Luminescenza vs temperatura e intensità di eccitazione 83
2.5.4 Stress ottico in condizioni operative 89
2.6 Conclusioni 100

3 Elettronica di controllo 103
3.1 Controllo del laser via microcontrollore 103
3.1.1 Protocollo I2C 106
3.1.2 Comunicazione con il DAC 110
3.1.3 Comunicazione con il sensore di temperatura 112
3.2 Controllo di corrente del diodo laser 112
3.2.1 Dimensionamento 115
3.3 Realizzazione della PCB 118
3.4 Considerazioni 121

4 Sistema LARP in trasmissione 123
4.1 Descrizione 123
4.1.1 Supporto e dissipazione del diodo laser 124
4.1.2 Collimazione 126
4.1.3 Focalizzazione 129
4.1.4 Proiezione 130
4.2 Caratterizzazione delle prestazioni del setup 131
4.2.1 Caratterizzazione tramite immagini del fascio 131
4.2.2 Caratterizzazione in sfera integratrice 137
4.3 Utilizzo di pellet di KBr e YAG:Ce^{3+} come fosfori remoti 142
4.3.1 Caratterizzazione dei pellet 145
4.3.2 Osservazioni conclusive 153
4.4 Considerazioni 154

5 Sistema LARP in riflessione 157
5.1 Setup ottico in incidenza radente 157
5.1.1 Descrizione 157
5.1.2 Caratterizzazione 163
5.1.3 Considerazioni 168
5.2 Setup con riflettore parabolico 169

5.2.1 Descrizione 169
5.2.2 Caratterizzazione 170
5.2.3 Considerazioni 175

6 Conclusioni finali **179**

Bibliografia **183**

Sommario

Nel presente elaborato viene descritto il lavoro di tesi magistrale riguardante lo studio e la realizzazione di sistemi di proiezione di luce bianca basati sulla tecnologia LARP. Questa tipologia di sistemi di illuminazione utilizza materiali luminescenti (fosfòri) eccitati da un diodo laser, grazie al quale essa possiede le potenzialità per fornire un fascio di illuminazione stretto e ad elevata luminosità, con un'efficienza migliore dei sistemi SSL basati su LED.

Durante questa tesi sono stati studiati alcuni aspetti critici intrinseci della tecnologia LARP, con lo scopo di individuare e proporre delle soluzioni che permettano a questi sistemi di illuminazione di essere affidabili e performanti. In particolare, è stato analizzato il degrado della luminescenza di YAG:Ce^{3+} (un fosforo con emissione nel giallo) in seguito a stress termici e durante stress di eccitazione con fascio laser. Parallelamente, è stato svolto uno studio di realizzazione di un prototipo LARP basato su un diodo laser con emissione blu, a 450 nm. A tale scopo è stata creata una PCB per il controllo elettronico del diodo laser via microcontrollore e sono state realizzate diverse configurazioni di elementi opto-meccanici integrati con il diodo laser e i fosfori remoti in un sistema di proiezione, con conseguente caratterizzazione di proprietà colorimetriche e luminose. Complessivamente, il lavoro svolto ha permesso di confermare le potenzialità della tecnologia LARP, esplorandone le problematiche tecniche ed alcune possibili soluzioni.

Abstract

The present Master Thesis work illustrates the study and design of white-lighting projection systems based on LARP laser lighting technology. Such illumination systems employ luminescent materials (phosphors) excited by a laser diode source, and the latter bestows them with the capability of delivering a narrow, high brightness light beam with a higher efficiency than LED-based SSL systems.

The scope of this work is to verify the feasibility of LARP technology and to identify some idiosyncratic critical aspects and possible solutions in order to create reliable high-performance illumination systems. In particular, degradation of luminescence of YAG:Ce^{3+} (a phosphor with yellow emission) has been analyzed following thermal stress and during laser beam excitation stress conditions. Furthermore, design of a LARP prototype has been performed based on a laser diode with blue emission at 450 nm. For this purpose, we have designed and created a PCB for electronic control of the laser diode by means of a microcontroller, and we have implemented various configurations of opto-mechanical elements integrated into an illumination system including a laser diode and phosphors, with subsequent colorimetric and luminous characterization. Overall, the performed work has validated the LARP technology capabilities and explored its technical issues and some possible solutions.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il professore Matteo Meneghini per la sua preziosa guida durante questa tesi e per l'opportunità di approfondire questo argomento. Vorrei esprimere inoltre la mia gratitudine per la disponibilità di Nicola Trivellin e dell'intera azienda LightCube, senza il cui supporto il mio lavoro non sarebbe stato possibile. Non troverò mai le parole adatte per ringraziare sufficientemente Matteo Buffolo, considerando le sue precisazioni sempre pertinenti e la quantità di tempo che mi ha dedicato. Infine, finalmente giunto a questo traguardo del mio percorso universitario, ricordo tutte le persone, vicine e lontane, con cui ho condiviso il mio cammino.
Grazie, mamma, per aver reso possibile questo viaggio.
Grazie grazie Alice, per essermi stata vicino e avermi sostenuto, sempre.

Introduzione

Lo sviluppo degli ultimi decenni di tecnologie avanzate di realizzazione di sorgenti luminose a stato solido ha portato oggi all'ampia diffusione di sistemi di illuminazione basati su LED, o diodi ad emissione luminosa, in combinazione con fosfori. Questi sistemi hanno numerosi vantaggi rispetto alle tecnologie di illuminazione precedenti, tra cui un'elevata efficienza energetica, dimensioni ridotte e la possibilità di regolare le caratteristiche cromatiche relative alla luce emessa. Tuttavia, questi sistemi hanno dei limiti intrinseci dovuti all'utilizzo dei LED come sorgente primaria. Infatti, tali dispositivi a semiconduttore presentano un rilevante fenomeno di calo dell'efficienza per alte densità d'iniezione, il cosiddetto "efficiency droop" [29]. Tale fenomeno pone di fatto un limite superiore all'efficienza e alla compattezza di un sistema d'illuminazione basato su LED e, nonostante le approfondite ricerche in questo campo che hanno indifivuato nell'effetto Auger una delle principali cause di tale fenomeno, nessuna soluzione definitiva è stata proposta per risolvere questo problema. Si prevede che alcuni miglioramenti nella struttura interna dei LED, come una regione attiva più spessa o l'assenza di substrati polari, permetteranno in futuro di innalzare la soglia alla quale si verifica il calo di efficienza, senza però eliminare questo problema. Data la relativa maturità della tecnologia dei LED, si prevede quindi che la loro massima efficienza di conversione di potenza elettrica in potenza ottica rimarrà intorno al valore di picco attuale di circa 70% [44].

Una possibile strada per riuscire a realizzare sistemi luminosi con elevata efficienza per potenze in ingresso elevate consiste nel cambiare paradigma, utilizzando dei diodi laser a semiconduttore come sorgenti di emissione di luce in combinazione con fosfori remoti (sistemi LARP - Laser Activated Remote Phosphor). Infatti, a differenza dei LED, nei diodi laser il fenomeno del calo dell'efficienza non aumenta oltre il suo valore alla corrente la soglia in quanto i laser operano in regime di emissione stimolata e la loro popolazione di portatori non aumenta significativamente oltre la soglia [43]. Di conseguenza, l'efficienza dei diodi laser, maggiore di quella dei LED per alte densità d'iniezione, renderà competitivo l'utilizzo di questa nuova

tecnologia; inoltre, nonostante il picco di efficienza dei laser sia attualmente intorno al 30%, si prevede che le ricerche future potranno permettere di raggiungere il livello di massima efficienza attualmente raggiunto dai LED (Fig. 1). Ulteriori vantaggi dell'utilizzo dei laser per sistemi di illuminazione derivano dalle caratteristiche del fascio prodotto dall'emissione stimolata di fotoni coerenti e fortemente direzionati: risulta infatti più facile deviare un fascio laser piuttosto che focalizzare la luce emessa da un LED, dotata invece di una grande divergenza spaziale; l'accoppiamento di una fibra ottica con il fascio di un laser è in generale più efficiente che con il fascio di un LED, il che rende possibile convogliare la luce del laser e generare la luce bianca in remoto, fornendo al progettista diversi gradi di libertà in più (design dell'illuminatore, smaltimento del calore più efficiente, ecc.)[4].

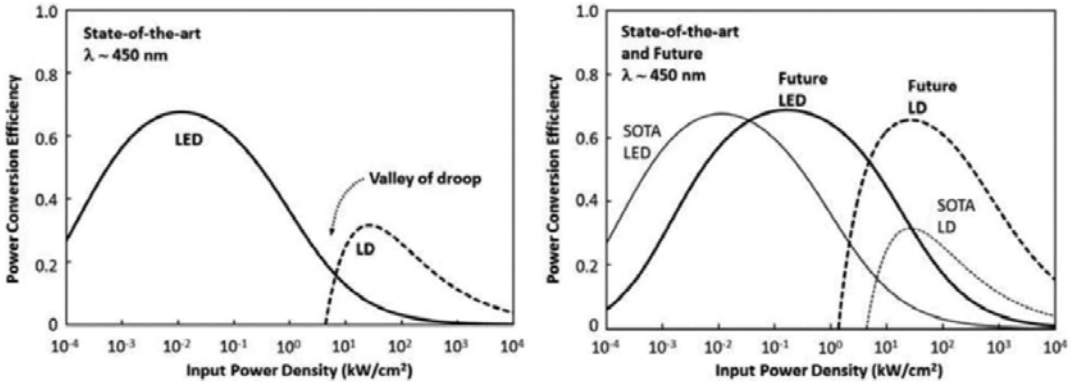


Figura 1: Confronto tra l'efficienza di conversione di potenza dei LED e quella dei diodi laser (LD), tratteggiata. A sinistra, la situazione della tecnologia attuale; a destra, le previsioni future [44].

Il passaggio dall'utilizzo dei LED a quello dei laser nei sistemi di illuminazione non risulta banale. Varie problematiche devono essere ancora risolte per i laser (in particolare quelle inerenti all'autoriscaldamento), ma è necessario soprattutto dedicare molta attenzione allo studio dei fosfori remoti, i quali nei sistemi laser-lighting vengono eccitati da fasci luminosi dalle intensità luminose molto elevate, fatto che causa un riscaldamento significativo del materiale con conseguente calo dell'efficienza e degrado dei fosfori. Inoltre, è necessario studiare i fenomeni di miscelazione della luce coerente del laser con la luce di luminescenza diffusa dei fosfori per riuscire ad ottenere un colore bianco e una forma adeguata del fascio di luce emesso dall'illuminatore.

La soluzione di queste problematiche permetterà in futuro di utilizzare i diodi laser per applicazioni di illuminazione ad alta potenza. Le possibili applicazioni

riguardano situazioni che richiedono un'elevata intensità luminosa o che possono trarre beneficio dall'efficienza e dalla versatilità di tale tecnologia e dalla possibilità di sagomare il fascio luminoso, in ambiti come l'*automotive lighting*, la proiezione di film in sale di cinema e personali e l'illuminazione di edifici esterni e ambienti interni. Questa tecnologia innovativa risulta essere di importante attualità e promette di svilupparsi e trovare ampio utilizzo nel futuro prossimo.

Il lavoro di questa tesi consiste nella realizzazione di un prototipo di illuminatore LARP a luce bianca basato su un laser blu InGaN PL TB450B di OSRAM e fosfori remoti YAG:Ce^{3+}. Per questo scopo, è stato necessario un lavoro sperimentale riguardante la caratterizzazione e la manipolazione del laser e dei fosfori utilizzati al fine di comprendere sia i fenomeni interni al sistema sia le caratteristiche del fascio di luce prodotto dal prototipo. Le prove di affidabilità di fosfori remoti realizzati tramite deposizione di fosfori YAG:Ce^{3+} su un substrato in zaffiro hanno permesso di valutare le limitazioni del prototipo in termini di durata di vita dei fosfori e di caratteristiche luminose, legate allo spessore e uniformità dello strato luminescente. Successivamente, sono stati progettati dei sistemi illuminanti attraverso l'individuazione degli elementi ottici necessari e la caratterizzazione delle loro configurazioni ottimali in presenza della sorgente laser. In questo modo, sono state studiate due configurazioni differenti: una configurazione "in trasmissione", con fosfori remoti depositati su un substrato trasparente che trasmette sia la luce emessa dai fosfori che la luce del laser che li attraversa, e una configurazione "in riflessione", nella quale il materiale fosforescente è stato depositato su uno specchio adibito a reindirizzare la backside-emission dei fosfori e il fascio non precedentemente assorbito del laser. Inoltre, al fine di ottenere un prototipo completo, il sistema ottico è stato integrato con un dissipatore termico e un controllo elettronico del laser via microcontrollore. La descrizione del lavoro in questo elaborato è la seguente:

- Nel capitolo 1 vengono presentate le principali nozioni teoriche pertinenti all'ambito di questa tesi, descrivendo lo stato dell'arte attuale della tecnologia laser-lighting LARP e dettagliando i principi fisici e le caratteristiche dei diodi laser blu InGaN e dei fosfori YAG:Ce^{3+} impiegati nella realizzazione dei prototipi.

- Il capitolo 2 è dedicato alla caratterizzazione sperimentale dei fosfori remoti YAG:Ce^{3+}.

- Nel capitolo 3 viene trattata la progettazione dell'elettronica di controllo elettronico del laser tramite microcontrollore e la realizzazione della relativa PCB.

- I capitoli 4 e 5 illustrano i prototipi realizzati nelle configurazioni di trasmissione e riflessione con loro caratterizzazione.
- Infine, nel capitolo 6 viene riepilogato il lavoro svolto durante questa tesi magistrale e vengono riportate delle osservazioni, in vista dei risultati ottenuti, riguardo lo sviluppo della tecnologia di illuminazione laser-lighting basata su laser blu e fosfori remoti.

Capitolo 1

Illuminazione a stato solido basata su diodi laser: componenti, caratteristiche e stato dell'arte

1.1 *Solid-state lighting* (SSL) tramite LED e fosfori remoti

1.1.1 Stato dell'arte

La tecnologia di illuminazione a stato solido, o *solid-state lighting* (SSL), prende il suo nome dall'utilizzo delle proprietà di elettro-luminescenza di materiali semiconduttori per la produzione di luce visibile. Le prime osservazioni dell'elettro-luminescenza nei semiconduttori furono eseguite da H. J. Round nel 1907 e il primo diodo a emissione luminosa LED fu citato da O. V. Losev nel 1927. Tuttavia, fu solo grazie allo sviluppo della fisica dei semiconduttori a partire dagli anni '40 che fu possibile progredire con le tecnologie per l'emissione di luce con semiconduttori. In particolare, per raggiungere l'evoluto stato dell'arte attuale dei sistemi SSL con la loro imposizione sul mercato rispetto a sistemi di illuminazione più tradizionali (lampade a incandescenza e lampade a scarica di gas), due avanzamenti tecnologici furono fondamentali: la dimostrazione di emissione di luce rossa da parte di N. Holonyak nel 1962 e la realizzazione di LED blu ad alta luminosità da parte di S. Nakamura nel 1993, grazie anche allo studio di materiali semiconduttori composti III-V basati su GaN di I. Akasaki e H. Amano, celebrato dal premio Nobel per la fisica del 2014 conferito ai tre ricercatori giapponesi.

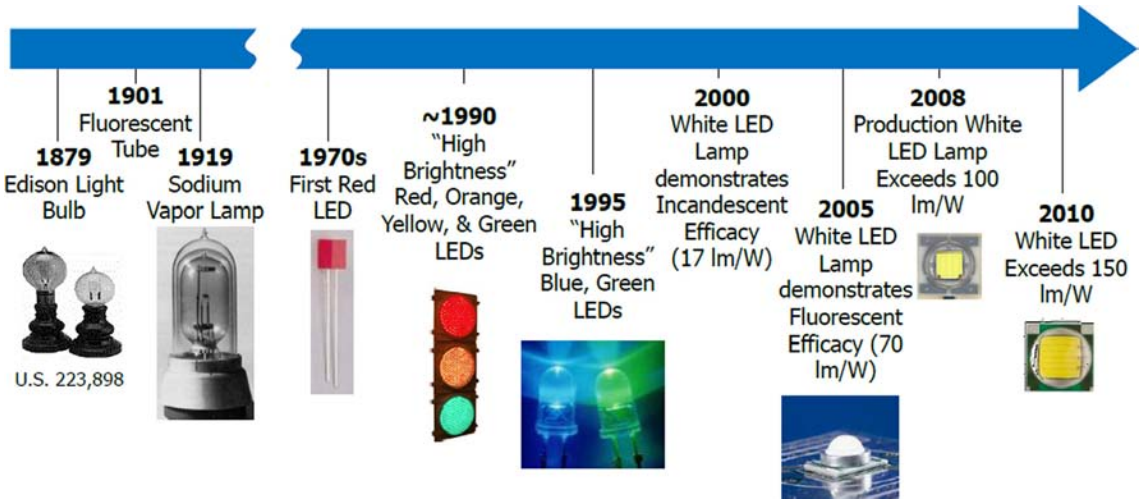


Figura 1.1: Linea del tempo che riassume le principali tappe evolutive delle tecnologie di illuminazione, con i principali traguardi di SSL [1].

La scoperta del LED rosso ha portato alla prima introduzione della tecnologia SSL sul mercato nel 1968, seppur con prestazioni molto basse (circa 1 mlm a 20 mA). In seguito, un costante progresso in termini di efficienza, lumen per LED e costo per lumen, fu reso possibile dall'esplorazione e sviluppo di nuovi materiali semiconduttori III-V, ottenuti dalla composizione di elementi chimici della terza e quinta colonna della tabella periodica: dal GaP, passando per GaAsP, AlGaAs, fino al AlInGaP. In questo modo, l'efficienza luminosa dei LED è migliorata di più di tre ordini di grandezza, da circa 0.02 lm/W degli anni '70 a più di 150 lm/W dei LED di oggi (Fig. 1.2). In questi decenni, la domanda di applicazioni ad alta luminosità ha provocato l'aumento dell'efficienza dei singoli LED, che a sua volta ha creato nuovi settori di mercato, con richieste sempre più evolute nei confronti della ricerca tecnologica. Il risultato delle dinamiche economiche è stato un incremento di un fattore 20x per decade del flusso luminoso per lampada, e la diminuzione di un fattore 10x per decade del costo di produzione per lumen.

La realizzazione del LED blu, grazie alla manipolazione del nuovo materiale GaN ad ampio bandgap, ha portato numerosi nuovi miglioramenti alla tecnologia SSL a partire dagli anni '90. Finalmente, con il LED blu è stato possibile coprire tutto lo spettro di luce visibile e di produrre luce bianca tramite tecniche di color-mixing. La tecnologia SSL si era aperta la strada verso il settore di illuminazione generica, e al giorno d'oggi sembra certo che un giorno essa rimpiazzerà tutte le tecnologie passate in qualunque applicazione in cui viene prodotta luce visibile.

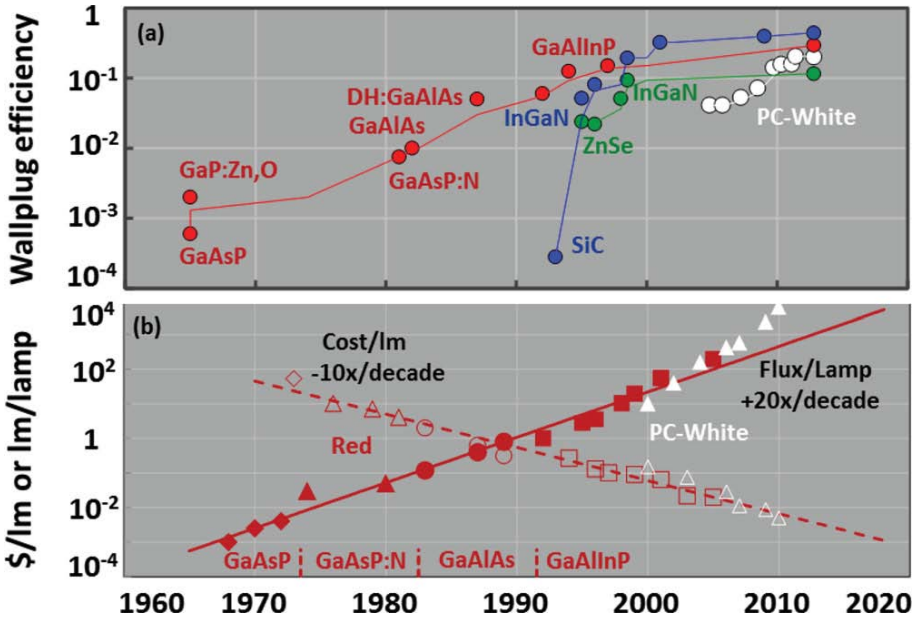


Figura 1.2: Evoluzione delle caratteristiche dei LED: a) efficienza (lm/W) dei LED rossi, verdi, blu e bianchi tramite conversione di fosfori; b) prestazioni (lm/*package*) e costo ($/lm) per LED rossi e bianchi commerciali [40].

1.1.2 *Color mixing* con fosfori remoti

Il contributo più importante della scoperta dell'emissione di luce blu tramite LED risiede nella possibilità di sfruttare la luce blu ad alta energia per convertirla in luce verde, gialla o rossa ("*down-conversion*") tramite dei materiali luminescenti passivi (fosfòri). Attraverso adeguate sovrapposizioni di spettri così generati è possibile ottenere luce bianca con un'ampia variabilità di punto di colore. La combinazione più semplice consiste nella miscelazione di luce emessa da una sorgente blu e da un materiale fosforescente con emissione nel giallo; sistemi più avanzati spesso includono miscele di fosfori o diverse sorgenti di eccitazione.

La luce bianca può essere ottenuta senza fosfori, utilizzando due o più LED con adeguati spettri di emissione (Fig. 1.3). Tuttavia, la soluzione a base di fosfori e sorgente blu ha avuto il sopravvento nell'ultimo decennio per vari motivi [40]:

- In primo luogo, i miglioramenti dell'efficienza di elettro-luminescenza dei LED non sono stati omogenei lungo lo spettro della luce visibile, raggiungendo oggi delle efficienze per LED blu e rossi rispettivamente di 50% e 30%, e di soli 20% o meno per LED verdi e gialli. Di conseguenza, la conversione di luce vede o gialla tramite fosfori eccitati da LED blu risulta essere più efficiente della generazione diretta tramite LED.

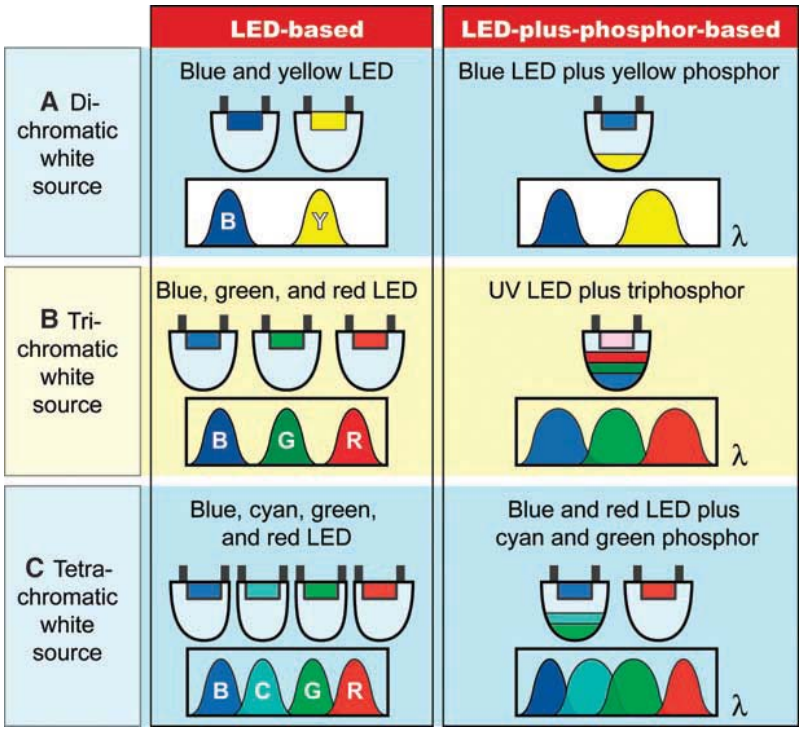


Figura 1.3: Diversi approci di realizzazione di sistemi di illuminazione a LED [33].

- In secondo luogo, la sensibilità del sistema visivo umano richiede una cromaticità esatta e stabile della luce bianca. I LED di diversi colori presentano delle differenti relazioni tra la temperatura operativa e la potenza luminosa emessa, oltre che un diverso degrado nel tempo, per cui essi richiedono dei diversi circuiti di controllo ad anello chiuso per mantenere l'emissione di un colore stabile. Il sistema a base di LED blu e fosfori risulta invece meno sensibile alla temperatura e può funzionare senza feedback in molte applicazioni.

- Inoltre, per essere comandati a potenze di ingresso maggiori e poter fornire potenze luminose più alte, ai LED è richiesto un buon funzionamento ad alta temperatura. Tuttavia, l'efficienza dei LED verdi e gialli subisce un calo più rapido rispetto al LED blu all'aumentare della temperatura, rendendo complicato il funzionamento di un sistema che comprenda LED di diversi colori.

Allo stesso tempo, bisogna ricordare che un sistema basato su fosfori ha comunque degli svantaggi: ad esempio la perdita di energia nella conversione di fotoni da una lunghezza d'onda minore a una maggiore (Stokes shift), con conseguente diminuzione dell'efficienza rispetto a un sistema senza fosfori.

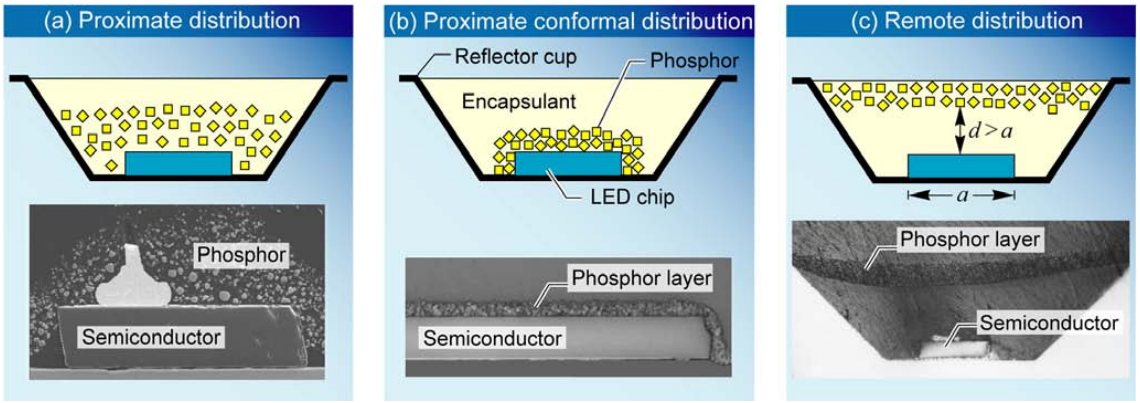


Figura 1.4: Posizionamento dei fosfori nei sistemi di illuminazione a LED [32].

Considerando la combinazione più semplice di LED blu e fosfori gialli per la generazione di luce bianca, il *package* del sistema di illuminazione e la collocazione dei fosfori al suo interno possono assumere diverse configurazioni [32]. Inoltre, la densità e lo spessore del fosforo devono essere tali da trasmettere una determinata frazione della luce blu, in modo da ottenere un'adeguata luce bianca dalla miscelazione con la luce di luminescenza gialla. Le configurazioni tipiche di una lampada bianca a LED sono illustrate in Figura 1.4. Le lampade a LED della prima generazione utilizzano una resina epossidica nella quale vengono disperse le particelle di fosforo, contenuta in una struttura riflettente, con una collocazione di fosfori *in prossimità* del LED (Figura 1.4a). Con tale metodo risulta difficile contrastare la disuniformità della distribuzione del fosforo, la quale può provocare delle variazioni di colore emesso lungo diverse direzioni. Una variante di questa configurazione consiste allora nel rivestire il chip LED di uno strato di fosfori uniforme, con un materiale incapsulante che li circonda e li protegge da eventuali elementi contaminanti (Figura 1.4b). La configurazione con fosfori in prossimità del LED presenta diverse problematiche, tra cui l'emissione di luce verso il chip LED e l'assorbimento di luce da parte dei contatti metallici del chip. In alternativa, si preferisce utilizzare la configurazione con fosfori *remoti*, posizionati ad una distanza sufficientemente grande dal chip LED, in modo da ridurre la probabilità che la luce di fosforescenza raggiunga il chip (Figura 1.4c). Tra gli ulteriori vantaggi di questa soluzione si possono citare il buon controllo dello spessore dei fosfori e la riduzione della temperatura operativa dei fosfori, i quali in questo caso non subiscono il riscaldamento del chip LED e degradano più lentamente. Tuttavia, l'utilizzo di fosfori remoti contribuisce ad aumentare il prezzo del prodotto.

1.1.3 Efficienza e problematiche di sistemi basati su LED

Dalla realizzazione del LED blu InGaN nel 1993, notevoli progressi sono stati fatti negli ambiti tecnologici pertinenti, permettendo di raggiungere attualmente un'efficienza massima di conversione della potenza elettrica in potenza luminosa maggiore di 80% [40]. Questa efficienza η_{tot} in un LED può essere suddivisa in diversi contributi, considerando la relazione:

$$\eta_{tot} = \eta_{inj}\eta_{rad}\eta_{ext}\left(\frac{h\upsilon}{eV}\right) \tag{1.1}$$

dove η_{inj} è l'efficienza di iniezione, η_{rad} l'efficienza di radiazione, η_{ext} l'efficienza di estrazione, e $(h\upsilon/eV)$ è l'efficienza di Joule, con h la costante di Planck, υ la frequenza della radiazione, e la carica dell'elettrone e V la tensione operativa.

L'efficienza di iniezione η_{inj} rappresenta la porzione di portatori iniettati nell'eterostruttura del semiconduttore che si ricombinano nella regione attiva. Essa dipende dalla struttura di strati epitassiali e dalla struttura a bande del semiconduttore, dal tempo di vita dei portatori e dai campi presenti. In pratica, è stato dimostrato che l'efficienza di iniezione è tipicamente molto elevata, intorno al 95%, ed essa è relativamente indipendente della densità di corrente in ingresso.

L'efficienza di radiazione η_{rad} è la parte di coppie elettrone-lacuna della regione attiva che si ricombinano tramite ricombinazione radiativa. L'espressione di η_{rad} è la seguente

$$\eta_{rad} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \tag{1.2}$$

dove An è il tasso di ricombinazione assistito da difetti del modello Shockley-Read-Hall, Bn^2 il tasso di ricombinazione radiativa spontanea, Cn^3 il tasso di ricombinazione Auger, n la densità di portatori nelle regioni attive di emissione di luce. Nei LED blu allo stato dell'arte, η_{rad} cresce all'aumentare di n fino ad un massimo, quasi del 100%, per densità di portatori corrispondenti a potenze in ingresso dell'ordine di 10^{-2} kW/cm^2, e decresce per potenze maggiori (Fig. 1.5).

L'efficienza di estrazione η_{ext} rappresenta la porzione di luce utile che fuoriesce dal *package* del LED, tenendo conto delle riflessioni e assorbimenti interni agli strati di semiconduttore. Diverse tecniche di design del chip per ottimizzare il percorso interno dei fotoni permettono di raggiungere un'efficienza elevata, intorno all'85%.

L'efficienza di Joule $(h\upsilon/eV)$ è il rapporto tra l'energia del fotone emesso e l'energia dell'elettrone iniettato nel dispositivo alla tensione operativa V. Tale tensione

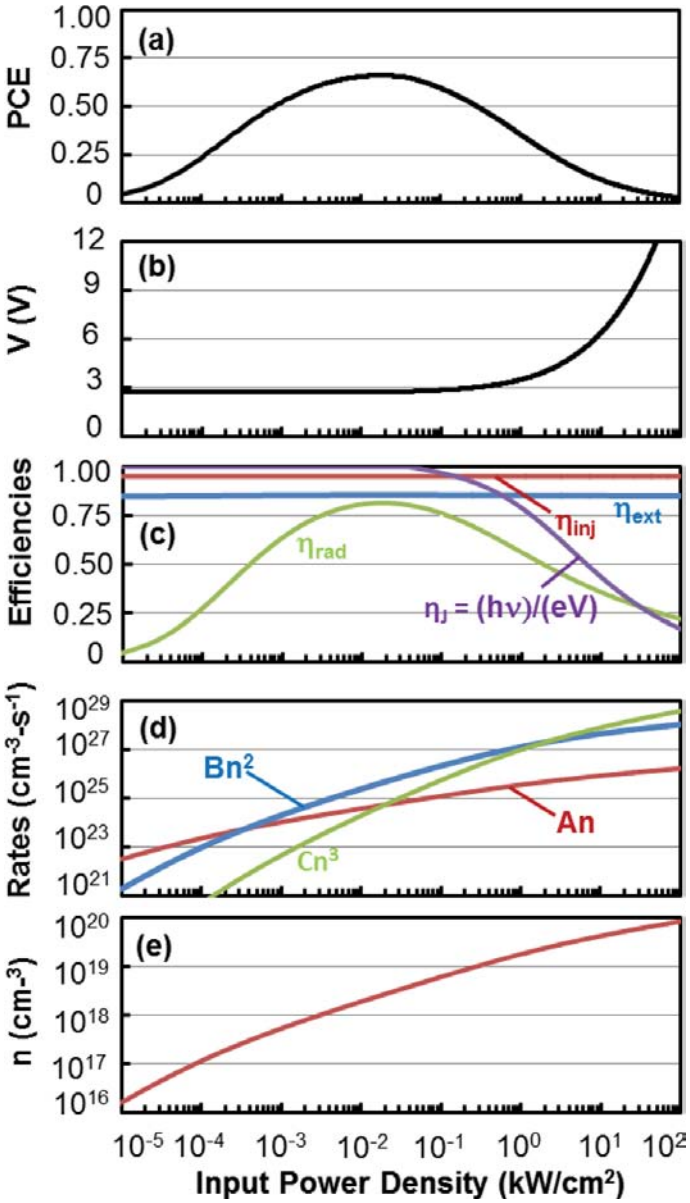


Figura 1.5: Dipendenza dalla densità di potenza in ingresso a un LED blu di: a) efficienza di conversione di potenza (PCE); b) tensione operativa (V); c) efficienze intermedie; d) tassi di ricombinazione dei portatori; e) densità di portatori n [40].

è data dalla somma

$$V = V_D + IR \tag{1.3}$$

con IR la caduta resistiva interna e V_D la tensione di diodo,

$$V_D = \frac{\eta_f kT}{e} ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{1.4}$$

dove η_f è il fattore di idealità del diodo LED, k la costante di Boltzmann, T la temperatura e I_0 la corrente di saturazione in polarizzazione inversa. La caduta di tensione interna IR è dovuta alla resistenza serie R interna al LED di cui risentono i portatori che transitano nella regione attiva. Solitamente, il contributo dominante in R è dovuto alla resistenza delle regioni quasi neutre n nel GaN, in quanto le regioni p, pur avendo bassa conducibilità, sono molto sottili e presentano una bassa caduta di tensione nel trasporto delle lacune verso il contatto ohmico. Per basse correnti operative, V è pari alla tensione di accensione del diodo e l'efficienza di Joule tende all'unità, mentre per elevate correnti l'efficienza di Joule e quella totale diminuiscono a causa dell'effetto resistivo.

Tenendo conto che l'efficienza totale di un dispositivo optoelettronico SSL dipende dal prodotto tra le singole efficienze, è evidente che per ottenere un elevato valore di η_{tot} è necessario che ogni singola efficienza intermedia sia massimizzata. Inoltre, si può osservare che η_{tot} è limitata principalmente da η_{rad} e per tale motivo il picco di efficienza totale nei LED si ha per modeste densità di potenza in ingresso. Per densità di potenza più elevate, l'efficienza totale cala a causa del calo di η_{rad}: questo fenomeno viene denominato "*efficiency droop*" e costituisce l'ostacolo tecnologico principale nello sviluppo di dispositivi SSL. Difatti, per mantenere un'efficienza elevata i LED sono costretti a operare in condizioni di densità di potenza in ingresso basse, le quali limitano il massimo flusso luminoso per unità di area del chip, rendendo economicamente sconveniente la produzione e l'utilizzo di queste sorgenti nel caso di applicazioni ad alta intensità luminosa.

Una possibile soluzione per ridurre l'effetto del calo di efficienza radiativa è quella di utilizzare delle nanostrutture con grandi aree di superficie attive, oppure quella di aumentare la soglia a cui inizia il *droop* attraverso, ad esempio, delle topologie con *quantum well* non-quadrati, o dei materiali alternativi con orientamenti semi- e non-polari del cristallo [40].

Un'alternativa radicale per risolvere il problema dell'*efficiency droop* nel SSL consiste nel cambiare paradigma e impiegare dei diodi laser al posto dei diodi LED, in quanto nei laser i processi di ricombinazione radiativa stimolata prevalgono sulla ricombinazione Auger per densità di correnti sufficientemente elevate. Questo approccio non comporta solo una semplice sostituzione delle sorgenti nei sistemi SSL da LED ai diodi laser, bensì esso costituisce un approccio completamente nuovo per le tecnologie di illuminazione, descritto nella sezione successiva.

1.2 Sistemi SSL *Laser Activated Remote Phosphors* (LARP)

1.2.1 Caratteristiche e vantaggi di SSL basato su diodi laser

L'utilizzo di diodi laser come sorgenti di eccitazione rappresenta un approccio innovativo e attraente per la realizzazione di sistemi di illuminazione a stato solido. Infatti, a differenza dei LED, nei diodi laser la potenza ottica e l'efficienza aumentano linearmente all'aumentare della corrente (in condizioni sopra soglia), senza l'effetto del *droop* di efficienza presente nei LED. Inoltre, grazie a un sistema di controllo che varia la corrente dei diodi laser in funzione della loro temperatura, è possibile mantenere un'emissione dei laser ad una lunghezza d'onda costante, ottenendo così una stabilità di colore della luce emessa migliore rispetto ai sistemi basati su LED [11].

Al fine di ridurre il più possibile gli effetti dell'aumento della temperatura del sistema sulle caratteristiche della luce prodotta, risulta conveniente sfruttare la configurazione con fosfori remoti in un dispositivo LARP. Poiché il fascio di luce di un diodo laser può essere facilmente collimato, l'utilizzo di fosfori remoti è particolarmente compatibile con tali dispositivi (da cui il nome di sistemi *Laser Activated Remote Phosphors* - LARP), in quanto risulta possibile posizionare i fosfori lontano dalla sorgente senza dispersione del fascio di eccitazione. In aggiunta, i sistemi LARP possono essere realizzati in modalità di riflessione del fascio laser sulla superficie dei fosfori, rendendo possibile delle configurazioni in cui il materiale luminescente è depositato su un substrato riflettente che agisce da dissipatore di calore, migliorando le condizioni operative del materiale fosforescente.

L'architettura LARP possiede potenzialità ancora poco esplorate in tutte le applicazioni ad alta potenza in ingresso, dove i LED hanno una minore efficienza rispetto ai diodi laser (Fig. 1). Le peculiari caratteristiche di emissione stimolata del fascio laser rendono possibili una manipolazione della forma del fascio di illuminazione e un controllo con maggiori possibilità rispetto ai sistemi basati su LED, rendendo la tecnologia LARP una promettente innovazione nel campo dell'illuminazione. Nonostante la relativa breve storia della tecnologia LARP, le sue prime applicazioni commerciali sono già recentemente emerse.

1.2.2 Stato dell'arte e applicazioni

Nel decennio passato vari lavori di ricerca hanno dimostrato la possibilità di generare luce bianca eccitando dei fosfori con un diodo laser, mantenendo la stabilità del punto di colore della luce emessa. Ad esempio, nel 2008 Xu *et al.* hanno prodotto in modo sperimentale 5.7 lm di luce bianca con CCT pari a 5225 K e un'efficienza di 13 lm/W con un laser del vicino ultravioletto e fosfori emittenti nel blu e giallo [47]; nel 2009 lo stesso gruppo ha realizzato un'emissione di 3.6 lm di luce bianca con CCT di 5393 K e un'efficienza di 8.3 lm/W con un laser del vicino UV e una combinazione di fosfori rossi, verdi e blu [46]; Ryu e Kim nel 2010 hanno prodotto un'emissione di 5 lm di luce bianca con un'efficienza di 10 lm/W eccitando un fosforo giallo con un laser blu [28]; Denault e Nakamura nel 2013 hanno ottenuto un'efficienza di 76 lm/W e un flusso di luce bianca di 252 lm con un CCT di 4400 K utilizzando un laser blu e fosfori YAG:Ce [11]. Negli ultimi anni, dunque, la ricerca ha fatto dei progressi per migliorare l'efficienza e il flusso luminoso di sistemi LARP per poterli rendere adatti ad applicazioni pratiche generando elevata luminosità ad alta potenza. L'ottimizzazione della luminosità e dell'efficienza di dispositivi di illuminazione basati su laser dipende, infatti, dall'efficienza dei singoli componenti utilizzati per la realizzazione del sistema (tra cui i fondamentali sono il diodo laser e i fosfori), ma anche dalla combinazione di questi elementi e delle ottiche che permettono di estrarre efficacemente e reindirizzare la luce prodotta.

Considerando che l'efficienza luminosa η_ν può essere espressa come il rapporto tra il flusso luminoso generato ϕ_ν e la potenza elettrica in ingresso al sistema P_{input},

$$\eta_\nu = \frac{\phi_\nu}{P_{input}} \tag{1.5}$$

la cui dipendenza dalle componenti del sistema, può essere esplicitata considerando che

$$P_{input} = \frac{P_{laser}}{\eta_{wpe}} + \frac{P_{fosforo}}{\eta_s \eta_{qy} \eta_{wpe}} \tag{1.6}$$

dove P_{laser} è la potenza spettrale integrata dell'emissione del laser che contribuisce alla potenza della luce bianca prodotta, $P_{fosforo}$ è l'analogo contributo di potenza dovuta all'emissione da parte dei fosfori, η_s è l'efficienza della perdita di Stokes nel fosforo, η_{qy} è tasso di fotoluminescenza (*quantum yield*) dell'eccitazione del fosforo, η_{wpe} è l'efficienza di conversione del diodo laser di potenza elettrica in potenza ottica (*wall plug efficiency*) [11]. Nel caso del setup sperimentale descritto in [11], con una stima di valori di η_s di 76%, η_{qy} di 90% per il fosforo YAG:Ce, e η_{wpe} per il

diodo laser blu commerciale, è stata stimata un'efficienza massima ϕ_ν di 78 lm/W. Se in futuro i diodi laser raggiungeranno il valore η_{wpe} massimo simile al picco di efficienza dei LED, con gli stessi parametri il calcolo fornirebbe un'efficienza luminosa di quasi 200 lm/W, migliore di molti sistemi SSL attuali: una lampadina incandescente ha un'efficienza ϕ_ν di circa 17 lm/W, mentre una lampadina a fluorescenza 80-110 lm/W; le lampadine a LED commerciali vendute oggi possiedono un'efficienza superiore ai 130 lm/W.

Lo sviluppo tecnologico permetterà in futuro di utilizzare i sistemi LARP per applicazioni di illuminazione ad alta potenza generando un fascio luminoso particolarmente intenso. Tra queste troviamo l'ambito dell'*automotive lighting*, nel quale è essenziale poter garantire un'illuminazione ottimale della strada, considerando allo stesso tempo i fattori quali l'efficienza energetica, il fattore forma per una minore occupazione del volume utile e una maggiore flessibilità nel design; un sistema di faro illuminatore a base di laser renderebbe possibile, in modo innovativo, il controllo del profilo di colore all'interno fascio proiettato e della forma geometrica del fascio, ad esempio al fine di evitare di abbagliare i conducenti o le persone rivolte verso l'automobile. La tecnologia di fari basati sui laser è stata impiegata per prima da BMW nel suo modello *concept car* i8 nel 2011 con un'efficienza affermata essere di 170 lm/W (Fig. 1.6), per poi essere adottata da Audi per i fanali posteriori presentati al CES 2013 e da Mercedez-Benz per i fari anteriori del modello *concept* GLA presentato nel 2013 [4].

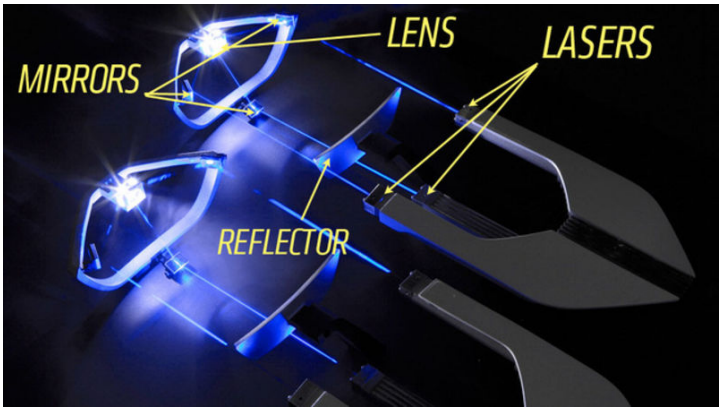


Figura 1.6: Fari anteriori dell'automobile BMW i8 [16].

Un'ulteriore applicazione dei sistemi LARP è costituita dai proiettori, i quali possono beneficiare di sorgenti ad elevata luminosità per riprodurre un'immagine con un forte contrasto. Al giorno d'oggi numerosi produttori di proiettori integrano la tecnologia LARP nei loro prodotti commerciali, sia per la sorgente di luce bianca

primaria, sia in combinazioni ibride con sorgenti LED di diversi colori (vedi Panasonic [27], Barco [3], Christie [9], Sony [34]). Nel caso dei proiettori, i pixel delle immagini proiettate vengono riprodotti grazie a un chip DLP formato da microspecchi, ognuno in grado di assumere diverse orientazioni e direzionare la luce incidente. L'importanza dello sviluppo di sistemi di proiezione a laser nel settore cinematografico è rappresentata dai grandi investimenti nella ricerca da parte dell'azienda IMAX, la quale, assieme a esperti della tecnologia come Panasonic, Sony e Texas Instruments, fa parte del gruppo industriale *Laser Illuminated Projector Association* (LIPA) dedito allo sviluppo di sistemi di proiezione a base di laser per schermi di grandi formati con integrazione della proiezione in 3D [4].

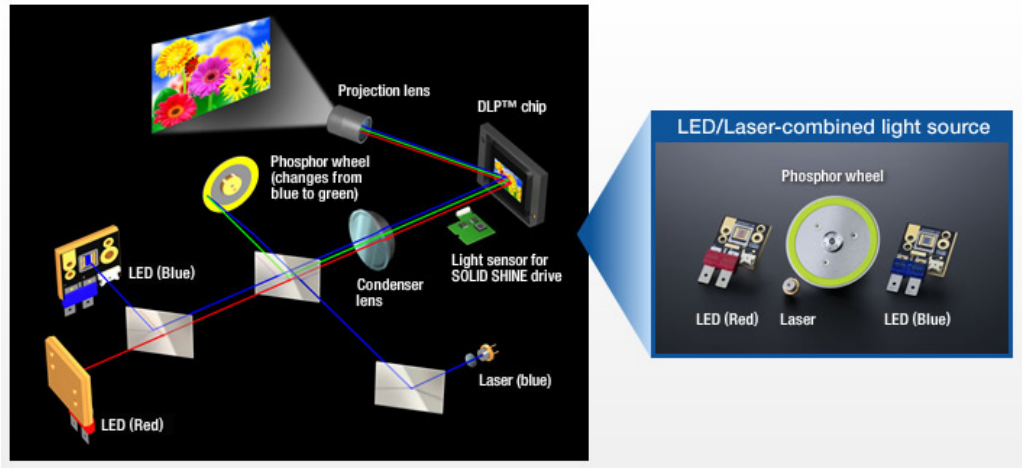


Figura 1.7: Schema funzionale del proiettore PT-RZ470 di Panasonic che include un sistema ibrido con LED, diodo laser e fosfori [27].

Ulteriori vantaggi derivanti dall'utilizzo di laser per sistemi di illuminazione derivano dalle caratteristiche del fascio prodotto dall'emissione stimolata di fotoni coerenti e fortemente direzionati: risulta infatti più facile deviare un fascio laser che focalizzare la luce emessa con grande divergenza spaziale da un LED; solitamente, l'accoppiamento di una fibra ottica con il fascio di un laser è più efficiente che con quello di un LED (caso che richiederebbe una fibra più spessa), e quindi è possibile convogliare la luce del laser e generare la luce bianca in remoto.

Altre applicazioni possono essere pensate nell'ambito dell'illuminazione esterna (di edifici o stadi) o interna (di palscoscenici, oggetti, ecc.), con vantaggi derivanti dall'elevata luminosità ed efficienza energetica.

1.2.3 Problematiche dei sistemi LARP

Oltre alle problematiche analoghe a quelle presenti nei sistemi SSL basati su LED (quale la precisione nell'ottenimento di determinate proprietà di colore della luce emessa), i sistemi LARP presentano peculiari problemi affidabilistici inerenti, dovuti all'utilizzo dei diodi laser e all'elevata intensità luminosa generata.

Innanzitutto, le performance e la durata di vita di un diodo laser sono molto sensibili alle specifiche condizioni operative. Nonostante i produttori dichiarino una durata di vita stimata dei diodi laser disponibili in commercio oggi dell'ordine delle decine di migliaia di ore, queste stime si riferiscono a delle condizioni operative ottimali. Ad esempio, le specifiche del diodo laser utilizzato nella realizzazione del prototipo durante questa tesi, il modello PL TB450B di OSRAM, dichiarano un tempo di vita di 10000 ore in funzionamento continuo a 40°C. Tuttavia, i diodi laser sono altamente sensibili alla temperatura e alla stabilità della sorgente di alimentazione, per cui un'elevata temperatura o una sorgente rumorosa o con picchi di potenza improvvisi possono accorciare significativamente la durata di vita del dispositivo o danneggiarlo completamente [4]. Inoltre, una variazione di temperatura di sole decine di gradi può influire sensibilmente su alcuni parametri del laser, come la corrente di soglia, la potenza ottica emessa, o la posizione del picco di emissione, influendo sulle caratteristiche in termini sia ottici sia colorimetrici del sistema LARP. Di conseguenza, tali sistemi richiedono un accurato controllo della temperatura del laser, con un efficiente sistema di dissipazione di calore e un feedback di controllo che possa compensare le variazioni di temperatura.

Per quanto riguarda i fosfori, anch'essi sono suscettibili alle alte temperature, con un tempo di vita operativa intorno a 50 000 ore [4]. Nel caso di sistemi LARP i fosfori possono subire un'eccitazione con un fascio del laser con elevate densità di potenza concentrate in un'area molto piccola, dell'ordine di pochi mm^2; il conseguente aumento di temperatura nel punto di eccitazione può causare un calo di efficienza, e a lungo termine portare al degrado permanente delle prestazioni di luminescenza. Inoltre, i fosfori devono aderire a un supporto rigido, che può essere suscettibile a temperature elevate, così come eventuali materiali usati per garantire l'adesione. Un sistema LARP durevole deve quindi prevedere una buona dissipazione termica del substrato o del materiale incapsulante dei fosfori.

Dal punto di vista di realizzazione, un sistema LARP richiede un sistema di ottiche che raccolgano la luce omnidirezionale emessa dai fosfori per massimizzare la luce utile fornita dal sistema. Queste ottiche devono essere scelte o progettate in

modo da possedere caratteristiche tali da massimizzare la luce trasmessa o riflessa, a seconda dell'approccio scelto nella fase di design dell'illuminatore. Un adeguato e preciso posizionamento di lenti è necessario per manipolare il fascio sottile del diodo laser e per convogliare la luce di fosforescenza nel modo più efficiente e con minori perdite possibili.

Una problematica importante legata alla sicurezza è costituita dal fatto che la luce collimata di un diodo laser ad elevata potenza può causare danni irreversibili all'occhio umano, o incandescenza di materiali o tessuti biologici. La manipolazione e l'integrazione dei laser deve sottostare a varie procedure e regolamentazioni (ad esempio, la norma IEC 60825 Ed. 2 del 2007) per garantire la sicurezza dell'utilizzatore. In particolare, è fondamentale evitare che il fascio collimato del laser fuoriesca dal sistema LARP senza essere diffuso o assorbito da materiali adeguati.

Infine, l'affermazione di questa nuova tecnologia dipende anche dal suo costo. Attualmente, il laser blu PL TB450 di OSRAM da 1.5 W ha un prezzo di mercato di circa 15 volte superiore a quella di un LED da 1.2 W con una lunghezza d'onda di emissione simile. Questo rapporto di prezzo comporta con ampia probabilità che i sistemi basati su LED manterranno il predominio nelle applicazioni di illuminazione più comuni; ciònonostante, le caratteristiche avanzate di sistemi LARP possono renderle accessibili e competitivi, soprattutto per applicazioni specifiche con requisiti di elevate prestazioni.

1.3 Diodi Laser Blu basati su InGaN

1.3.1 Struttura e principio di emissione

I diodi laser sono dei dispositivi a semiconduttore che producono un'emissione stimolata di luce al loro interno grazie ad un pompaggio elettrico. Come tutti i dispositivi laser, essi sono costituiti da un mezzo a guadagno ottico e da una cavità ottica risonante. La principale caratteristica dei diodi laser rispetto ad altri sistemi laser è la possibilità effettuare il pompaggio tramite l'iniezione diretta di una corrente di portatori, i quali danno origine all'emissione stimolata. Tipicamente, questo metodo permette di raggiungere un'efficienza operativa maggiore: mentre i diodi laser presentano un'efficienza intorno al 30%, l'efficienza dei laser a gas o di quelli a stato solido è intorno all'1% [10].

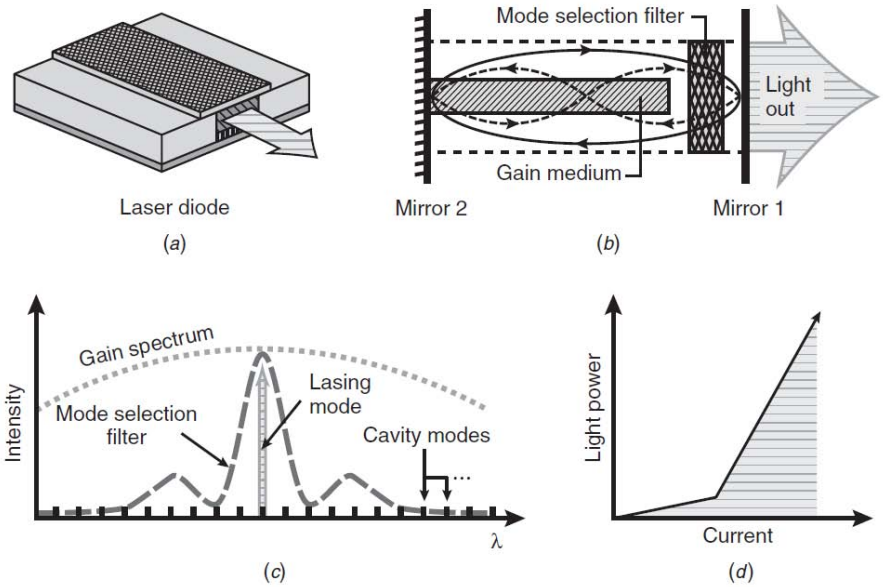


Figura 1.8: Rarppresentazioni relative al funzionamento di un diodo laser: a) struttura geometrica; b) principio della cavità risonante; c) selezione del modo del laser tra i modi ammessi nella cavità; d) caratteristica L-I tipica [10].

La struttura più semplice di un diodo laser, rappresentata in Figura 1.8b, è il cosiddetto risonatore Fabry-Perot, composto da una cavità ottica delimitata da due specchi. Le condizione al contorno indotte dalla geometria della cavità impongono che possano sostenersi solamente delle determinate onde elettromagnetiche

stazionarie, dette *modi*, con lunghezze d'onda ammesse secondo la legge

$$\lambda = \frac{2n}{m} L \tag{1.7}$$

dove n è l'indice di rifrazione del materiale della cavità, m è l'indice del modo oscillante e L è la lunghezza della cavità. Solitamente, risulta possibile selezionare un particolare modo risonante del laser allo scopo di ottenere un'emissione monocromatica, grazie alla progettazione specifica delle proprietà della cavità, degli specchi, o di eventuali elementi ottici che complessivamente effettuano una modulazione dell'intensità dei modi intrinseci della cavità.

I modelli quantistici dei semiconduttori permettono di descrivere l'interazione tra la radiazione elettromagnetica e questi materiali facendo riferimento alle transizioni di portatori tra le bande energetiche del materiale. In particolare, le transizioni tipicamente coinvolgono due livelli energetici, delle coppie elettrone-lacuna e dei fotoni di energia comparabile a quella dell'energy gap tra le bande. Considerando come caso generico un sistema di un seminconduttore con un livello della banda di conduzione E_c e un livello della banda di valenza E_v, si possono descrivere i processi principali di interazione luce-materia: l'assorbimento, l'emissione spontanea e l'emissione stimolata (Fig. 1.9).

L'*assorbimento* di un fotone si verifica quando l'energia del fotone è maggiore o uguale alla differenza tra i livelli energetici ($E_{ph} \approx \Delta E_g = E_c - E_v$). In questo caso un elettrone della banda di valenza può essere eccitato verso uno stato della banda di conduzione assorbendo l'energia del fotone e creando una lacuna nella banda di valenza. Successivamente, una qualsiasi coppia elettrone-lacuna in cui l'elettrone si trova ad un livello energetico superiore può ricombinarsi spontaneamente: transitando verso il livello energetico più basso l'elettrone può rilasciare energia in forma di fotone. Questo processo di emissione *spontanea* è stocastico, come lo è la direzione di emissione del fotone; di conseguenza, la luce emessa in questo caso viene detta incoerente. La ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna può essere provocata anche da un fotone incidente con energia pari all'energy gap, il quale non viene assorbito: in questo caso il fotone emesso dalla ricombinazione ha la stessa energia, direzione e polarizzazione del fotone incidente. Questa emissione, detta *stimolata*, produce una luce coerente.

È possibile esprimere matematicamente i processi citati tramite il tasso di assorbimento $R^{as}_{1\to2}$, di ricombinazione spontanea $R^{sp}_{2\to1}$ e di ricombinazione stimolata $R^{st}_{2\to1}$, i quali sono proporzionali alla popolazione dei portatori del relativo livello di

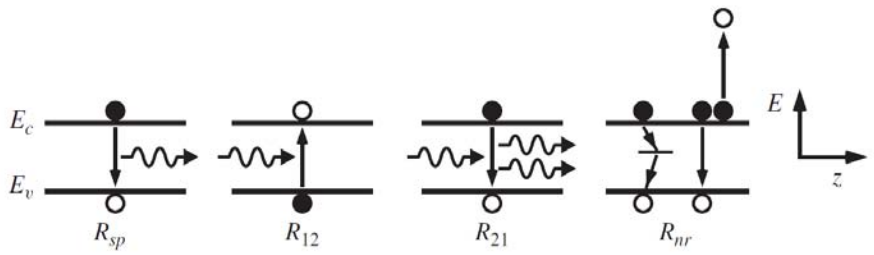


Figura 1.9: Diagrammi delle transizioni possibili tra due livelli energetici: da sinistra a destra, ricombinazione radiativa spontanea, assorbimento, ricombinazione stimolata radiativa, ricombinazioni non radiative [10].

partenza, alla densità di fotoni per unità di volume con energia pari alla differenza tra i livelli di energia interessati nelle transizioni, e infine ai coefficienti di Einstein A_{21}, B_{12} e B_{21}, i quali rappresentano la probabilità di transizione per unità di tempo e di densità di energia spettrale.

$$\begin{aligned} R^{as}_{1\to 2} &= B_{12}N_1\rho_\nu \\ R^{sp}_{2\to 1} &= A_{21}N_2\rho_\nu \\ R^{st}_{2\to 1} &= B_{21}N_2\rho_\nu \end{aligned} \tag{1.8}$$

Supponendo di trovarsi in equilibrio termodinamico e sfruttando la legge di Planck del corpo nero

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1} \tag{1.9}$$

e utilizzando la legge di Boltzmann per descrivere l'occupazione statistica di un livello energetico j-esimo,

$$N_j \propto g_j e^{-\frac{E_j}{kT}} \tag{1.10}$$

con g_j la degenerazione del livello j-esimo, si ottengono le seguenti relazioni tra i coefficienti di Einstein:

$$B_{12}g_1 = B_{21}g_2 \tag{1.11}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \tag{1.12}$$

Nel caso in cui i due livelli energetici interessati dalle transizioni abbiano la medesima degenerazione, si ottengono delle importante relazioni tra il tasso di emissione

spontanea e gli altri due tassi di emissione spontanea e quello di assorbimento:

$$\begin{aligned} \frac{R^{st}_{2\to1}}{R^{sp}_{2\to1}} &= \frac{c^3}{8\pi h\nu^3}\rho_\nu \\ \frac{R^{st}_{2\to1}}{R^{as}_{1\to2}} &= \frac{N_2}{N_1} \end{aligned} \tag{1.13}$$

Queste equazioni mostrano che per ottenere un processo di emissione spontanea che domini sugli altri due è necessario raggiungere un'elevata densità di fotoni ρ_ν e un'inversione di popolazione tra i due livelli ($N_2 > N_1$).

La densità di fotoni elevata viene ottenuta nei diodi laser grazie al pompaggio elettrico ed a un opportuno confinamento di portatori grazie ad un opportuno design della cavità ottica e del materiale costituente, ad esempio tramite l'uso delle etero-strutture di semiconduttori. Il meccanismo principale di incremento del numero di fotoni nella cavità è quello del *guadagno ottico*. Difatti, in condizioni di inversione di popolazione, un'onda elettromagnetica che si propaga lungo la cavità in una direzione x subisce un aumento esponenziale della sua potenza grazie all'emissione stimolata, seguendo una legge $\exp(gx)$. Il guadagno ottico per unità di lunghezza, g, può essere espresso come

$$g = \frac{\partial P}{P\partial x} = \frac{\partial N_{ph}}{N_{ph}\partial x} = \frac{n}{c\partial t}\frac{\partial N_{ph}}{N_{ph}} \tag{1.14}$$

in quanto la potenza ottica P è proporzionale al numero di fotoni N_{ph} che viaggiano con una velocità $v_{ph} = c/n$, con n indice di rifrazione della cavità. Ricordando che l'incremento netto dei fotoni nella cavità dipende sia dalla ricombinazione spontanea sia dall'assorbimento, lo si può esprimere come

$$\frac{\partial N_{ph}}{\partial t} = R^{st}_{2\to1} - R^{as}_{1\to2} = B_{21}N_2\rho_\nu - B_{12}N_2\rho_\nu = B_{21}N_2\rho_\nu \tag{1.15}$$

Inoltre, è possibile esprimere la densità di fotoni con un'approssimazione al primo ordine intorno alla frequenza centrale ν_0:

$$\rho_{\nu_0} \approx \frac{N_{ph}h\nu_0}{\Delta\nu} \tag{1.16}$$

In questo modo, il guadagno ottico viene stimato come

$$g_{\nu_0} \approx B_{21}(N_2 - N_1)\frac{h\nu_0}{\Delta\nu}\frac{n}{c} \tag{1.17}$$

Questa espressione del guadagno ottico va messa in relazione con le differenti perdite nella cavità, dovute principalmente alle perdite nelle riflessioni sugli specchi agli estremi della cavità e a perdite durante la propagazione nel mezzo (assorbimento e diffusioni). Complessivamente l'effetto di queste perdite può essere rappresentato da un coefficiente di attenuazione per unità di lunghezza γ. L'evoluzione della potenza dell'onda che si propaga lungo la direzione x nella cavità segue quindi la seguente legge:

$$P = P_0 \exp[(g - \gamma)x] \tag{1.18}$$

Considerando ora un singolo viaggio di andata e ritorno dell'onda all'interno di una cavità di lunghezza L, tenendo inoltre conto delle riflettività non ideali R_1 e R_2 dei due specchi, l'incremento relativo della potenza dell'onda può essere espresso come

$$\frac{P_f}{P_i} = R_1 R_2 \exp[(g - \gamma)2L] \tag{1.19}$$

Per evitare che l'onda si attenui gradualmente dopo aver effettuato un *round trip* nella cavità, è necessario che il guadagno ottico in potenza dell'eq 1.19 sia pari a 1. Per soddisfare questa condizione, il guadagno ottico per unità di lunghezza deve essere pari al valore di soglia g_{th}

$$g_{th} = \gamma + \frac{1}{2L} \log\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \tag{1.20}$$

Ora, considerando l'eq. 1.17 che lega il guadagno ottico con la differenza di popolazione dei due livelli energetici interessati, si ottiene che per il valore di soglia g_{th} deve essere tale per cui

$$(N_2 - N_1)_{th} \approx g_{th} \frac{\Delta\nu c}{B_{21} h \nu_0 n} \tag{1.21}$$

Il pompaggio elettrico tramite iniezione di portatori consente di variare l'entità dell'inversione di popolazione all'interno del sistema: al di sotto del valore di soglia il guadagno in potenza ottica è dominato dalle perdite di attenuazione; alla soglia il guadagno diventa pari a 1 e l'emissione diventa auto-sostenuta e coerente. Un incremento ulteriore del pompaggio non può incrementare la differenza $(N_2 - N_1)$ in quanto il guadagno in potenza non può essere maggiore a 1: di conseguenza, l'inversione di popolazione tra i due livelli rimane fissata a $(N_2 - N_1)_{th}$ e si verifica un aumento ulteriore dell'emissione stimolata, con maggiore intensità di radiazione emessa dal diodo laser.

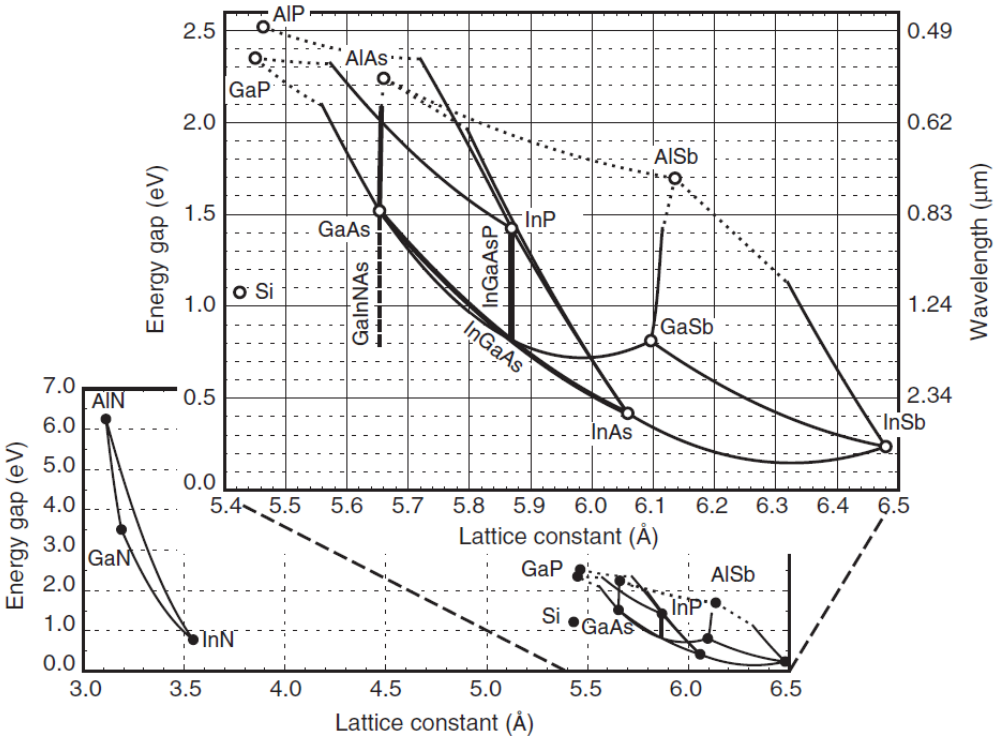


Figura 1.10: Relazione tra l'energy gap e la costante reticolare di alcune leghe. I composti binari sono rappresentati da punti; i rispettivi composti ternari si trovano lungo le curve che uniscono due composti binari, al variare delle percentuali di componenti della lega [10].

Per facilitare la ricombinazione tra le coppie elettrone-lacuna risulta necessario confinare all'interno di una zona attiva i portatori, i quali tendono naturalmente a diffondere nel materiale. Inoltre, è importante mantenere un buon confinamento ottico dei fotoni nella cavità, in modo da ridurre le perdite e favorire le condizioni di emissione stimolata. Per questi motivi, al giorno d'oggi i diodi laser adottano una struttura interna a eterogiunzione, nella quale vengono disposti materiali semiconduttori con diversi valori di energy-gap, tipicamente di una stessa tipologia (III-V, II-VI). Tale approccio permette di realizzare sia una buca di potenziale nella quale confinare i portatori sia un confinamento ottico, grazie a un'adeguata differenza tra gli indici di rifrazione dei materiali. Inoltre, è possibile realizzare un confinamento laterale della zona attiva circondandola da una regione con elevata resistività oppure con uno specifico design del contatto ohmico attraverso il quale direzionare la corrente di pompaggio. La riduzione dell'area trasversale permette di incrementare la densità di corrente di iniezione, ottenendo una maggiore efficienza ma anche un'area di emissione più piccola, adeguata per l'accoppiamento con una fibra ottica.

Poichè la lunghezza d'onda dei fotoni emessi dal diodo laser è legata alla differenza tra i livelli energetici del materiale nella zona attiva del dispositivo, risulta evidente l'importanza di utilizzare dei materiali con energy gap calibrato sulla cromaticità specifica della radiazione che si vuole emettere. In questo senso l'avanzamento tecnologico grazie ai lavori dei premi Nobel per la Fisica del 2014 Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura sul nitruro di gallio (GaN) è particolarmente rilevante per i dispositivi optoelettronici, in quanto il GaN, oltre ad essere stabile e possedere un bandgap diretto che favorisce le transizioni radiative dirette, in combinazione con Al o In in diverse quantità permette di ottenere delle leghe con dei valori di energy-gap in un vasto intervallo (Fig. 1.10); in particolare, i laser blu che emettono a lunghezze d'onda intorno a 450 nm sono composti da InGaN, il cui bandgap può variare tra 2.0 eV e 3.4 eV a seconda della concentrazione di In [22].

1.3.2 Proprietà elettriche

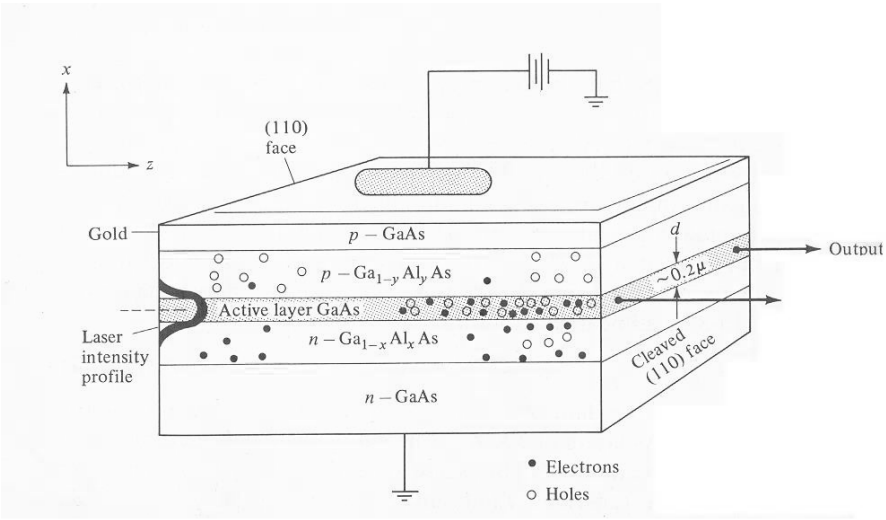


Figura 1.11: Esempio della struttura interna di un diodo laser a doppia eterogiunzione [10].

Al fine di esplicitare analiticamente la relazione tra la corrente di iniezione di portatori e l'emissione di potenza ottica in un diodo laser è opportuno considerare una tipica struttura a doppia eterogiunzione (Fig. 1.11). Supponendo che la zona attiva abbia lunghezza L, spessore d e larghezza w, all'equilibrio dinamico a regime il tasso di iniezione di elettroni nella regione attiva può essere espresso come somma

tra i tassi di ricombinazione spontanea e stimolata di questi elettroni:

$$\frac{I}{qdLw} = \frac{n}{\tau_{sp}} + CnN_p \tag{1.22}$$

dove n è la concentrazione di elettroni iniettati dalla corrente I, N_p è la concentrazione di fotoni nella zona attiva, τ_{sp} è il tempo di vita medio per la ricombinazione spontanea, e C una costante legata al coefficiente di ricombinazione stimolata B_{21}. Come descritto precedentemente, all'aumentare del pompaggio, N_p aumenta fino a superare il valore di soglia oltre il quale la ricombinazione stimolata domina su quella spontanea.

Allo stesso tempo, a regime il tasso di diminuzione dei fotoni nella regione attiva deve uguagliare il tasso di emissione spontanea dei fotoni:

$$\frac{N_p}{\tau_p} = CnN_p \tag{1.23}$$

indicando con τ_p il tempo di vita medio dei fotoni nella cavità, i quali la abbandonano per trasmissione verso l'esterno, o per perdite di dispersione o di attenuazione nel materiale. Questa condizione, che rimane valida alla soglia a cui l'intensità dell'emissione stimolata raggiunge quella spontanea, indica che alla soglia la densità di elettroni iniettati vale

$$n_{th} = \frac{1}{C\tau_p} \tag{1.24}$$

Inoltre, alla soglia possiamo considerare $N_p = 0$, ottenendo dall'eq. 1.22 l'espressione per la corrente di soglia

$$I_{th} = \frac{qdLwn_{th}}{\tau_{sp}} \tag{1.25}$$

Al fine di aumentare l'efficienza del dispositivo, conviene realizzare diodi laser con correnti di soglia basse, e dall'espressione precedente si osserva che per farlo è necessario ridurre le dimensioni spaziali della regione attiva.

Superato il valore di soglia, la densità di portatori iniettati rimane fissa a n_{th}, in quanto il guadagno ottico permette di aumentare contemporaneamente il numero di fotoni N_p e le emissioni stimolate. In questa condizione di $n = n_{th}$, l'eq. 1.22 diventa

$$\frac{I - I_{th}}{qdLw} = Cn_{th}N_p \tag{1.26}$$

Quest'ultima equazione permette di esprimere il numero di fotoni coerenti nella

regione attiva in funzione della densità di corrente $J = I/Lw$:

$$N_p = \frac{\tau_p}{qd}(J - J_{th}) \tag{1.27}$$

Dunque, è possibile ricavare la potenza ottica P_o emessa tramite fotoni coerenti del diodo laser verso l'esterno supponendo che i fotoni vengano emessi dal lato di un solo specchio in percentuale $(1 - R)$. I fotoni utili che si muovono nella direzione di questo specchio sono in numero $N_p/2$ e il tempo loro richiesto per attraversare la cavità ottica è di $\Delta t = n_r L/c$. La potenza ottica può quindi essere ricavata dal rapporto

$$P_o = \frac{\left(\frac{1}{2}N_p\right)(Volume\, cavita')(Energia\, fotone)(1 - R)}{\Delta t} \tag{1.28}$$

che, sostituendo N_p con l'espressione che la lega alla densità di corrente, diventa

$$P_o = \left[\frac{hc^2\tau_p w(1 - R)}{2qn_r\lambda}\right](J - J_{th}) \tag{1.29}$$

L'andamento tipico della potenza ottica emessa da un diodo laser al variare della corrente è rappresentato in Fig. 1.12. Poiché per correnti inferiori alla corrente di soglia I_{th} l'emissione spontanea domina su quella stimolata, il comportamento del diodo laser è equivalente ad quello di un LED. Oltre la soglia, tuttavia, l'aumento della potenza ottica emessa dal diodo laser è significativamente maggiore rispetto ad un LED. Inoltre, per correnti maggiori di I_{th} la relazione L-I è lineare finché la corrente I non è eccessivamente elevata.

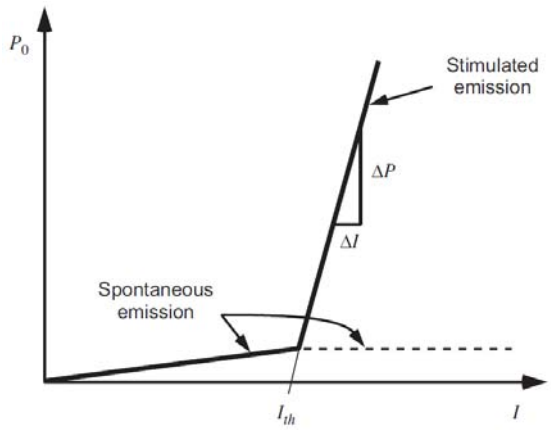


Figura 1.12: Rappresentazione della potenza ottica in funzione della corrente di un diodo laser: al di sotto del valore di soglia I_{th} l'emissione spontanea è dominante; sopra la soglia l'emissione stimolata cresce rapidamente, mentre l'emissione spontanea rimane fissata al suo valore in corrispondenza della soglia [10].

1.3.3 Effetto della temperatura

In un diodo laser sono numerosi i parametri che possono essere influenzati dalla temperatura, la cui variabilità può indurre complessivamente una variazione significativa delle sue caratteristiche elettriche e ottiche del dispositivo. L'aumento della temperatura interna del dispositivo è generalmente dovuto alla resistenza serie interna al dispositivo.

All'aumentare della temperatura l'energia media dei i portatori nel materiale aumenta, causando un minore confinamento dei portatori nella regione attiva e conseguentemente una minore efficienza di ricombinazione. Inoltre, l'aumento della temperatura produce di solito un aumento di ricombinazioni tramite processi Auger non-radiativi. Complessivamente questi fenomeni fanno sì che la soglia I_{th} aumenta al crescere della temperatura. Tale dipendenza è ben descrivibile da una relazione di tipo esponenziale [10]:

$$I_{th} = I_0 e^{T/T_0} \tag{1.30}$$

dove T_0, espressa in Kelvin, è detta "temperatura caratteristica" del dispositivo. Maggiore è il valore di tale parametro, più è bassa la sensibilità del dispositivo alle variazioni di temperatura.

La corrente sopra soglia è dipendente in modo analogo dalla temperatura, anche se in misura minore. È possibile quindi scrivere

$$I - I_{th} = I_{p0} e^{T/T_\eta} \tag{1.31}$$

Infine, la temperatura può influire sulla lunghezza d'onda dei fotoni coerenti, in quanto il suo aumento causa una variazione dell'occupazione dei livelli energetici da parte dei portatori nella regione attiva, con un effetto sull'energy gap del materiale.

Considerando i molteplici effetti rilevanti che la temperatura ha su sulle performance elettro-ottiche del diodo laser, risulta chiara la necessità di mantenere il diodo laser ad una temperatura operativa costante. Per questo motivo i diodi laser devono essere montati su supporti termoregolati (dissipatori o celle Peltier) che permettano di limitare la variazione di temperatura del dispositivo. Tuttavia, poiché questo metodo potrebbe non essere sufficiente, i laser solitamente richiedono un sistema di feedback in potenza ottica, il quale permetta di controllare la corrente del diodo laser per controbilanciare l'autoriscaldamento del diodo durante l'utilizzo, in modo da ottenere un'emissione ottica costante.

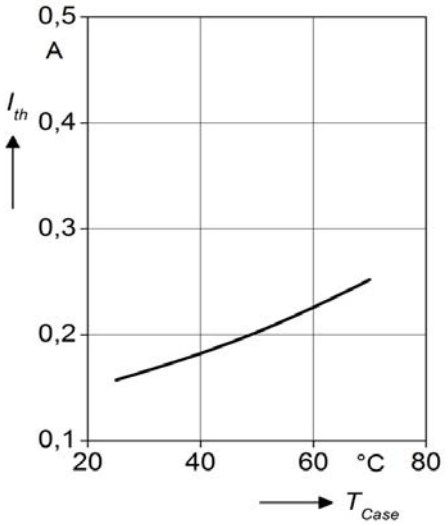


Figura 1.13: Relazione tra la corrente di soglia I_{th} e la temperatura del *case* del diodo laser T_{case} indicata dal datasheet del diodo PL TB450B [26].

1.3.4 Sicurezza

La luce coerente e a elevata intensità di un diodo laser può essere dannosa per i tessuti biologici umani, in particolare per gli occhi e per la pelle, così come per l'ambiente di lavoro per via di rischi di incendio provocati dal fascio del laser. Di conseguenza, l'utilizzo di un laser in laboratorio e nei sistemi integrati richiede una particolare attenzione e rispetto delle relative normative di sicurezza.

Gli apparecchi laser vengono classificati secondo la norma CEI EN 60825-1 in base alla loro potenza emessa e all'intervallo di lunghezza d'onda emesse. In particolare, si distinguono le seguenti classi di laser:

- **Classe 1:** laser sicuri, senza nessun pericolo per l'utilizzatore o per l'ambiente.

- **Classe 1M:** laser emittenti tra 302,5 nm e 4000 nm con potenza non superiore a 1 mW; vengono considerati sicuri in normali condizioni operative, ma possono essere pericolosi nel caso di utilizzo di particolari strumenti ottici lungo il percorso del fascio del laser.

- **Classe 2:** laser con emissione nel visibile, tra 400 nm e 700 nm, con potenza non superiore a 1 mW.; l'osservazione diretta del fascio non è pericolosa in quanto la protezione dell'occhio avviene tramite il riflesso palpebrale naturale, anche nel caso di impiego di strumenti ottici per l'osservazione.

- **Classe 2M:** laser con emissione nel visibile, tra 400 nm e 700 nm, con potenza non superiore a 1 mW; l'osservazione diretta del fascio è protetta dalla reazione di difesa dell'occhio, ma essa può essere pericolosa se si utilizzano strumenti ottici per la visione diretta.

- **Classe 3:** laser con emissione nel visibile, con potenza ottica non superiore a 5 mW; l'osservazione diretta con ottiche di amplificazione può essere dannosa, ma l'osservazione a occhio nudo non è pericolosa per via del riflesso palpebrale.

- **Classe 3B:** laser con potenza ottica non superiore a 500 mW, pericolosi in caso di visione diretta del fascio; le riflessioni diffuse sono generalmente sicure. Per via del rischio di danno è necessario l'utilizzo di misure precauzionali di sicurezza.

- **Classe 3R:** laser che emettono nell'intervallo tra 302,5 nm e 10^6 nm con potenza ottica fino a 5 mW, la cui visione diretta è potenzialmente pericolosa ma con un rischio minore rispetto ai laser di classe 3B.

- **Classe 4:** laser capaci di dare origine a riflessioni diffuse pericolose che possono provocare danni agli occhi, alla pelle, o provocare un incendio. Il loro utilizzo richiede delle misure di sicurezza e una particolare attenzione.

Le misure di sicurezza richieste dai laser di classe 3 e 4 sono costituite dalle protezioni degli occhi, in forma di maschera o occhiali con un adeguato assorbimento della luce del laser; dai vestiti protettivi ignifughi (guanti, camici, ecc.) in caso di elevati livelli di esposizione al fascio laser; dalla formazione e sorveglianza medica periodica dell'utilizzatore. Inoltre, l'ambiente in cui si utilizza un laser deve essere segnalato e l'accesso deve essere riservato al personale munito di protezioni necessarie ed è necessario garantire che la luce del laser non esca dall'ambiente tramite riflessioni accidentali.

L'elevata pericolosità del diodo laser richiede che un dispositivo commerciale che integri un laser, come un sistema di illuminazione LARP, sia realizzato in modo tale da garantire la sicurezza di utilizzo di tale dispositivo. Di conseguenza, il produttore deve garantire che la luce coerente del laser non fuoriesca dal package del sistema. Per utilizzare a fini d'illuminazione la potenza ottica del laser, è quindi necessario che il fascio venga diffuso da un elemento ottico apposito, in modo da perdere la coerenza e l'elevata intensità del fascio laser. In questo contesto, una particolare attenzione è richiesta per sistemi in configurazione di trasmissione attraverso il fosforo remoto.

Infatti, il danneggiamento del materiale luminescente o del suo supporto, provocato dal degrado graduale o da cause esterne, può permettere al fascio laser di essere proiettato verso l'esterno direttamente, con conseguenti problematiche legate alla sicurezza delle persone.

1.4 Fosfori remoti per Solid-State Lighting

1.4.1 Requisiti dei fosfori per SSL

Il fosforo è uno degli elementi principali di una moderna tecnologia di illuminazione a stato solido. Come menzionato precedentemente, nei sistemi basati su LED, questo materiale assorbe la luce UV, viola o blu dei LED e la converte in luce visibile con uno spettro e colore specifici, tipicamente tali da formare luce bianca (Fig. 1.14). Di conseguenza, il fosforo riveste un ruolo importante nella ricerca di un sistema di illuminazione con buone caratteristiche, in quanto esso influisce sull'efficienza luminosa del sistema, sulle proprietà del colore della luce emessa e sulla durata di vita del dispositivo.

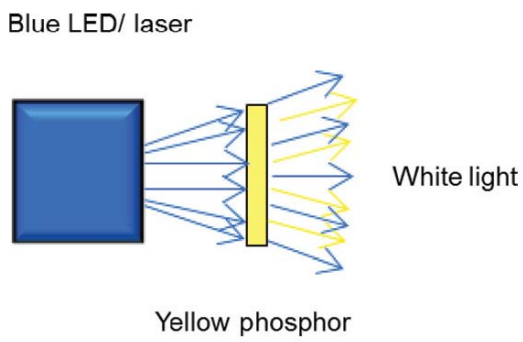


Figura 1.14: Principio di emissione di luce bianca tramite miscelazione della luce blu della sorgente SSL con la luce gialla dei fosfori [4].

Con il termine fosforo si designa ogni materiale luminescente, ossia capace di emettere luce visibile. Questa definizione base comprende una grande varietà di materiali (ossidi, solfuri, fosfati, nitruri, alluminati, silicati, polveri policristalline e quantum dot) con differenti combinazioni di elementi e tecnologie di realizzazione che producono dei fosfori con diverse caratteristiche. Il primo impiego delle proprietà luminescenti dei fosfori risale a circa un secolo fa; al giorno d'oggi la tecnologia dei fosfori ha raggiunto un buon grado di maturità ed e viene utilizzata in numerose applicazioni. Infatti, anche in passato, i fosfori erano utilizzato nei tubi catodici dei televisori, nelle lampade fluorescenti o nei pannelli display a plasma. Sfortunatamente, molti di questi fosfori "tradizionali" non sono adatti ai sistemi di illuminazione a stato solido, principalmente per via della loro bassa efficienza di conversione della radiazione emessa dai LED e del loro elevato *quenching* termico alla temperatura a cui si possono trovare i *package* dei LED in condizioni operative prolungate. Di

conseguenza, un'importante filone di ricerca è orientato al miglioramento di queste ed altre proprietà dei fosfori, specifiche per il SSL. Queste proprietà possono variare a seconda dell'applicazione specifica: ad esempio, un LED bianco per retroilluminazione (TV, schermi LCD) deve avere una gamma di colore più ampia possibile, ossia una stretta banda di emissione dei fosfori che corrisponda ai filtri dei colori del LCD; al contrario, i LED bianchi per illuminazione generica o per applicazioni mediche devono fornire un CRI più alto possibile. In generale, le principali proprietà richieste dai fosfori per applicazioni SSL sono elencate di seguito [45].

- *Forte assorbimento con alta efficienza di conversione della radiazione dei LED ed elevata intensità luminosa emessa*: un forte assorbimento comporta che un maggiore numero di fotoni diano origine alla luminescenza, e questo in generale aumenta l'efficienza, con minori perdite di energia. Lo spettro di eccitazione deve inoltre corrispondere allo spettro emesso dalla sorgente SSL.

- *Adeguato spettro di emessione*: oltre a determinare il colore finale della luce, la larghezza della banda di emissione influisce sul compromesso tra una elevata resa di colori e un ampio gamut di colori (elevata purezza dei colori), caratteristiche ottenute rispettivamente con un ampio e stretto spettro di emissione.

- *Ridotto quenching termico dell'intensità luminosa*: il quenching dei fosfori è il motivo principale del degrado di lampade a LED che influisce sulla durata di vita e la cromaticità dell'illuminatore.

- *Stabilità chimica e resistenza a temperatura e umidità elevate*: il fosforo deve mantenere la propria composizione chimica e struttura cristallina assieme alla valenza degli ioni di drogaggio nell'atmosfera dell'ambiente; in particolare, esso non deve reagire con CO, CO_2, H_2O e gli altri elementi e composti comunemente presenti nell'atmosfera.

- *Distribuzione uniforme di particelle fini*: in generale si cerca di ottenere delle particelle dei fosfori con dimensione di 5-20 μm e una forma sferica al fine di favorire una deposizione compatta e uniforme.

- *Facilità di sintetizzazione e di produzione in grandi volumi*: ciò dipende da fattori come i materiali grezzi, i processi sintetici e le condizioni di realizzazione.

- *Assenza di elementi chimici pericolosi per l'ambiente e nocivi per l'uomo.*

Il miglioramento di queste proprietà avviene attraverso lo studio e la selezione dei materiali costituenti il fosforo. In effetti, quest'ultimo è di solito formato da un reticolo cristallino inorganico drogato con una bassa quantità di impurità (ioni di terre rare o di metalli di transizione), detti centri di attivazione. Entrambi questi componenti e l'interazione tra loro determinano le proprietà e il comportamento dei processi fisici, di luminescenza e non, all'interno del fosforo. Tra questi processi, troviamo i fenomeni ottici di interazione luce-materia, come la rifrazione, la riflessione, l'assorbimento, lo *scattering* e la luminescenza. Di seguito vengono descritti questi fenomeni, approfondendo quelli più importanti per le specifiche richieste nell'ambito SSL elencate sopra.

1.4.2 Fenomeni radiativi e non nei materiali fosforescenti

Riflessione

Il fenomeno della riflessione implica che i raggi di luce incidenti sulla superficie del mezzo vengano deviati nello stesso semispazio di provenienza. Matematicamente si parla di riflettività, definita come il rapporto tra l'intensità di luce riflessa e quella incidente sulla superficie:

$$R = \frac{I_R}{I_0} \tag{1.32}$$

In particolare, poiché i fosfori sono costituiti in genere di particelle con dimensioni dell'ordine del micrometro, si parla di riflessione diffusa, in quanto la luce che incide sulla loro superficie con un certo angolo viene riflessa in diverse direzioni a causa delle irregolarità della superficie.

Assorbimento

L'assorbimento avviene quando la frequenza della luce incidente è in risonanza con la frequenza di transizione tra due stati di energia degli atomi o molecole materiale (spesso da uno stato fondamentale a uno stato eccitato). Dal punto di vista matematico, la condizione perché ciò accada è la seguente:

$$h\nu = E_f - E_i \tag{1.33}$$

dove $h = 6.62 \times 10^{-34} J$ è la costante di Planck, ν è la frequenza del fotone di luce incidente e E_f e E_i sono rispettivamente il livello di energia finale e iniziale del sistema, dopo e prima della transizione tra questi livelli (Fig. 1.15).

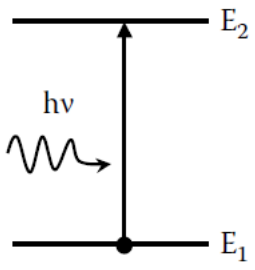


Figura 1.15: Transizione tra due stati di un atomo in seguito all'assorbimento di un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$ [45].

Per via di questo processo, la luce che attraversa il mezzo viene attenuata secondo la legge di Lambert-Beer (eq. 1.34)

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \tag{1.34}$$

dove $I(z)$ è l'intensità della luce che attraversa il mezzo alla coordinata di profondità z, I_0 è l'intensità della luce che incide sulla superficie ($I_0 = I(z = 0)$) e α è il coefficiente di attenuazione. La luce assorbita dal fosforo può essere riemessa attraverso il processo di luminescenza oppure dispersa tramite dei processi non-radiativi che verranno descritti in seguito.

Si noti che talvolta, ad esempio nelle specifiche degli elementi ottici come le lenti o i filtri, l'assorbimento viene descritto con la densità ottica (*optical density* OD) o "assorbanza", secondo la formula seguente

$$OD = log_{10}\left(\frac{I_0}{I(z)}\right) \tag{1.35}$$

In questa espressione, z rappresenta tipicamente lo spessore dell'elemento attraversato dalla luce considerata (ad esempio, una lente).

Trasmissione

Se la luce che attraversa il mezzo non viene assorbita, essa viene trasmessa. Matematicamente si rappresenta questo fenomeno con la trasmissività T. In caso di assorbimento trascurabile vale la relazione

$$R + T = 1 \tag{1.36}$$

mentre, nel caso di un mezzo con coefficiente di assorbimento α, di spessore z e uguale reflettività sulle sue superfici fronte e retro, la trasmissività può essere espressa come

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha z} \tag{1.37}$$

Scattering

Questo fenomeno sussiste ogniqualvolta la luce cambia la propria direzione di propagazione durante l'attraversamento di un mezzo. In particolare, lo scattering può essere elastico o inelastico, a seconda che la luce deviata mantenga o meno la stessa frequenza. In generale, la deviazione della luce è dovuta alle variazioni dell'indice di rifrazione del mezzo su scale di lunghezze più corte della lunghezza d'onda della luce che viene deviata. Queste variazioni derivano dalla presenza di impurità, difetti o non-omogeneità nel mezzo. Si descrive il fenomeno dello scattering con la seguente legge:

$$I(z) = I_0 e^{-N\delta_s z} \tag{1.38}$$

dove N è il numero di centri di scattering per unità di volume e δ_s è la sezione d'urto del centro di scattering. Se la dimensione del centro di scattering è molto minore della lunghezza d'onda della luce incidente, lo scattering viene chiamato di tipo Rayleigh, e in questo caso la sezione d'urto dipende dalla lunghezza d'onda:

$$\delta_s(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4} \tag{1.39}$$

Da questa espressione si deduce l'importanza di ottenere un fosforo con particelle di dimensioni omogenee, altrimenti la luce di lunghezze d'onda più corte subirebbe lo scattering in modo più forte della luce con lunghezze d'onda più lunghe.

Luminescenza

Con questo termine si indica un fenomeno in cui gli atomi effettuano una transizione verso uno stato fondamentale con emissione spontanea di un fotone, dopo che essi sono sono stati eccitati verso stati ad energia più elevata tramite assorbimento di radiazione con frequenza appropriata (Fig. 1.16). Tuttavia, non sempre si ha luminescenza in corrispondenza di un assorbimento, in quanto possono accadere dei processi di de-eccitazione non-radiativa che posticipano l'emissione spontanea.

I processi fisici che intervengono nella luminescenza sono più complicati di quelli nell'assorbimento, poiché l'emissione di luce da parte del materiale dipende dai numerosi meccanismi di rilassamento di energia in tale materiale e dalla distribuzione

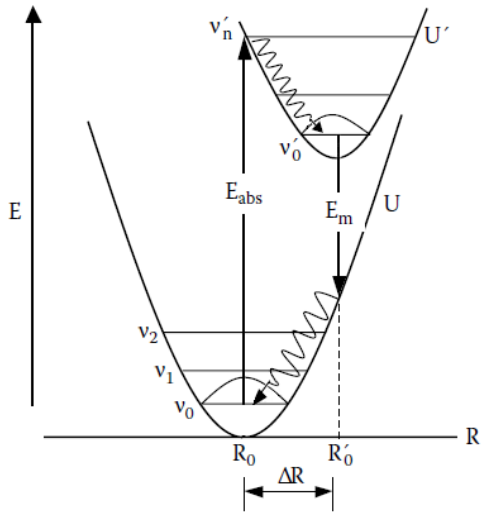


Figura 1.16: Rappresentazione in un diagramma di energia dei processi che contribuiscono al fenomeno di luminescenza. U e U' sono rispettivamente le parabole dello stato di energia fondamentale e dello stato eccitato, R_0 e R_0' sono le loro distanze interatomiche di equilibrio e v_i sono i loro livelli vibrazionali. E_{abs} è l'energia assorbita nell'eccitazione, E_m quella emessa radiativamente, mentre le frecce ondulate rappresentano i rilassamenti non-radiativi [45].

termica degli elettroni e lacune nelle rispettive bande di energia. Di conseguenza, per poter trattare l'efficienza e lo spettro di luminescenza, è necessario prendere in considerazione i tassi di emissione e la distribuzione di portatori nelle bande. Un'emissione radiativa dovuta a una transizione da uno stato eccitato a uno fondamentale è descritta dalla seguente espressione:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{rad} = -AN \tag{1.40}$$

dove A è il coefficiente di Einstein della transizione e N è la popolazione dello stato eccitato. Questa equazione fornisce il tasso di variazione della popolazione del livello superiore nel tempo, in quanto risolvendola si ottiene

$$N(t) = N(0)e^{-At} = N(0)e^{-\frac{t}{\tau_R}} \tag{1.41}$$

dove $\tau_R = 1/A$ viene chiamato la durata di vita, o *lifetime*, della transizione radiativa. Analogamente, è possibile associare un tempo di vita τ_{NR} ai processi di rilassamento dell'energia non radiativi, che quindi non producono un'emissione di radiazione. Ora, considerando anche i processi non-radiativi nell'equazione 1.40 si

ottiene la seguente espressione che descrive la popolazione dello stato eccitato:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{tot} = -\frac{N}{\tau_R} - \frac{N}{\tau_{NR}} = -N\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}}\right) \tag{1.42}$$

Di conseguenza, è possibile ricavare l'efficienza di emissione radiativa dal rapporto tra il tasso di emissione radiativa (eq. 1.40) e il tasso di de-eccitazione totale (eq. 1.42), ottenendo

$$\eta_R = \frac{AN}{N\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_R}{\tau_{NR}}} \tag{1.43}$$

Da questa espressione si deduce che per massimizzare l'efficienza di emissione radiativa è necessario avere un tempo di vita radiativo molto minore del tempo di vita non-radiativo($\tau_R \ll \tau_{NR}$).

Eccitazione. Nel caso di materiali luminescenti composti da un reticolo ospitante e da centri di attivazione il processo di eccitazione può essere classificato in due tipologie. L'eccitazione diretta si verifica quando i centri di attivazione assorbono direttamente l'energia di una radiazione incidente, con i loro atomi che transitano verso uno stato eccitato. L'eccitazione indiretta invece comporta un assorbimento dell'energia in primo luogo da parte del reticolo, il quale poi la trasferisce agli ioni di attivazione portandoli in uno stato eccitato. Nella maggior parte dei casi, i livelli di energia degli ioni si trovano nel bandgap tra le bande di valenza e quella di conduzione del reticolo ospitante, per cui l'energia necessaria per un'eccitazione diretta è minore di quella richiesta in un'eccitazione indiretta; inoltre, quest'ultimo tipo di transizione ha di solito un'efficienza minore. Tali differenze sono importanti nei fosfori impiegati nel SSL, in quanto le sorgenti di eccitazione, emittenti luce UV o blu, hanno un'energia minore rispetto al caso delle lampade fluorescenti o tubi catodici.

La Figura 1.17 rappresenta lo spettro di eccitazione del fosforo YAG:Ce^{3+}, caratterizzato da due bande larghe e intense in corrispondenza di 340 nm e 455 nm, una banda debole nell'intervallo 200-300 nm. Poiché il reticolo YAG non dopato possiede solo un picco di assorbimento intorno a 190 nm, si deduce che questo spettro è dovuto solo all'assorbimento da parte degli ioni di attivazione Ce^{3+}. In particolare, le due bande intorno a 340 nm e 455 nm sono prodotte dalle transizioni di questo ione dallo stato fondamentale $^2F_{5/2}$ a due livelli di energia diversi dello stato eccitato 5d.

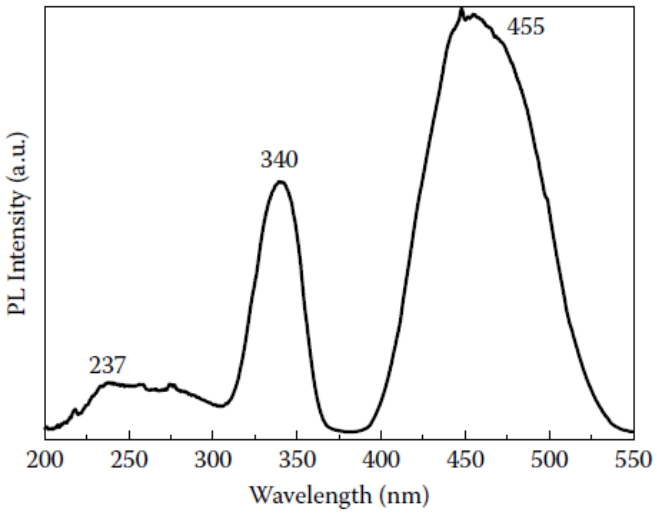


Figura 1.17: Spettro di eccitazione di YAG:Ce^{3+} [45].

In generale, tuttavia, lo spettro di eccitazione dipende sia dagli ioni di attivazione sia dal reticolo che li ospita. Di seguito vengono descritti i processi fisici relativi a questi componenti dei fosfori, le cui dinamiche risultano fondamentali nella determinazione della forma dello spettro di eccitazione del materiale luminescente.

Larghezza della banda di eccitazione. È possibile spiegare la larghezza più meno ampia di un picco di eccitazione di un materiale facendo riferimento al diagramma dei suoi livelli di energia, come per esempio quello in Figura 1.16. Questo diagramma rappresenta l'energia E dei nuclei in vicinanza di un centro di assorbimento in funzione della distanza interatomica R del materiale. Si può osservare come i livelli degli atomi, considerati come degli oscillatori armonici, sono quantizzati nei livelli vibrazionali con funzioni d'onda $v_0, v_1, v_2, \ldots, v_n$ all'interno del loro stato di energia fondamentale U, di forma parabolica. Questa forma deriva dall'ipotesi che gli ioni siono in moto vibrazionale armonico sotto l'effetto di una forza $F = -k(R - R_0)$, in un potenziale di energia $E = \frac{1}{2}k(R - R_0)^2$, dovuto all'influenza di atomi adiacenti nel materiale [6]. La quantizzazione dei livelli di energia di un oscillatore armonico produce la separazione dei livelli vibrazionali $E_v = (v + \frac{1}{2})h\nu$, con $v = 0, 1, 2, \ldots$. Il quadrato del modulo delle funzioni d'onda v_i rappresenta la probabilità che il sistema si trovi ad una data coordinata R per un certo livello di energia: per il livello più basso (v_0) la massima probabilità si trova in corrispondenza del centro della parabola R_0, mentre per livelli più alti la probabilità tende a

essere maggiore lontano dal centro. Gli stati eccitati di un centro di assorbimento sono rappresentati dalla parabola U', con il minimo in corrispondenza di R'_0. Le due parabole U' e U sono traslate di $\Delta R = R'_0 - R_0$ l'una rispetto all'altra in quanto i legami chimici nello stato eccitato sono diversi da quelli nello stato fondamentale, provocando la variazione della distanza interatomica di equilibrio.

L'assorbimento di energia provoca una transizione dal livello vibrazionale più basso v_i dello stato fondamentale U verso uno dei livelli vibrazionali v'_j nello stato di energia eccitato U'. Secondo il principio di Franck-Condon, la transizione è tanto più probabile quanto è maggiore la sovrapposizione delle funzioni d'onda dei livelli v_i e v'_j lungo la coordinata R alla quale avviene l'assorbimento. La transizione più probabile sarà quindi da v_0 alla coordinata R_0, dove la funzione d'onda è massima, verso un livello v'_j in corrispondenza del punto della parabola U' all'ascissa R_0. L'energia assorbita in questa transizione corrisponde allora all'energia E_{abs} del picco di assorbimento del materiale, in quanto la massima probabilità di transizione si traduce in una massima intensità del fenomeno. Tuttavia, sono ammesse le transizioni alle coordinate R diverse da R_0, quindi con $E \neq E_{abs}$, e queste transizioni contribuiscono a comporre la banda di energie di assorbimento intorno al picco E_{abs}. Si possono quindi considerare due casi con bande di assorbimento sostanzialmente differenti:

- se $\Delta R = 0$, le parabole dello stato fondamentale e di quello eccitato sono allineate; la sovrapposizione tra funzioni d'onda vibrazionali è massima per la coppia di livelli $v = 0$ e $v' = 0$ in corrispondenza di R_0. Ne risulta uno stretto picco nello spettro di eccitazione;

- se $\Delta R \neq 0$ la transizione dal livello $v = 0$ avviene verso vari livelli $v' > 0$, per via di numerose sovrapposizioni favorevoli di funzioni d'onda. In tal caso, si ha una banda di eccitazione più larga, e la sua larghezza è tanto più grande quanto è maggiore la differenza ΔR tra le due parabole degli stati di energia.

Regole di selezione e intensità della banda di eccitazione. La probabilità di transizione tra due stati dipende non solo dalla sovrapposizione delle funzioni d'onda, bensì anche da alcune regole di selezione che discriminano le transizioni permesse da quelle proibite. In particolare due regole sono importanti per le transizioni elettroniche.

- *Regola di selezione dello spin.* Le transizioni permesse sono quelle che conservano lo spin dell'elettrone ($\Delta S = 0$). Questa regola si traduce nella con-

servazione del numero di elettroni disaccoppiati negli orbitali d, per via del principio di esclusione di Pauli.

- *Regola di selezione dell'orbitale.* Nelle transizioni permesse il numero quantico del momento angolare deve variare solo di una unità ($\Delta l = \pm 1$), per impedire la ridistribuzione degli elettroni nello stesso insieme di orbitali atomici.

Nella pratica, numerosi fenomeni permettono che si verifichino raramente delle transizioni proibite da queste regole di selezione. Tuttavia, in generale, le transizioni che seguono tali regole sono più favorite e corrispondono a uno spettro di eccitazione più intenso. In particolare, lo spettro del Ce^{3+} è dovuto alle transizioni permesse tra i livelli 4f e 5d, quindi l'intensità di assorbimento di questo centro di attivazione è particolarmente elevata.

Effetto del reticolo ospitante sull'eccitazione. Le bande di assorbimento di un dato ione libero possono differire in modo significativo a seconda del reticolo che lo ospita. Infatti, gli ioni del reticolo influenzano lo ione dopante attraverso i legami chimici di diversa natura che possono formarsi tra di essi. In particolare, due fenomeni intervengono nella variazione dello spettro di eccitazione dello ione dopante.

- *Effetto nefelauxetico.* Detto anche *effetto di espansione della nuvola elettronica*, questo fenomeno è dovuto alla variazione della valenza del legame tra lo ione e gli atomi del reticolo. All'aumentare della covalenza l'interazione tra gli elettroni diminuisce a causa dell'espansione delle nuvole di elettroni, e questo comporta una traslazione delle transizioni di assorbimento verso energie più basse.

- *Separazione da campo cristallino.* Questo fenomeno comporta la separazione dei livelli di energia 5d dello ione di attivazione dovuto alla repulsione degli elettroni esterni con le cariche del reticolo circostante. Il livello 4f non viene perturbato in quanto esso è più interno e meglio schermato da questo effetto. Nel caso di un campo elettrico forte prodotto dalle cariche del reticolo, il livello 5d può abbassarsi notevolmente, portando a una minore energia di assorbimento (Fig. 1.18); è quello che si verifica nel YAG:Ce^{3+}, rendendo possibile l'assorbimento della luce blu, a differenza ad esempio del materiale Li_2SrSiO_4:Ce^{3+}, il quale, pur essendo dopato con lo stesso ione, assorbe solo luce UV.

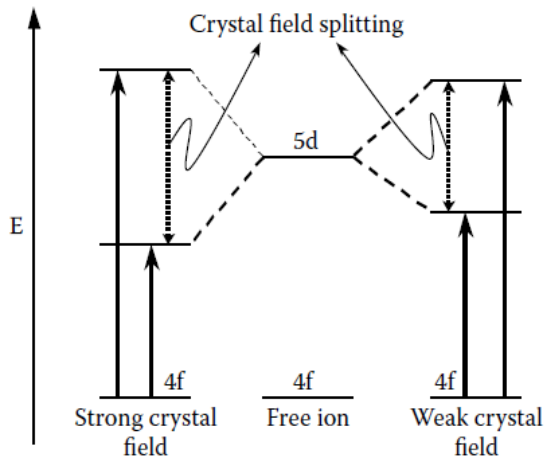


Figura 1.18: Schema della separazione dei livelli di energia dovuta al campo cristallino [45].

Emissione ed effetti della temperatura. Riprendendo il diagramma che descrive le transizioni di luminescenza (Fig. 1.16), possiamo studiare cosa avviene dopo la transizione verso uno stato eccitato dovuta all'assorbimento della luce: lo ione eccitato rilascia la propria energia all'ambiente reticolare circostante attraverso il processo chiamato *rilassamento*, portandosi verso la posizione di equilibrio al livello vibrazionale più basso v'_0 dello stato eccitato. Il rilassamento è un processo non-radiativo, che trasferisce fononi di vibrazione al reticolo ma non produce fotoni di luce. Successivamente, dall'equilibrio nello stato eccitato U', lo ione transita spontaneamente verso lo stato fondamentale U con emissione radiativa di fotoni. Il livello vibrazionale che esso raggiunge nello stato fondamentale di solito non è quello più basso ($v \neq 0$), quindi lo ione si rilassa nuovamente verso il livello $v = 0$ con un processo non-radiativo.

Per il principio di Franck-Condon, la massima probabilità di emissione radiativa avviene in corrispondenza della coordinata R'_0, con emissione di fotoni di energia E_{em}. Inoltre, per via dei rilassamenti non-radiativi, l'energia emessa radiativamente è minore dell'energia assorbita ($E_{abs} > E_{em}$). La differenza tra queste energie viene chiamata *spostamento di Stokes* (Stokes shift) e dipende dalla distanza ΔR tra le parabole dei due stati di energia: Stokes shift $\propto (\Delta R)^2$. In genere, i materiali luminescenti devono avere uno spostamento di Stokes abbastanza alto da evitare la sovrapposizione tra le bande di assorbimento e di emissione, per impedire il riassorbimento della luce auto-emessa, e da diminuire l'effetto del quenching

termico.

Difatti, la temperatura influenza il processo di emissione provocando l'allargamento della banda di emissione e il quenching termico, fenomeni che possono essere spiegati facendo riferimento alle transizioni in un processo di luminescenza precedentemente descritti. Al crescere della temperatura, i livelli vibrazionali sia dello stato fondamentale sia di quello eccitato si popolano seguendo la distribuzione di Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \tag{1.44}$$

dove k rappresenta la costante di Boltzmann.

Di conseguenza, un maggiore numero di livelli partecipa al processo di luminescenza, provocando un allargamento delle bande che rappresentano tali processi. Henderson e Imbush propongono la seguente espressione per la dipendenza della larghezza della banda di assorbimento e di emissione dalla temperatura [14]:

$$\Delta E(T) \approx \Delta E(0)\sqrt{\coth(h\nu/2kT)} \tag{1.45}$$

dove $\Delta E(0)$ è la larghezza a 0K della banda relativa e $h\nu$ è l'energia del fonone di accoppiamento tra i livelli vibrazionali.

Con il termine *quenching termico* si intende il calo dell'efficienza di emissione del materiale luminescente con l'aumento della temperatura. Uno dei meccanismi principali all'origine di questo fenomeno è la cosiddetta de-eccitazione non-radiativa termicamente attivata, illustrata in Figura 1.19. In questo diagramma, esiste un punto intersezione X tra lo stato eccitato U' e lo stato fondamentale U. Con l'eccitazione il centro di attivazione effettua una transizione dal punto A verso il punto O e si rilassa non-radiativamente verso il livello vibrazionale più basso dello stato eccitato nel punto B. A questo punto, con l'aumentare della temperatura, il centro di attivazione può attivarsi termicamente, portandosi dal punto B ad un livello vibrazionale in corrispondenza del punto X. Poiché in X sussiste una sovrapposizione tra le parabole di energia dello stato eccitato e di quello fondamentale, lo ione può rilassarsi lungo gli stati vibrazionali dello stato fondamentale. In conclusione, in tale caso non si verifica la transizione radiativa da B a C. La probabilità che avvenga questo processo di eccitazione dipende dalla barriera di energia ΔE_{tq} tra il punto B e il punto X.

Secondo [8], l'intensità di luminescenza I è legata alla temperatura T dalla

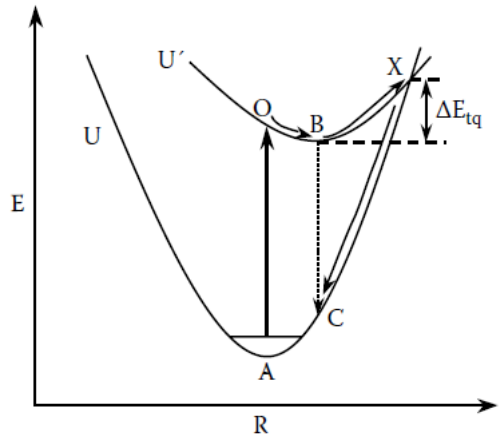


Figura 1.19: Rappresentazione di una transizione non-radiativa attivata termicamente [45].

seguente espressione:

$$I(T) = \frac{I(0)}{1 + \frac{\Gamma_0}{\Gamma_v} \exp\left(\frac{-\Delta E_{tq}}{kT}\right)} \tag{1.46}$$

dove Γ_v è la probabilità di una transizione radiativa, Γ_0 è un fattore di scala, costante, per l'esponenziale e ΔE_{tq} è la barriera di energia per il quenching termico. Di conseguenza, assumendo che $kT \gg \Delta E_{tq}$, la relazione tra l'efficienza di emissione e la temperatura è la seguente:

$$\eta \approx c \exp\left(\frac{-\Delta E_{tq}}{kT}\right) \tag{1.47}$$

che quindi dipende dalla barriera del quenching termico del modello di de-eccitazione termicamente attivata.

Transizioni non-radiative

Come è stato menzionato all'inizio del paragrafo sulla luminescenza, l'efficienza di emissione radiativa diminuisce con la presenza di processi di rilassamento non-radiativo. Il rilassamento attivato termicamente è uno di questi, ma vi sono anche altri processi che si verificano con minore dipendenza dalla temperatura, tra cui i principali sono l'emissione di multifonone e il trasferimento di energia.

Emissione di multifonone. La Figura 1.20 illustra due casi di emissione di fononi multipli. Nel primo caso, con un forte accoppiamento elettrone-reticolo, esiste

un punto di intersezione X tra la parabola dello stato fondamentale U e quella dello stato eccitato U', ma contrariamente alla situazione di rilassamento attivato termicamente in Figura 1.19, il punto X è situato ad un'energia inferiore del punto O verso il quale viene eccitato il centro di attivazione. In questa situazione, il sistema si rilassa direttamente verso il livello vibrazionale relativo al punto X, senza raggiungere il livello inferiore del punto B. Dal punto X, tramite ulteriori emissioni di fononi, il sistema può rilassarsi lungo lo stato fondamentale U, senza produrre emissioni radiative.

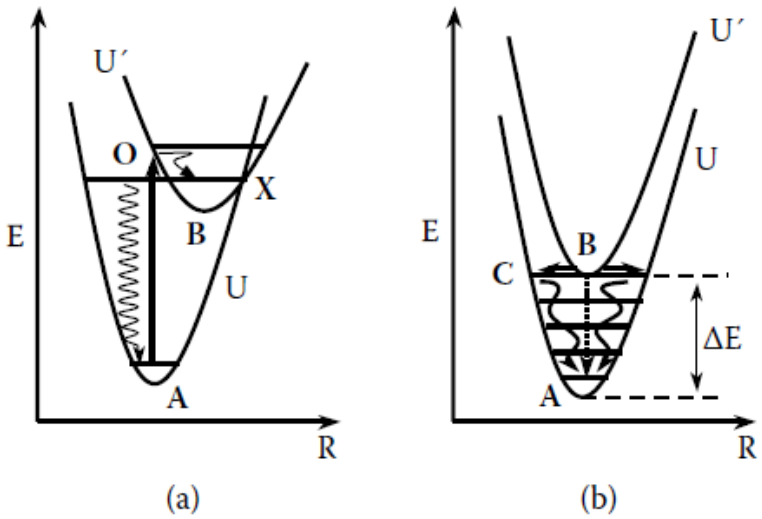


Figura 1.20: Rappresentazione di due processi non-radiativi di emissione di fononi multipli con accoppiamento elettrone-reticolo forte (a) e debole (b) [45].

Nell'altro caso, le parabole U e U' non si intersecano, ma il centro di attivazione dal punto B può rilassarsi non-radiativamente verso i livelli vibrazionali dello stato fondamentale se l'energy gap è abbastanza ridotto (non più di 4-5 volte dell'energia vibrazionale del livello più vicino). Questo meccanismo di rilassamento viene anche chiamato *legge dell'energy gap* e si osserva in particolare negli ioni di terre rare del tipo TE^{3+}, come il Ce^{3+}.

Trasferimento di energia. L'energia di un centro eccitato può essere rilasciata senza emissione di radiazione a un centro di attivazione adiacente. In questo caso il primo ione, detto donore, viene eccitato assorbendo l'energia $h\nu_D$ dallo stato fondamentale D verso uno eccitato D^*. Successivamente esso si rilassa verso lo stato fondamentale trasferendo energia ad un accettore, che a sua volta si eccita dallo

stato A verso uno stato A^* (Fig. 1.21). Nessuna radiazione viene emessa dal donore, ma l'accettore potrebbe emetterla.

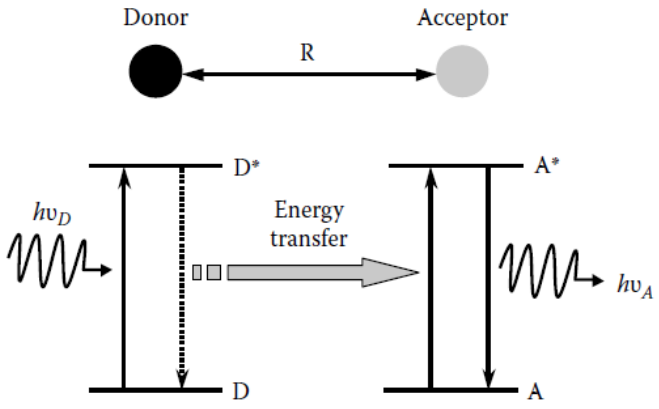


Figura 1.21: Rappresentazione del trasferimento di energia tra un donore e un accettore distanti R [45].

Questo meccanismo dipende principalmente dalla sovrapposizione delle funzioni d'onda degli stati fondamentale ed ecciato dei due centri e dalla sovrapposizione dei loro rispettivi spettri di emissione ed assorbimento. Nel caso di sovrapposizione spettrale più forte, quando le differenze di energia tra gli stati $D - D^*$ e $A - A^*$ sono uguali, si parla di *trasferimento risonante di energia*. Nel caso contrario, il trasferimento di energia richiede l'emissione di un fonone reticolare (*trasferimento assistito da fonone*).

Il processo di trasferimento di energia in generale riduce il tempo di vita luminescente del centro donore. Tuttavia, il fenomeno del trasferimento non-radiativo può essere sfruttato per aumentare l'efficienza o per regolare il colore di emissione dei fosfori nelle applicazioni pratiche, drogando ulteriormente il materiale con degli ioni accettori diversi da quelli di luminescenza.

1.4.3 Centri di luminescenza

Il ruolo degli ioni con cui viene drogato il reticolo cristallino ospitante è quello di creare dei centri di luminescenza con dei nuovi livelli di energia all'interno dell'energy gap del reticolo in modo da creare e favorire delle transizioni di luminescenza che altrimenti non si verificano nel reticolo puro. Solo alcuni tra gli elementi della tavola periodica sono adatti a costituire un centro di luminescenza, in quanto non tutti possono essere inseriti compatibilmente nella struttura dei cristalli o possono

introdurre dei livelli di energia adeguati nel bandgap del reticolo. In genere, gli ioni di luminescenza sono ioni di terre rare o di metalli di transizione.

In particolare, gli ioni lantanoidi, situati nella riga della tavola periodica tra l'elemento Lantanio (La, numero atomico 57) e Lutezio (Lu, n.a. 71), sono delle terre rare spesso utilizzate in forma trivalente o divalente per realizzare i fosfori. Ad esempio il cerio (Ce) è l'elemento 58, successivo al La, impiegato nella forma Ce^{3+}. Lo stato elettronico degli ioni viene indicato in forma $^{2S+1}L_J$, dove S, L e J sono rispettivamente il momento di spin angolare, il momento orbitale e il momento totale dello ione. Per convenzione, si indica L con S, P, D, F, G, H, I, K, L, M, ..., per i valori di L=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ...

Gli ioni lantanoidi trivalenti sono caratterizzati da orbitali 4f parzialmente riempiti con n elettroni, con la configurazione generica $5s^2 5p^6 4f^n$, e sono questi orbitali 4f che danno origine ai livelli di energia caratteristici della luminescenza di questi ioni, con i loro n elettroni che effettuano le transizioni ottiche. Inoltre, gli elettroni 4f sono schermati dagli elettroni $5s^2$ e $5p^6$, per cui l'effetto dei legami con il reticolo cristallino sui livelli di energia 4f sono ridotti.

Ione Ce^{3+}

Questo ione presenta la configurazione elettronica più semplice tra gli ioni di terre rare (Fig. 1.22). Il suo stato fondamentale $4f^1$ viene separato a causa dell'interazione spin-orbita in due sotto-livelli $^2F_{5/2}$ e $^2F_{7/2}$ distanti circa 2000 cm^{-1}. Da questo fenomeno deriva la doppia struttura nella banda di emissione di Ce^{3+}.

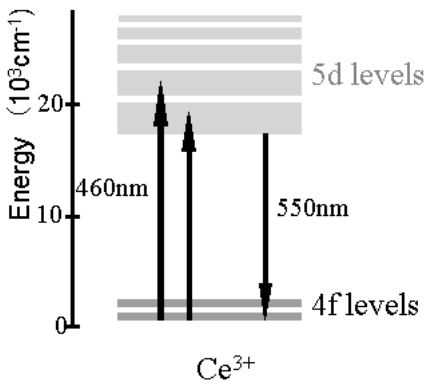


Figura 1.22: Diagramma della separazione dei livelli di energia dello stato fondamentale 4f e dello stato eccitato 5d nello ione Ce^{3+} [36].

Lo stato eccitato $5d^1$ viene separato in cinque sotto-livelli dal campo del reticolo cristallino, per cui la loro distanza di separazione dipende dal reticolo. L'emissione di Ce^{3+} è fortemente influenzata da questa separazione dell'orbitale 5d e anche dall'effetto nefelauxetico, spaziando generalmente tra le regioni spettrali UV e blu. Tuttavia, in presenza di forti legami e forti campi prodotti dal cristallo, l'orbitale 5d può abbassarsi tanto da produrre emissioni gialle e rosse (ad esempio, si può ottenere un fosforo verde, YAG:Ce^{3+}, oppure rosso, $CaSiN_2$:Ce^{3+}).

Il Ce^{3+} è caratterizzato da larghe bande di assorbimento e di emissione a causa delle transizioni 4f-5d, al contrario degli ioni lantanoidi trivalenti con transizioni elettroniche 4f-4f, i quali presentano spettri caratterizzati da linee strette.

1.4.4 Fosforo YAG:Ce^{3+}

Come descritto precedentemente, le proprietà dei fosfori dipendono dal reticolo cristallino che ospita gli ioni di attivazione. A seconda della composizione chimica del reticolo, i fosfori vengono classificati in granati, alluminati, silicati, solfuri, fosfati, scheeliti e nitruri. Di seguito vengono illustrate le caratteristiche di un fosforo granato generico, e del YAG:Ce^{3+} in particolare, in quanto quest'ultimo risulta essere l'oggetto di studio di questa tesi.

Fosfori Granati

La struttura del reticolo del granato è tra quelle che meglio si prestano ad assumere il ruolo di reticolo ospitante in un fosforo per SSL, in quanto essa presenta un forte campo cristallino che circonda gli ioni di attivazione con conseguente forte separazione dei livelli di energia 5d e un *red-shift* delle bande di eccitazione ed emissione. Per tale motivo, i fosfori granati sono adatti all'utilizzo con sorgenti d'eccitazione con emissione nel blu.

La formula generica di un granato è $X_3Y_2Z_3O_{12}$, con X un catione con 8 coordinazioni (di solito Ca, Mn, Fe, Mg divalenti), Y un catione con 6 coordinazioni (come Al, Fe, Cr trivalenti) e Z un sito tetraedrico. I cationi X, Y, e Z vengono circondati da poliedri di O, formando complessivamente una struttura cubica con 8 molecole per cella del gruppo spaziale Ia3d.

Il fosforo granato più comune nelle applicazioni SSL è il granato yttrio-alluminio attivato con cerio, $Y_3Al_5O_{12}$:Ce^{3+}, di solito indicato per semplicità con YAG:Ce^{3+} o YAG:Ce (Fig. 1.23), che tipicamente ha l'aspetto di una polvere gialla.

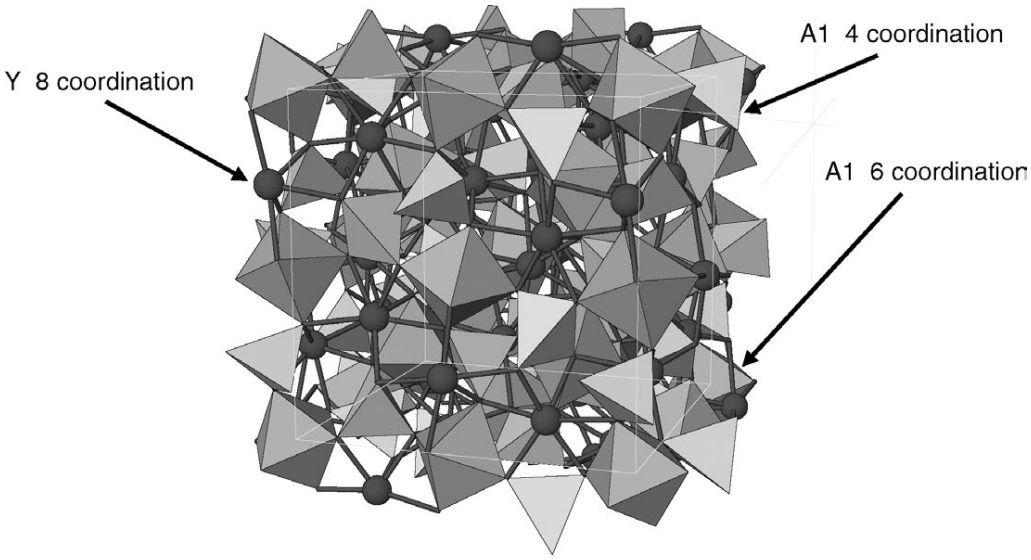


Figura 1.23: Struttura cristallina YAG [49].

Proprietà di luminescenza di YAG:Ce^{3+}

Lo spettro di eccitazione con due bande di YAG:Ce (Fig. 1.25) è dovuto alle transizioni elettroniche dal livello 4f ai due livelli 5d più bassi del Ce^{3+}. Nonostante questo ione solitamente non emetta nello spettro visibile, l'influenza del reticolo YAG permette l'emissione in un'ampia banda del giallo con una larghezza a metà massimo FWHM di circa 120 nm, dovuta alle transizioni 5d→4f. Il valore elevato di FWHM deriva dalla separazione del livello 4f nel doppietto $^2F_{5/2}$ e $^2F_{7/2}$, anche se la natura doppia della banda si può osservare solo in particolari condizioni di temperatura e di concentrazione di Ce^{3+} [2]. La separazione dei livelli 5d nello YAG:Ce dipende invece dall'effetto nefelauxetico e dal campo cristallino del reticolo YAG.

La presenza di basse percentuali di altri elementi nel reticolo può invece influire sulla posizione della banda di emissione e sull'intensità di quella di eccitazione, per cui il picco di emissione può trovarsi nell'intervallo 520-580 nm. Ad esempio, la sostituzione di Al^{3+} con ioni più pesanti (es. Ga^{3+}) oppure di Y^{3+} con ioni più leggeri (es. Gd^{3+}) ha l'effetto di ridurre la separazione dei livelli 5d di Ce^{3+}, con un conseguente *blue-shift* dell'emissione, mentre la sostituzione di Y^{3+} con ioni più pesanti aumenta tale separazione, abbassando i livelli 5d più bassi e provocando il *red-shift*.

Tipicamente, il fosforo YAG:Ce possiede un'elevata intensità di assorbimento della luce blu intorno ai 450 nm, motivo per il quale esso è diffuso nei sistemi SSL a led blu. In Figura 1.26 è rappresentato un tipico spettro che combina luce blu di un LED e l'emissione di YAG:Ce per formare la luce bianca. Tuttavia, è difficile

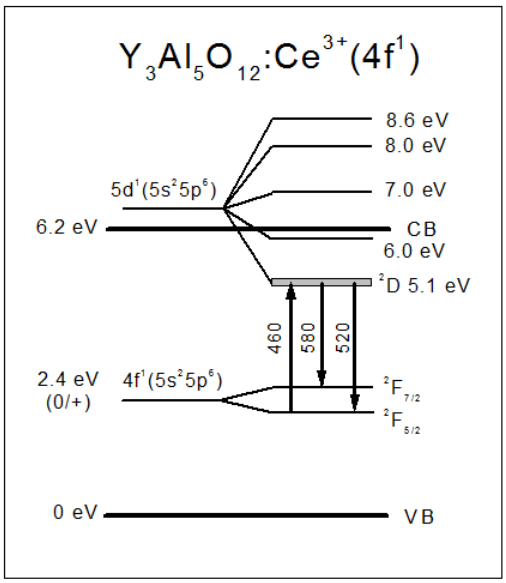


Figura 1.24: Livelli di energia del fosforo YAG:Ce^{3+} con la separazione dei livelli 5d e 4f in riferimento alla banda di conduzione (CB) e la banda di valenza(VB) del reticolo YAG ospitante [50].

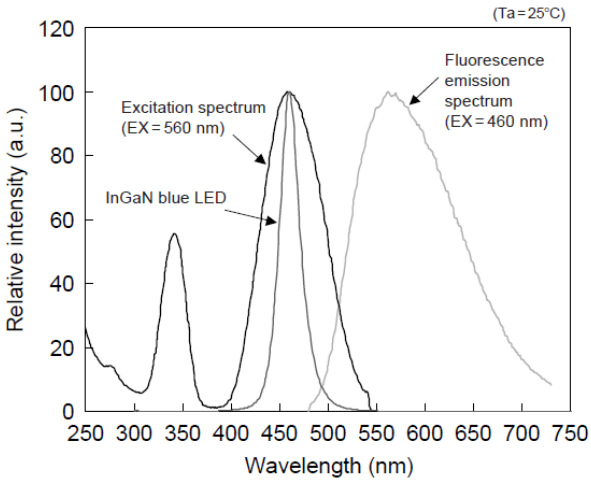


Figura 1.25: Spettro di eccitazione (in nero) e spettro di emissione (in grigio) di un fosforo YAG:Ce^{3+} [49].

generare una luce bainca calda (CCT intorno a 3000 K) solo con i fosfori granati perché, nonostante i possibili *red-shift* dello spettro di emissione, essi non riescono a fornire abbastanza emissione nelle lunghezze d'onda del rosso; per ottenere una luce calda risulta necessario aggiungere un fosforo "rosso" [49]. Il fosforo YAG:Ce resta

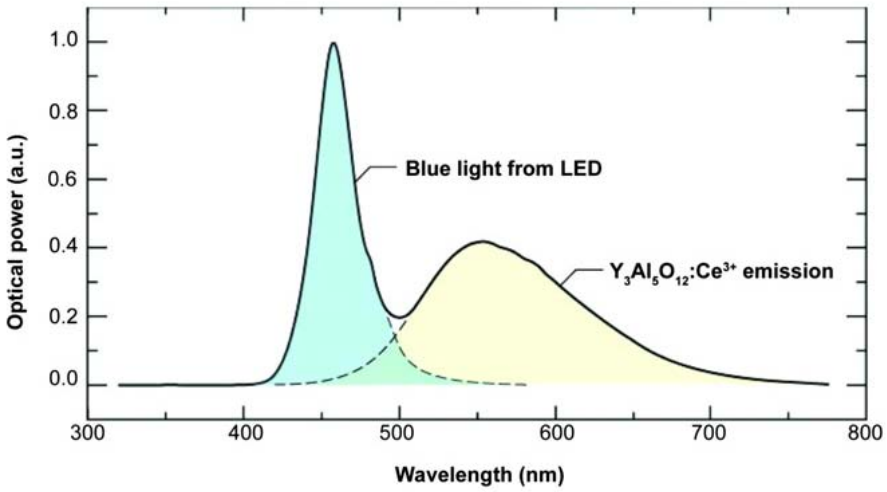


Figura 1.26: Spettro di luce bianca emessa da un sistema di illuminazione commerciale Nichia a base di LED blu e fosforo YAG:Ce^{3+} [31].

comunque uno dei fosfori più diffusi nelle applicazioni SSL per via della maturità e dei bassi costi della tecnologia relativa, la quale permette di ottenere fosfori con un assorbimento fino al 95% e un'efficienza quantica esterna di 83% per le eccitazioni con luce blu nell'intervallo 440-470 nm.

Effetti della temperatura su YAG:Ce^{3+}

Effettuando delle misure dell'intensità di luminescenza all'aumentare della temperatura del fosforo, è possibile osservare che l'emissione subisce un calo del 50% rispetto alla temperatura ambiente in corrispondenza di circa 280°C (Fig. 1.27 e 1.28) [45]. Sapendo che nei sistemi SSL a LED le temperature possono anche raggiungere 200°C, è evidente come l'effetto della temperatura giochi un ruolo importante in questi sistemi.

Due fattori possono influire sul comportamento del quenching termico: la concentrazione degli ioni Ce^{3+} e la composizione chimica del reticolo ospitante [2]. Difatti, l'effetto del quenching tende a diminuire, aumentando la concentrazione degli ioni di attivazione oppure sostituendo alcuni atomi di Y o di Al nel reticolo con Gd.

La Figura 1.28 mostra come lo spettro di emissione può, inoltre, subire un'allargamento e una traslazione verso lunghezze d'onda più lunghe all'aumentare della temperatura, oltre a una diminuzione del picco. Tale fenomeno può comportare una variazione delle caratteristiche cromatiche della luce emessa. Di conseguenza, nella progettazione di sistemi SSL con fosfori, è necessario tenere conto del comportamen-

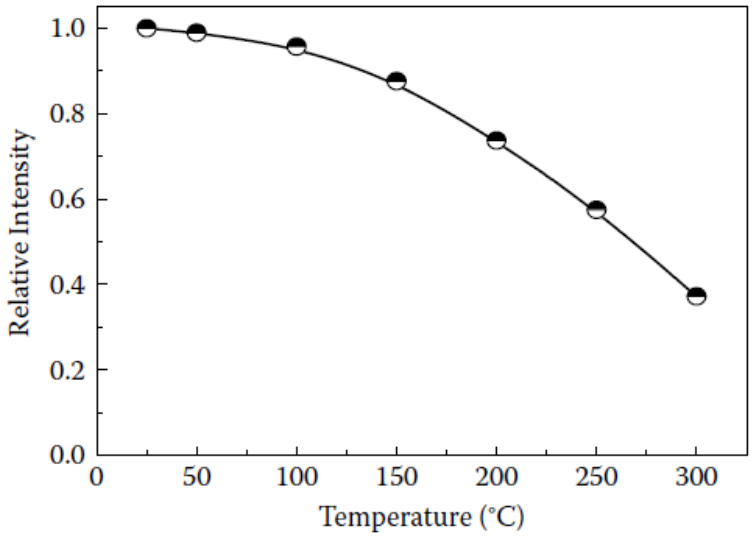


Figura 1.27: Dipendenza dell'intensità di luminescenza di YAG:Ce^{3+} dalla temperatura [45].

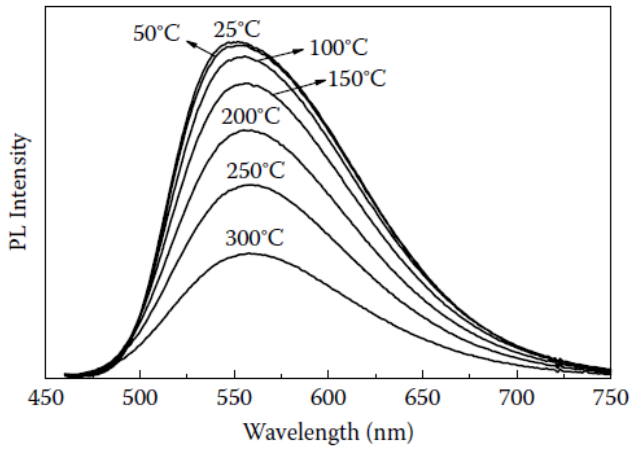


Figura 1.28: Variazione dello spettro di emissione di YAG:Ce^{3+} con la temperatura [45].

to del materiale luminescente all'aumentare della temperatura, e fornire un'adeguata dissipazione termica.

Il quenching termico di YAG:Ce ha comunque un comportamento migliore di molti fosfori. Secondo [42], questo fenomeno è provocato principalmente dalla ionizzazione termica dal livello più basso dello stato eccitato 5d verso la banda di conduzione del reticolo YAG (Fig. 1.29), e non dall'emissione di fononi multipli descritta nella sezione precedente.

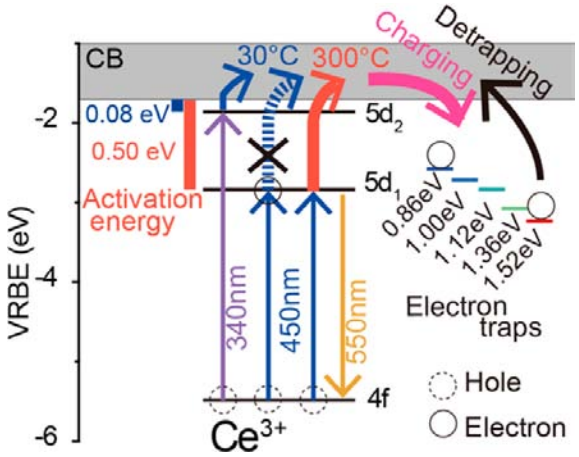


Figura 1.29: Diagramma di ionizzazione attivata termicamente in YAG:Ce^{3+}, con lo stato fondamentale 4f e gli stati eccitati $5d_1$ e $5d_2$ del Ce^{3+}, e la banda di conduzione (CB) del reticolo YAG. Per via dell'elevata energia di attivazione, la ionizzazione da $5d_1$ verso CB avviene solo a temperature elevate [42].

1.4.5 Metodi di sintesi del fosforo YAG:Ce^{3+}

Gran parte dei fosfori impiegati in ambito SSL vengono utilizzati in forma di polveri. Queste polveri vengono realizzate a partire da sostanze liquide o solide che contengono i loro elementi costituenti grazie ad appositi processi chimici che mirano ad produrre particelle di fosfori fini, uniformi e con buon grado di cristallinità. La dimensione dei grani dei fosfori ottenuti da reazioni tra solidi dipende dalla temperatura e dalla durata del processo di sinterizzazione utilizzato.

Tra i metodi solidi (ossia che utilizzano materiali allo stato solido) più comuni si trova il processo di reazione a stato solido, il quale agisce su materiali inorganici solidi. Esso risulta essere relativamente semplice e adatto per la produzione di massa, da cui il suo vasto utilizzo nella realizzazione di fosfori commerciali. A causa della natura refrattaria di Al e degli ossidi di terre rare, la sintesi a stato solido di fosfori di tipo YAG richiede temperature superiori a 1000°C. La reazione a stato solido è controllata dalla diffusione atomica tra i materiali grezzi, con ripetute macinazioni e riscaldamenti. Un'atmosfera controllata è necessaria per mantenere la valenza degli ioni di attivazione e la stechiometria del reticolo ospitante. Le limitazioni di questo metodo consistono nella bassa omogeneità finale e nelle elevate temperature di calcinazione richieste, oltre che nelle dimensioni minime dei grani di fosforo di decine di micrometri, relativamente grandi [48]. Inoltre, questo processo può facilmente introdurre delle impurità e difetti che influiscono sulle caratteristiche di luminescenza del fosforo. Temperature basse e periodi di sinterizzazione più

lunghi permettono di ottenere particelle di fosforo più piccole, spesso a scapito della cristallinità e dell'uniformità di particelle. Per ovviare a tale problema, vengono spesso impiegati metodi umidi (*wet*) con impiego di soluzioni acquose di specifici sali metallici.

Il principale tra i metodi *wet* è la tecnica sol-gel, la quale impiega metalli alcossidi e vi applica dei processi chimici come l'idrolisi, la gelificazione, essiccazione e trattamento termico. Il sol è un colloide di particelle solide sospese in un liquido, mentre un gel è una sostanza composta che consiste in una struttura continua a schelettro e che risulta dalla gelificazione di un sol. Il soluto può essere esportato da un gel attraverso un trattamento termico, liberando così il materiale finale.

Il metodo sol-gel, che data di più di un secolo fa, è stato modificato più recentemente in un processo migliore, il cosiddetto *salted sol-gel* (SSG). Il nome del processo deriva dal fatto che esso utilizza i metalli alkossidi con delle soluzioni di vari sali inorganici. Questa tecnologia rende possibile la produzione a basso costo di grandi quantità di fosfori in polveri ultrafini o di scale nanometriche, con elevata uniformità e cristallinità.

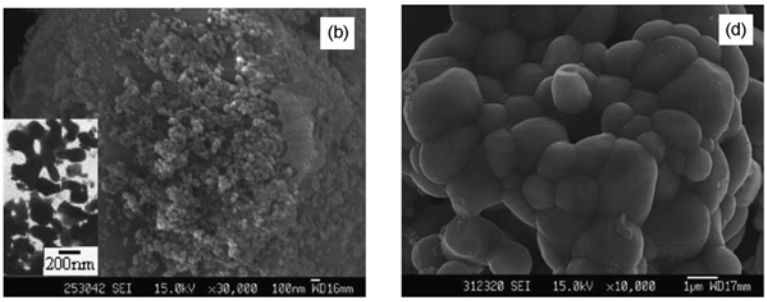


Figura 1.30: Immagini SEM di due fosfori YAG:Ce^{3+} realizzati tramite la sintesi a stato solido (a sinistra) e il metodo sol-gel (a destra) [48].

Di seguito viene descritta la realizzazione del fosforo YAG:Ce^{3+} tramite il processo SSG [49]. I materiali grezzi per ottenere il reticolo YAG, Y_2O_3 e Al_2O_3 hanno rispettivamente dei punti di fusione di 2410°C e 2072°C, quindi le temperature per la loro sinterizzazione sono molto elevate. Per lo YAG, la fase granitica del reticolo si forma sopra ai 1500°C con l'aiuto di un flusso di Ba_2F. Nel processo SSG viene poi utilizzato il sec-butossido di alluminio $Al(OC_4H_9^s)_3$ (ASB), e una soluzione acquosa di nitruri o di acetati di Y/Ce. La soluzione di terre rare viene aggiunta nel ASB liquido e mescolata intensamente per alcuni minuti, nei quali avviene velocemente il processo esotermico di idrolisi che fa evaporare l'alcol e produce un gel. Tale gel

viene cotto per essiccarlo a circa 80°C. Successivamente, la fase di granito comincia a formarsi a una temperatura di 800°C, alla quale appare il caratteristico colore giallo della polvere di YAG:Ce. La completa formazione del reticolo di granito con una buon grado di cristallinità si ottiene per temperature superiori a 1350°C.

Come si può osservare, la produzione dei fosfori con caratteristiche adeguate all'utilizzo nel SSL richiede attrezzature e tecnologie avanzate e costose. Di conseguenza, molte aziende sono specializzate nella realizzazione dei fosfori e giocano il ruolo di fornitori per le aziende che si occupano di SSL.

1.5 Fotometria e colorimetria

Per caratterizzare e confrontare la luce emessa da differenti sorgenti luminose solitamente si fa riferimento alle caratteristiche della luce definite negli ambiti della fotometria e della colometria, i quali tengono conto delle percezioni del sistema visivo umano per descrivere in modo quantitativo sia la quantità di luce fornita da una sorgente sia il colore della luce. Grazie alle grandezze come la temperatura di colore o la resa cromatica è possibile confrontare in modo rigoroso la qualità di un sistema di illuminazione. Di seguito vengono illustrati i concetti teorici principalmente incontrati nell'ambito SSL, con particolare attenzione verso quelli impiegati durante questa tesi.

1.5.1 Visione umana

I requisiti dei sistemi di illuminazione artificiale si basano sul funzionamento e sulle proprietà del sistema di visione umano, il quale elabora un'immagine dell'ambiente illuminato a seconda di diverse condizioni di luminanza e cromaticità.

I processi principali responsabili della visione umana si verificano nell'occhio. In esso, l'immagine viene proiettata sulla retina, la quale converte i fotoni di luce in impulsi nervosi attraverso speciali celle (recettori) di cui essa è composta. I ricettori chiamati *bastoncelli* sono i più numerosi e i più sensibili all'intensità della luce in condizioni di poca luce (ad esempio, di notte) poiché sono connessi al cervello a gruppi di centinaia di celle. Tuttavia, i bastoncelli contengono un solo tipo di fotopigmento, quindi essi forniscono una visione acromatica, chiamata *visione scotopica*. I ricettori chiamati *coni* sono invece connessi singolarmente al cervello, quindi sono meno sensibili all'intensità della luce, ma ne esistono tre tipi, con tre pigmenti diversi sensibili a diversi intervalli di lunghezza d'onda che corrispondono all'incirca ai colori blu, verde e rosso. I coni sono quindi responsabili della distinzione dei colori: in condizioni di elevata luminosità, quando i bastoncelli sono saturati, la visione tramite coni viene chiamata *fotopica*. La visione fotopica ha una sensibilità inferiore ma una risoluzione spaziale maggiore di quella scotopica per via della concentrazione dei coni nella parte centrale della retina. La visione scotopica invece è attiva nella visione periferica. La sensitività delle due visioni in lunghezza d'onda differisce per via delle differenti celle ricettrici: la visione scotopica ha un massimo di sensitività a 507 nm, mentre quella fotopica ha il picco a 555 nm.

Poco più di un decennio fa è stato scoperto un altro tipo di foto-ricettori della retina, le *cellule gangliari*, le quali influenzano l'orologio biologico interno del corpo umano, definito da un insieme di processi fisiologici giornalieri e stagionali (in particolare nel sistema ormonale). Solo di recente, quindi, le tecnologie di illuminazione hanno cominciato a rivolgere l'attenzione verso applicazioni relative, in cui la luce artificiale può influenzare lo stato di veglia o di riposo del corpo umano, permettendo anche di alleviare l'effetto *jet lag*.

Poiché in condizioni di illuminazione artificiale è la visione fotopica a dominare, numerosi studi si sono concentrati sulla calibrazione e la discretizzazione della risposta spettrale e della risoluzione dei colori della visione fotopica. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) introdusse nel 1924 la funzione relativa di efficienza luminosa $V(\lambda)$ per la visione fotopica; nel 1951 fu definita $V'(\lambda)$ per quella scotopica, ed entrambe sono state aggiornate per l'ultima volta nel 1983 (Fig. 1.31). Queste curve costituiscono uno standard di riferimento per le analisi radiometriche della luce.

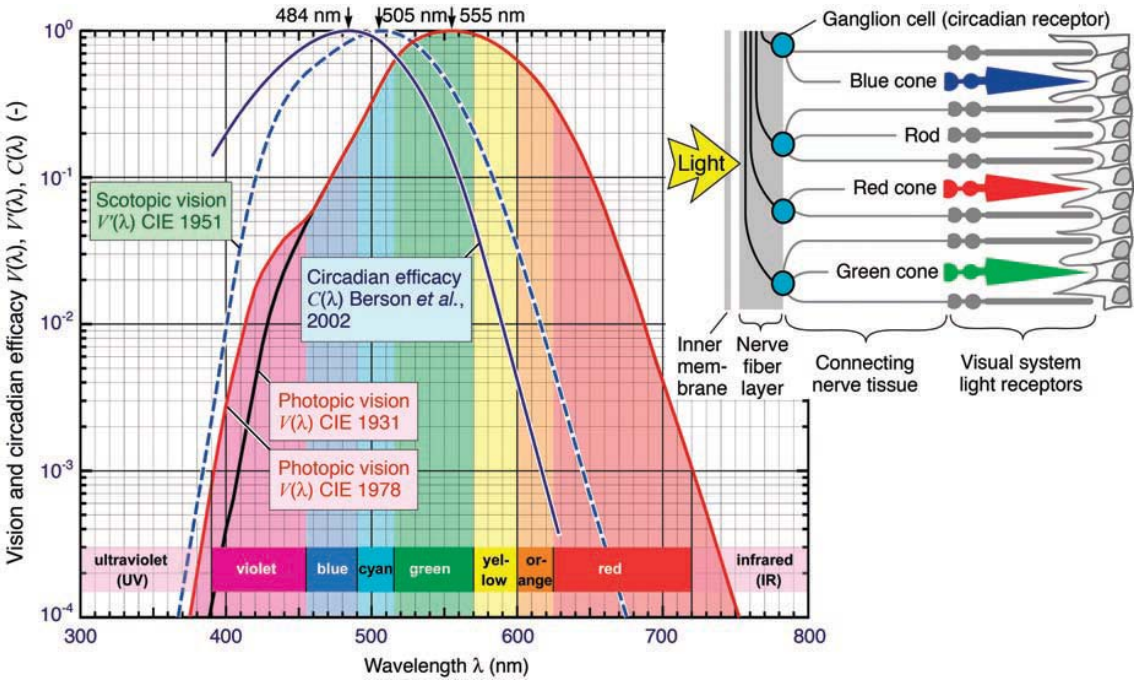


Figura 1.31: Curve di efficienza di visione spettrale per la visione fotopica, $V(\lambda)$, e per la visione scotopica, $V'(\lambda)$ [33].

1.5.2 Fotometria

Mentre la *radiometria* consiste nello studio delle grandezze relative all'energia irradiata da una sorgente luminosa, come ad esempio il *flusso radiante* Φ_e (flusso nel tempo di energia radiante misurata in watt), oppure l'*intensità radiante* $I_e = d\Phi_e/d\omega$, misurato in W/sr, con $d\omega$ l'angolo solido unitario in una data direzione, la *fotometria* si riferisce alla percezione visuale della luminosità della luce. Di conseguenza, la fotometria tiene conto della risposta visuale dell'occhio umano alle differenti lunghezze d'onda; le grandezze relative vengono denotate con l'aggettivo *luminoso*.

Il *flusso luminoso* Φ_ν viene misurato in lumen (lm) ed è definito come

$$\Phi_\nu = 683 \text{ lm/W} \times \int S(\lambda)V(\lambda)d\lambda \tag{1.48}$$

dove $S(\lambda) \equiv d\Phi_e/d\lambda$ è la distribuzione spettrale di potenza del flusso luminoso, e $V(\lambda)$ è la funzione di efficienza luminosa della visione fotopica definita da CIE. L'*intensità luminosa* I_ν è definita di conseguenza come

$$I_\nu = 683 \text{ lm/W} \times \int I_{e\lambda}(\lambda)V(\lambda)d\lambda \tag{1.49}$$

dove $I_{e\lambda}(\lambda) \equiv dI_e/d\lambda$ è la densità spettrale dell'intensità radiante. L'intensità luminosa si misura in lm/sr o in candele (cd). La candela è un'unità SI equivalente all'intensità luminosa di una sorgente di radiazione monocromatica con intensità radiante di 1/683 W/sr con frequenza $5,4 \times 10^{14}$ Hz (lunghezza d'onda di 555,55 nm, corrispondente al colore al quale l'occhio umano è più sensibile, il verde). Si può notare che la costante 683 nelle espressioni 1.48 e 1.49 rappresenta un fattore di normalizzazione.

Vale la pena ricordare che la definizione di intensità luminosa si applica a sorgenti puntiformi, mentre per le sorgenti estese si utilizza la *luminanza* L (cd/m^2), pari al rapporto tra il flusso luminoso che si propaga da un'unità di superficie emittente dA lungo un angolo θ e l'angolo solido unitario:

$$L = d^2\Phi_\nu/(d\omega\ dA\ cos\theta) \equiv dI_\nu/dA' \tag{1.50}$$

con dA' l'area di emissione proiettata nella direzione di osservazione. A titolo illustrativo, la luminanza media del sole visto al livello del mare è di circa $1,6 \times 10^9$ cd/m^2, mentre quella della luna vale circa 2500 cd/m^2.

Una misura della capacità di una radiazione policromatica di produrre uno

stimolo visivo è l'*efficacia luminosa*, K (lm/W):

$$K = \frac{\Phi_\nu}{\Phi_e} = 683\ lm/W \times \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\inf} S(\lambda)d\lambda} \tag{1.51}$$

Si osserva che il valore massimo di K di 683 lm si ottiene per una sorgente monocromatica di 555,55 nm con un flusso radiante di 1 W.

Le grandezze introdotte finora si riferiscono allo spettro della luce emessa, non alla sua sorgente. Per descrivere l'efficienza di conversione di energia in luce di una sorgente, vengono utilizzate le efficienze radiante e luminosa. L'*efficienza radiante* η_e è una grandezza adimensionale, con valore compreso tra 0 e 1, che descrive quanta potenza P consumata dalla sorgente viene convertita in luce:

$$\eta_e = \Phi_e/P \tag{1.52}$$

L'*efficienza luminosa* (lm/W) è invece l'abilità della sorgente di convertire la potenza consumata in luce utile alla visione umana:

$$\eta_\nu = \Phi_\nu/P \equiv \eta_e \times K \tag{1.53}$$

I sistemi di illuminazione vengono inoltre spesso caratterizzati in funzione dell'*illuminanza*, che rappresenta la densità di flusso luminoso incidente su una superficie:

$$E = d\Phi_\nu/dA = I_\nu cos\theta/r^2 \tag{1.54}$$

dove dA è l'elemento di superficie, θ l'angolo di incidenza, r la distanza dalla sorgente puntiforme di illuminazione. L'unità di misura dell'illuminanza è lux, pari a un lumen su metro quadro.

1.5.3 Colorimetria

Per rappresentare in modo quantitativo le caratteristiche di colore della luce percepita dall'occhio umano, la colorimetria fornisce alcune definizioni matematiche, legate al funzionamento dell'occhio. Gli studi sperimentali mostrano che la maggior parte dei colori può essere imitata combinando non più di tre colori primari (detti *stimoli*); per identificare un colore è quindi necessaria una terna di numeri legati alla triplice natura dei coni della retina sensibili ai colori. Tuttavia, se si utilizzano come terna di stimoli i colori monocromatici rosso, verde e blu (R, G, B) alcuni colori,

prossimi ad altri colori monocromatici, richiedono dei valori negativi di stimolo percepito per essere imitati correttamente (fenomeno della sottrazione di colori). Per evitare questo inconveniente sono stati introdotti degli stimoli immaginari X, Y, Z, che vengono ottenuti integrando il prodotto della densità spettrale di potenza $S(\lambda)$ della luce colorata con le funzioni *colorimetriche* $\overline{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$, $\overline{z}(\lambda)$, caratterizzate per un osservatore medio da CIE nel 1931 (rappresentate in Fig.1.32):

$$X = \int \overline{x}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \qquad Y = \int \overline{y}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \qquad Z = \int \overline{z}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \tag{1.55}$$

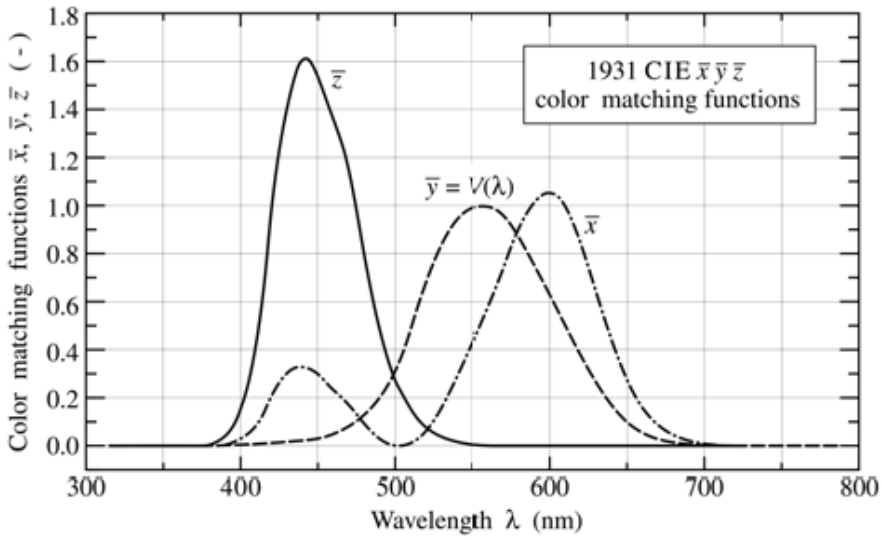


Figura 1.32: Funzioni colorimetriche $\overline{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$, $\overline{z}(\lambda)$, standard CIE 1931 [31].

La funzione colorimetrica $\overline{y}(\lambda)$ dello standard è coincidente con la funzione di efficienza luminosa $V(\lambda)$ per la visione fotopica. Inoltre, tutte e tre le funzioni colorimetriche si riferiscono ad un angolo visivo minore di 2°, mentre esistono altre funzioni tabulate per angoli superiori.

A partire dai valori di tristimolo X, Y, Z, di una data sorgente di luce vengono definite delle *coordinate cromatiche* (x, y, z), misurate in watt, ottenute dall'intersezione del vettore (X, Y, Z) con il piano X + Y + Z = 1.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \tag{1.56}$$

La coppia di coordinate (x, y) definiscono un piano, detto *diagramma di cromaticità*, in quanto z è una variabile dipendente, ricavabile implicitamente: $z = 1 - x - y$. Poiché per definire un colore è necessaria una terna di numeri, tipicamente al

diagramma di cromaticità viene aggiunta l'informazione sulla luminosità attraverso lo stimolo Y: in questo modo, la combinazione (x, y, Y) costituisce lo spazio di colore CIE xyY.

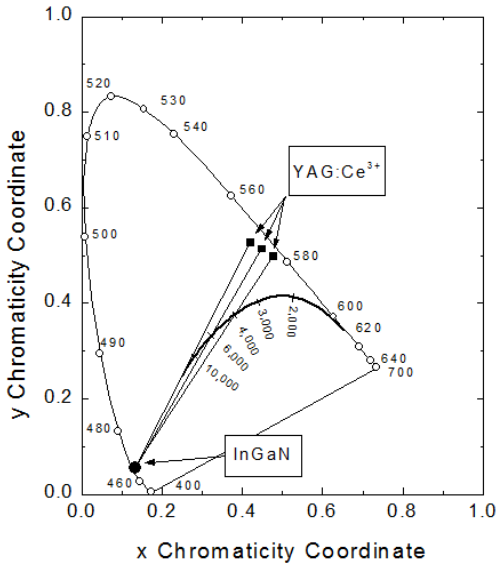


Figura 1.33: Diagramma x,y rappresentante i segmenti delle coordinate cromatiche che si possono ottenere con una sorgente LED blu a 465 nm e dei fosfori YAG:Ce^{3+} con differenti lunghezze d'onda di picco [50].

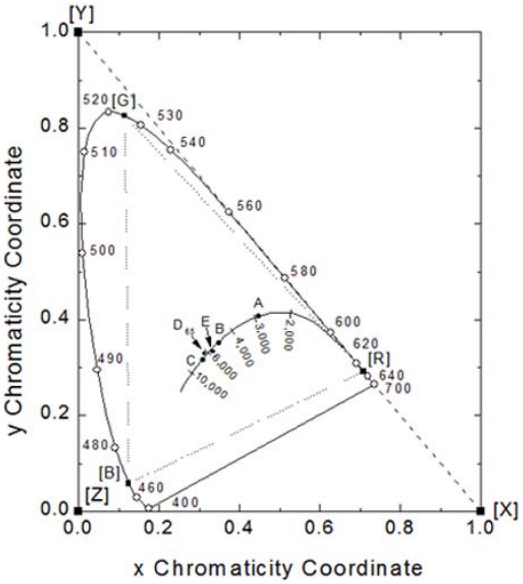


Figura 1.34: Diagramma x,y con evidenziati il locus planckiano e alcuni punti notevoli definiti dallo standard CIE: R, G, B sono i colori monocromatici rosso, verde e blu; A sorgente a tungsteno a 2856 K; B luce solare diretta a circa 4870 K; C luce solare con cielo nuvoloso, a 6770 K; D_{65} luce diurna a 6504 K; E punto di uguale energia ($x = y = 0,333$) [50].

Il diagramma di cromaticità include una curva a ferro di cavallo, congiunta da un segmento, all'interno della quale si trovano tutti i colori distinguibili. La curva esterna corrisponde ai colori di radiazioni monocromatiche, le cui lunghezze d'onda crescono in senso orario. I colori all'interno possono invece essere ottenuti per miscelazione di diverse sorgenti: una proprietà del diagramma è che considerando due punti (sorgenti di colore primari), dalla loro combinazione è possibile ottenere qualunque colore che giace sul segmento che unisce i due punti. Un esempio di diagramma di color mixing nel caso di sistemi a base di LED blu a 465 nm e fosfori YAG:Ce^{3+} è mostrato in Figura 1.33. Analogamente, con n sorgenti primarie, i colori realizzabili si trovano all'interno del poligono con n vertici corrispondenti alle sorgenti. Tuttavia, nel diagramma (x, y) la distanza tra due punti non è proporzionale alla differenza visiva tra i colori mappati dai punti, per via della sensibilità non

uniforme dell'occhio umano alle differenze di colore nel diagramma. Tale problema viene risolto dai diagrammi a scala cromatica uniforme, descritti in seguito.

Spesso nel diagramma di cromaticità (x, y) viene esplicitata la curva di punti corrispondenti alla luce emessa da corpi neri ideali a differenti temperature, chiamata *locus planckiano*. Ai colori giacenti sul locus è quindi possibile associare una *temperatura di colore* (CT), corrispondente alla temperatura T in kelvin del corpo nero relativo. Per le sorgenti vicine al locus, viene definita analogamente la temperatura di colore correlato (CCT), ossia la temperatura del corpo nero radiante più vicino nel diagramma. Le sorgenti con uno stesso CCT si trovano nel diagramma su un segmento perpendicolare al locus planckiano nel diagramma (u', v') nel punto in cui CCT = CT. I relativi segmenti di isotemperatura sono visibili in Fig. 1.34

Come descritto prima, diverse combinazioni di due o più sorgenti possono fornire un dato punto di coordinate cromatiche desiderate: le sorgenti vengono definite in questo caso *metameriche*. Grazie a questa proprietà è possibile ottenere una percezione di luce di un corpo nero, quindi con uno spettro continuo, da una sorgente con picchi separati di emissione nello spettro. Tuttavia, illuminando con sorgenti metameriche ma con spettri diversi una superficie di un dato colore, si ottiene un diverso colore percepito della superficie, per via della riflettività della superficie differente per diverse componenti spettrali (fenomeno chiamato *shift colorimetrico*). Per caratterizzare la qualità di una sorgente di illuminazione nei confronti della resa dei colori degli oggetti illuminati, è stato introdotto il diagramma a scala uniforme di cromaticità *UCS* CIE 1960, ottenuto da una serie di esperimenti di misura di coordinate cromatiche percepite di alcuni campioni illuminati da una sorgente di riferimento e una da caratterizzare, valutando così gli shift colorimetrici. Il diagramma UCS permette di valutare correttamente il mixing tra colori, a differenza del diagramma (x, y); è possibile passare dal diagramma $x - y$ ai diagrammi UCS attraverso una trasformazione algebrica:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \qquad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \tag{1.57}$$

Utilizzando le coordinate UCS sono stati definiti degli indici di resa cromatica R_i relativi agli 8 campioni di test utilizzati per valutare gli shift colorimetrici e ricavare il diagramma UCS. Per calcolare gli indici R_i è necessaria una procedura con numerose operazioni, quali la selezione di uno spettro $S_r(\lambda)$ e delle coordinate cromatiche (x_r, y_r) di riferimento, la determinazione degli spettri riflessi $S_r(\lambda)\rho_i(\lambda)$ e delle coordinate (x_{ri}, y_{ri}) per ogni campione di test, e un analogo procedimento per

la sorgente di illuminazione di test, per ricavare $S_k(\lambda)$, (x_k, y_k), $S_k(\lambda)\rho_i(\lambda)$, (x_{ki}, y_{ki}); in seguito le coordinate CIE 1931 vengono convertite in coordinate CIE 1960 per poi applicarvi una correzione che tiene conto degli shift di colore dei diversi campioni, ottenendo le coordinate $u' - v'$. Vengono inoltre calcolati degli indici di luminosità W_{ri} e W_{ki} dai valori Y del diagramma CIE 1931, dati dalla formula

$$W = 25Y^{1/3} - 17 \tag{1.58}$$

Infine, si possono ricavare gli indici R_i corrispondenti ai diversi campioni colorati:

$$\begin{aligned} R_i =& 100 - 4,6\{[W_{ki} - W_{ri}]^2 + 13^2[W_{ki}(u'_{ki} - u_r) - \\ & - W_{ri}(u_{ri} - u_r)]^2 + 13^2[W_{ki}(v'_{ki} - v_r) - W_{ri}(v_{ri} - v_r)]^2\}^{1/2} \end{aligned} \tag{1.59}$$

Bisogna notare che valori accurati di R_i possono essere ottenuti solo per sorgenti con cromaticità relativamente vicina a quella della sorgente di riferimento utilizzata. Risulta evidente che la procedura e la metodologia applicate sono laboriose; inoltre, esse non sono sempre funzionali (ad esempio per sorgenti con spettro non continuo). Altri modelli e diagrammi sono stati introdotti, come il CIE 1976 (L^*, u^*, v^*), detto CIELUV, per rispondere meglio alle esigenze tecnologiche di caratterizzazione delle sorgenti luminose.

Tipicamente, risulta conveniente raggruppare l'informazione degli otto indici nell'*indice generale di resa cromatica* R_a (*color rendering index CRI*), che consiste nella media dei singoli indici:

$$R_a = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} R_i \tag{1.60}$$

Un valore di $R_a = 100$ per una sorgente di illuminazione (tipicamente la luce diurna o le lampadine incandescenti) indica una resa di colore identica a quella della sorgente di riferimento usata per ricavare gli indici (tipicamente un corpo nero) per gli 8 campioni di test. Valori di CRI più bassi indicano la presenza di uno shift delle coordinate cromatiche, tanto più significativo quanto più R_a è basso: tipicamente sono accettabili valori di CRI >60. I LED che sfruttano la conversione dei fosfori hanno tipicamente un CRI compreso tra 70 e 90, mentre i sistemi LED basati solo su diodi LED hanno un CRI tra 60 e 80+.

Capitolo 2

Affidabilità dei fosfori YAG:Ce^{3+}

2.1 Motivazioni

La realizzazione dei prototipi LARP in merito all'oggetto di questa tesi prevede l'utilizzo di fosfori commerciali gialli YAG:Ce^{3+} in configurazione remota, conveniente sia per via dei vantaggi di una tale configurazione in combinazione con un laser blu, descritti nel Capitolo 1 (tra cui la migliore dissipazione termica), sia per via della possibilità di testare e analizzare più facilmente il sistema di illuminazione variando i parametri e le condizioni relativamente all'incidenza del fascio laser sui fosfori.

L'impiego di un laser ad alta potenza per l'eccitazione dei fosfori comporta un significativo riscaldamento del materiale luminescente nel punto in cui il fascio del laser incide sulla superficie dei fosfori. Come descritto nel Capitolo 1, l'elevata temperatura del fosforo può provocare un calo di emissione durante il funzionamento del sistema provocando una diminuzione della luminescenza, e dunque un flusso luminoso a regime minore. Inoltre, a lungo termine, lo stress continuo dovuto all'elevata temperatura operativa può provocare un degrado graduale e irreversibile delle proprietà di luminescenza del fosforo, sino al completo danneggiamento del materiale, con effetti negativi sulle prestazioni e sulla durata di vita dell'intero sistema.

In questo capitolo vengono descritti i test affidabilistici effettuati sui fosfori YAG:Ce^{3+} con l'obbiettivo di studiarne il comportamento di luminescenza al variare della temperatura, e di valutare quale sia l'impatto a lungo termine di condizione operative ad elevata temperature e/o intensità d'eccitazione sulle performance del materiale. Questi test globalmente permettono di stimare e ottimizzare le prestazioni effettive e i limiti del sistema LARP rispetto alle sue possibili condizioni operative (ad esempio, l'intensità del diodo laser), mettendo allo stesso tempo in luce gli aspetti critici generali relativi all'utilizzo di fosfori nei sistemi LARP.

2.2 Processo di deposizione dei fosfori

L'impiego di materiale luminescente remoto in un prototipo di sistema LARP comporta la necessità di realizzare un elemento opto-meccanico, indicato in seguito con il nome *fosforo remoto*, comprendente la polvere di fosfori e un supporto meccanico che sostenga tale polvere, e che soddisfi alcuni requisiti:

- il supporto deve essere rigido e stabile, per poter mantenere i fosfori in una precisa posizione rispetto al fascio laser all'interno del sistema;
- esso deve avere forma e caratteristiche adatte per la configurazione ottica prevista; ad esempio, per il prototipo "in trasmissione", il supporto deve trasmettere sia la luce del laser, sia quella di luminescenza dei fosfori, in modo uniforme ed efficiente; mentre nel sistema "in riflessione" esso deve invece riflettere entrambe le componenti di illuminazione;
- l'intero elemento opto-meccanico deve essere realizzato in modo da fornire un'adeguata miscelazione di luce bianca; in particolare, per il prototipo "in trasmissione" questo requisito si traduce nella necessità di regolare la quantità di luce blu del laser assorbita dai fosfori rispetto all'intensità della luce gialla di luminescenza;
- vista la sensibilità dei fosfori all'influenza della temperatura, il supporto deve essere sufficientemente conduttivo termicamente per garantire una corretta dissipazione termica;
- infine, il fosforo remoto deve avere una dimensione e forma tali da poter essere facilmente manipolato e posizionato.

Considerando queste caratteristiche, per la configurazione di prototipo "in trasmissione" il fosforo remoto è stato realizzato posizionando della polvere di fosforo giallo YAG:Ce^{3+} su un supporto costituito da una finestra ottica in zaffiro di Thorlabs.

Il fosforo giallo YAG:Ce^{3+} è tra i più diffusi nell'ambito SSL e possiede delle buone proprietà di luminescenza e affidabilità, adatte all'eccitazione con un fascio laser blu a 450 nm. Il modello di fosforo utilizzato è NYAG4355-01-B08, per il quale il produttore Intematix dichiara un picco di emissione a 550 nm, un colore di emissione con coordinate CIE x=0.426 e y=0.548, e una dimensione media delle particelle pari a 8.5 μm [15].

La finestra di zaffiro, delle dimensioni standard di 1/2", è facilmente collocabile all'interno di appositi supporti di Thorlabs, detti *cage*, che possono essere fissati su torrette o pali, regolando con precisione la loro posizione all'interno del sistema ottico. Inoltre, lo zaffiro ha una trasmissività elevata ed uniforme nell'intervallo di lunghezze della luce visibile (Fig. 2.1) e un'elevata conducibilità termica che rende possibile un'adeguata dissipazione del calore dei fosfori.

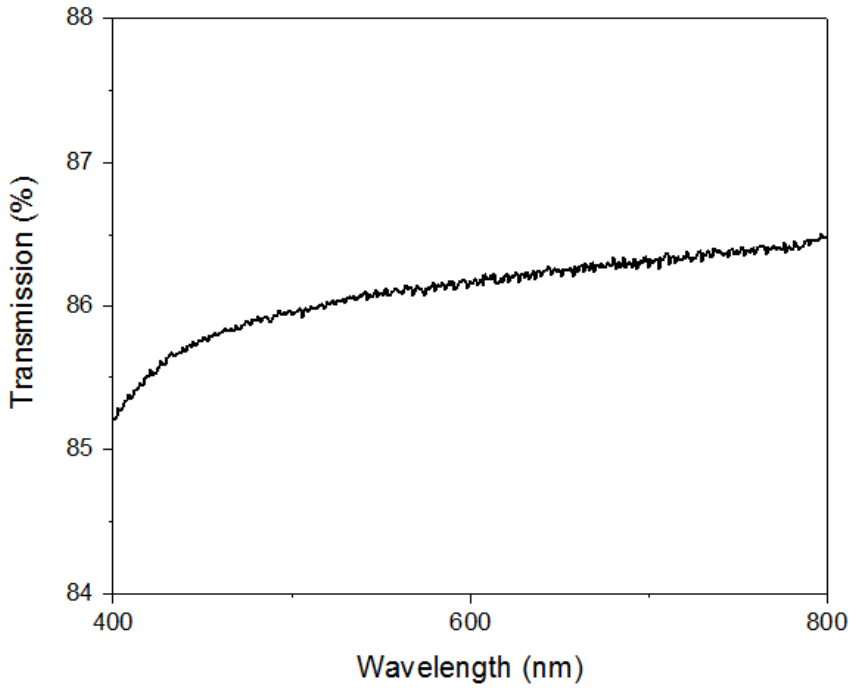


Figura 2.1: Trasmissività dello zaffiro [39].

L'adesione della polvere di fosfori sulle finestre di zaffiro è stata realizzata tramite l'applicazione di alcool etilico, o, in alcuni campioni, da alcool benzilico. Nel secondo caso, per via di un tempo di evaporazione più lungo dell'alcool benzilico, è stato possibile utilizzare uno strumento di *spin coating* a ridotte velocità per creare uno strato uniforme di fosfori sul substrato. L'alcool in eccesso è stato poi fatto evaporare mantenendo il fosforo remoto a 250°C per 6 minuti circa. In entrambi i casi, la quantità di polvere di YAG:Ce^{3+} utilizzata per ogni fosforo remoto è di circa 50 mg.

I fosfori remoti realizzati sono stati sottoposti a diversi test per analizzare l'effetto di temperature elevate e di alte intensità ottiche sulla luminescenza del materiale sia durante la fase operativa sia post-stress. Di seguito vengono descritti gli esperimenti eseguiti e vengono commentati i risultati ottenuti.

2.3 Stress in temperatura

2.3.1 Caratterizzazione della fotoluminescenza

Per valutare la variazione della luminescenza dei fosfori in seguito a stress termico, è stato realizzato un apposito banco ottico di misura con elementi opto-meccanici di Thorlabs (Fig. 2.2).

Come sorgente di eccitazione è stato utilizzato un LED blu con lunghezza d'onda del picco di emissione intorno a 450,4 nm, equivalente alla lunghezza d'onda di emissione del diodo laser PL TB450B di Osram utilizzato per i prototipi. Per garantire la stabilità in temperatura del LED, la PCB di supporto del dispositivo è stata fissata su una *plate* in rame altamente dissipante.

La luce emessa dal LED viene collimata da un'apposita lente dotata di una lunghezza focale corta, al fine di indirizzare il fascio di eccitazione sul fosforo remoto. La potenza ottica del fascio viene monitorata da un fotodiodo tramite l'ausilio di un beam splitter (8:92) posizionato tra la lente di collimazione e il fosforo remoto. In questo modo è stato possibile realizzare un controllo in feedback della potenza ottica, governato da un programma LabView capace di garantire un'eccitazione del fosforo remoto regolata e ripetibile nel tempo. Il fotodiodo utilizzato è il modello PDA36A-EC di Thorlabs con un sensore in silicio caratterizzato da un range operativo compreso tra 350 e 1100 nm; il fotodiodo dispone di una regolazione di guadagno, utile per rilevare segnali deboli e per aggiustare la lettura del fotodiodo in accordo con l'esigenza specifica, dato anche che la risposta del sensore non è costante nell'intervallo operativo di lunghezze d'onda.

In previsione della realizzazione di prototipi sia in trasmissione sia in riflessione, data la necessità di analizzare l'emissione dei fosfori in ambedue le configurazioni, il setup di caratterizzazione è stato realizzato in modo tale da misurare simultaneamente lo spettro di luminescenza in trasmissione e quello in riflessione. A questo fine due spettrometri STS-VIS di Ocean Optics con un range di misura di 350-800 nm sono stati fissati tramite *cage* standard da 30 mm in modo tale da poterli mantenere in posizione costante rispetto ai supporti del campione. Lo spettrometro per la misura in trasmissione è stato collocato in contatto con il retro della *cage* di supporto per i fosfori remoti. Lo spettrometro per la misura in riflessione è stato posizionato invece con un'inclinazione di circa 45° rispetto alla superficie della finestra di supporto dei fosfori. Per poter raccogliere il segnale di luminescenza in riflessione è stata utilizzata una lente di focalizzazione che convoglia una parte di luce emessa e diffusa dai fosfori verso l'ingresso ottico dello spettrometro.

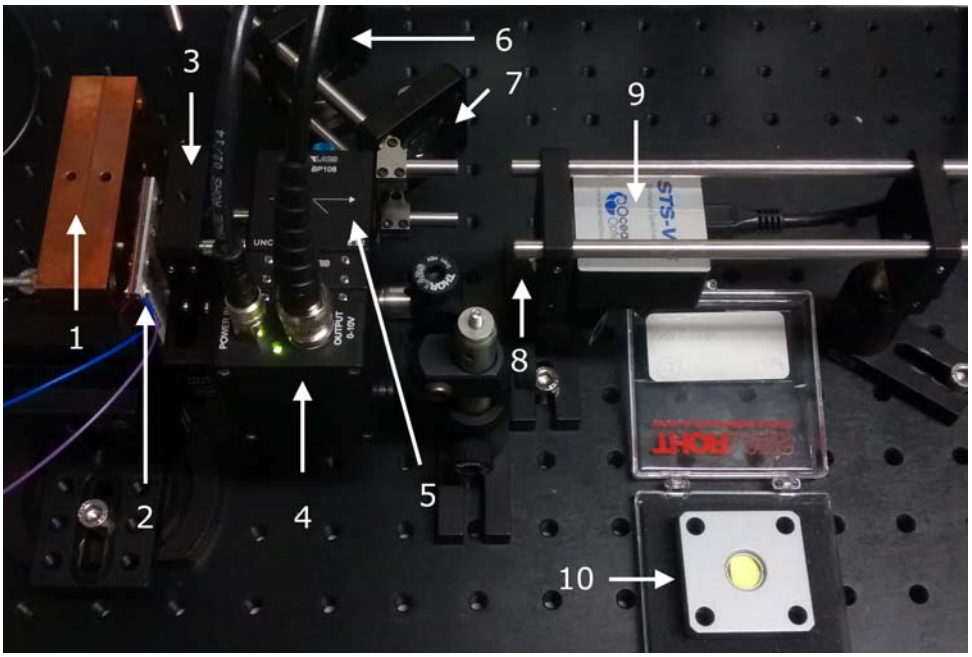


Figura 2.2: Foto del setup di misura dei fosfori remoti in trasmissione e in riflessione. 1) Piastra di dissipazione termica in rame, 2) PCB metal core di supporto del LED, 3) lente di collimazione, 4) fotodiodo, 5) beamsplitter, 6) ingresso dello spettrometro per la misura in riflessione, 7) lente, 8) alloggio della *cage* ospitante il fosforo remoto, 9) spettrometro per la misura in trasmissione, 10) *cage* con fosforo remoto.

Al fine di misurare lo spettro di fosforescenza del materiale per diversi livelli d'intensità di eccitazione sono stati raccolti i setpoint di controllo di potenza ottica rappresentati dalla tensione di lettura del fotodiodo in corrispondenza a una sequenza di correnti del LED. Le correnti sono state selezionate nell'intervallo da 20 a 200 mA a passi di 20mA. Inoltre, una volta posizionati gli spettrometri in modo da rilevare un segnale luminoso sufficientemente forte, è stato trovato il tempo di integrazione ottimale per le loro acquisizioni nel caso di eccitazione corrispondente alla corrente massima del LED di 200 mA. Questo tempo di integrazione viene calibrato in modo da ottenere un picco di luminescenza dei fosfori tra circa 12000 e 13000 conteggi. Questo range permette di evitare la saturazione dello spettrometro a circa 15000 conteggi, mantenendo un elevato rapporto segnale-rumore. Molteplici acquisizioni sono state mediate per ridurre ulteriormente l'effetto del rumore.

Gli spettrometri STS-VIS, come tutti gli spettrometri, devono subire una procedura di calibrazione preliminare per poter fornire degli spettri corretti. Difatti, la risposta dei detector a silicio non è costante sul range spettrale di interesse e la costruzione dello spettrometro inoltre può presentare delle disomogeneità che de-

lineraizzano ulteriormente la risposta spettrale dello strumento. Per ovviare a questo problema, è possibile effettuare la calibrazione, che consiste nell'acquisizione di uno spettro noto emesso da una lampada di calibrazione, la quale fornisce uno spettro costante nell'arco della sua durata di vita predefinita. Grazie al rapporto tra i dati acquisiti e i dati noti sullo spettro di calibrazione, è possibile dunque correggere le successive misure di spettri.

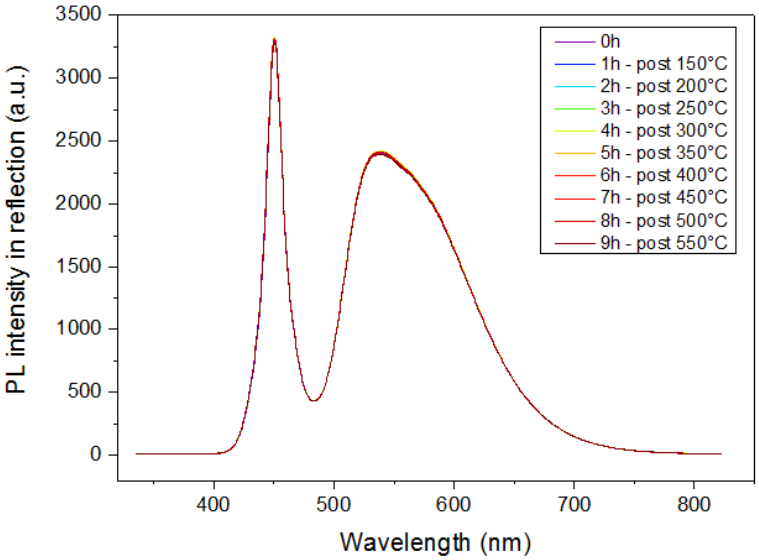
Durante la procedura di misurazione vengono acquisiti innanzitutto gli spettri di buio dei due spettrometri in condizioni di LED spento, i quali vengono sottratti agli spettri acquisiti successivamente. In seguito, un controllore PID senza overshoot implementato nel programma LabView regola la corrente del LED in modo da raggiungere un valore stabile di potenza ottica corrispondente ad ogni setpoint preimpostato del fotodiodo di feedback. Il programma effettua l'acquisizione con i due spettrometri secondo le impostazioni di acquisizione preconfigurate, applica la correzione di calibrazione per ogni spettro acquisito e salva i dati ottenuti in file di testo tabulati. Infine, i dati raccolti vengono elaborati.

2.3.2 Step stress

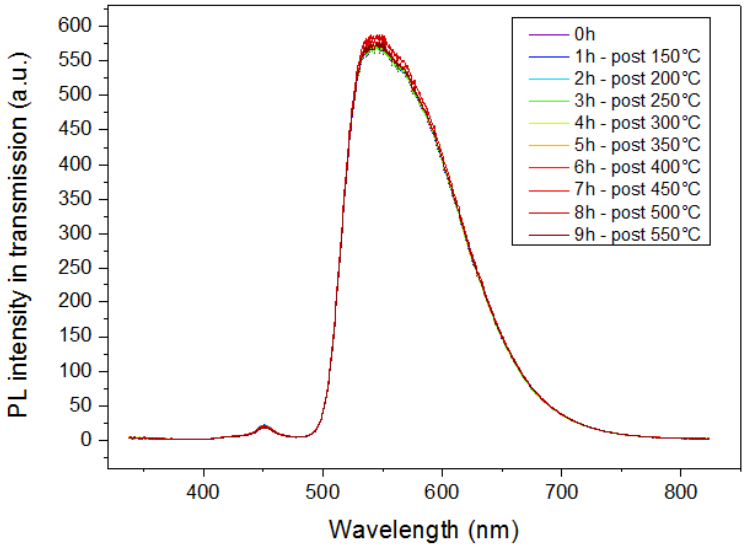
Il primo passo dello studio del degrado a lungo termine della luminescenza dei fosfori sottoposti a stress termico è stato quello di valutare l'entità della sensibilità ad uno stress puramente termico. A questo fine, un campione di fosforo remoto è stato sottoposto ad uno stress con step in temperatura, incrementando la temperatura di 50°C ad ogni step, da 150°C fino a 550°C, con una durata di 1 ora per ogni step.

Per esporre il fosforo remoto a tali temperature, la *cage* sulla quale è stata fissata la finestra con i fosfori è stata posizionata in un apposito forno a muffola capace di raggiungere i 1100°C. Dopo ciascuno step di stress, il fosforo remoto è stato lasciato raffreddare su un dissipatore fino a raggiungere nuovamente la temperatura ambiente, e successivamente essere caratterizzato.

Nella Figura 2.3 vengono presentati i dati degli spettri di luminescenza, rispettivamente in riflessione e in trasmissione, raccolti dopo ogni stress. Si può vedere come gli spettri in riflessione presentano un picco intorno ai 450 nm, corrispondente alla luce del LED riflessa dalla superficie dei fosfori. Al contrario, negli spettri di trasmissione la componente del LED è molto debole, per via dell'assorbimento significativo della luce blu dallo spessore della polvere di fosfori. In entrambe le situazioni, lo spettro di luminescenza dei fosfori è quello tipico di un materiale YAG:Ce^{3+}, descritto nel Capitolo 1, con una larga banda di emissione nel giallo e un picco intorno a 540 nm.



(a) Spettri acquisiti in riflessione dal fosforo remoto.



(b) Spettri acquisiti in trasmissione attraverso il fosforo remoto.

Figura 2.3: Dati relativi allo stress dopo ogni step incrementale di temperatura della durata di 1 ora.

Nel caso di questo step stress si osserva come gli spettri, sia di trasmissione sia di riflessione, misurati ad ogni step siano essenzialmente sovrapposti. Per valutare l'evoluzione dello spettro di luminescenza i dati sono stati integrati ricavando l'intensità luminosa nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 495 nm e 682 nm; tale intervallo permette di non includere il contributo della banda di emissione del LED blu. Le intensità ricavate sono state normalizzate rispetto all'intensità precedente agli stress (step a 0 h), in modo da poter analizzare la variazione percentuale della luminescenza dopo ogni step di stress.

Come si osserva dalla Figura 2.4, la variazione dell'intensità di luminescenza ad ogni step dello stress in temperatura crescente comporta sostanzialmente delle variazioni di meno dell'1% sia per il segnale di luminescenza in trasmissione sia per quello in riflessione. Tali variazioni sono da considerarsi poco significative, in quanto possono essere dovute agli errori casuali introdotti dalla ripetizione delle misure, ad esempio per via del riposizionamento della *cage* dei fosfori remoti all'interno del setup o per via della deformazione meccanica della *cage* di supporto in seguito alle alte temperature. Di conseguenza, è possibile concludere che il fosforo remoto testato non subisce in modo sensibile l'effetto di temperature elevate per intervalli di tempo

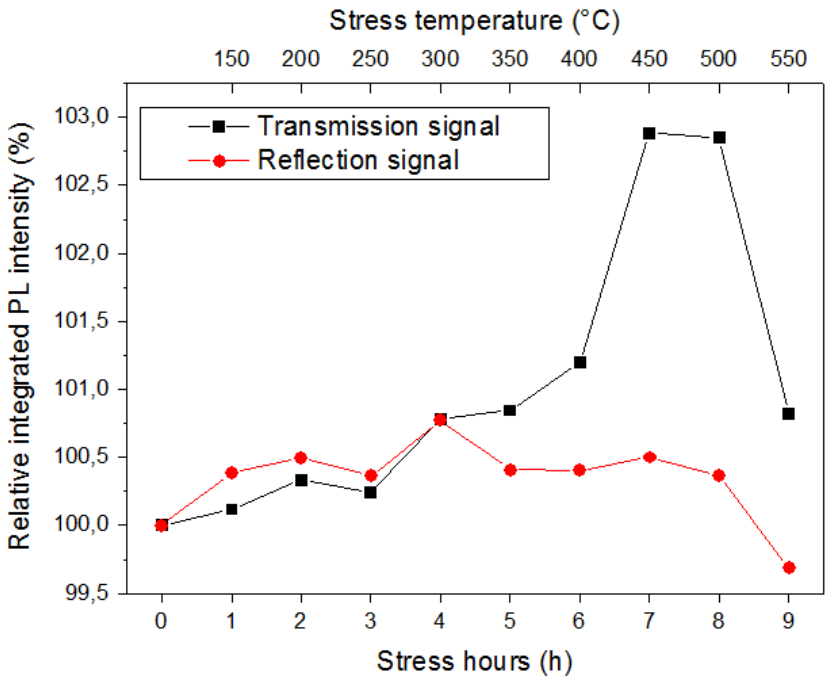


Figura 2.4: Luminescenza relativa dei fosfori in trasmissione e in riflessione registrata dopo ciascuno step di stress.

brevi di 1 ora. Questo significa che il fosforo remoto può essere sottoposto a stress più lunghi e a temperature più elevate di quelle applicate in questo step stress, in quanto a temperature più basse gli effetti sulla luminescenza sarebbero ancora più deboli e difficilmente rilevabili.

2.3.3 Stress a temperatura costante

Dopo aver appurato che il fosforo remoto non subisce un degrado significativo dopo uno stress di 1 ora a temperature di 550°C, sono stati eseguiti tre stress sottoponendo il materiale per lungo periodo a temperature ambiente, rispettivamente pari a 500°C, 525°C e 550°C.

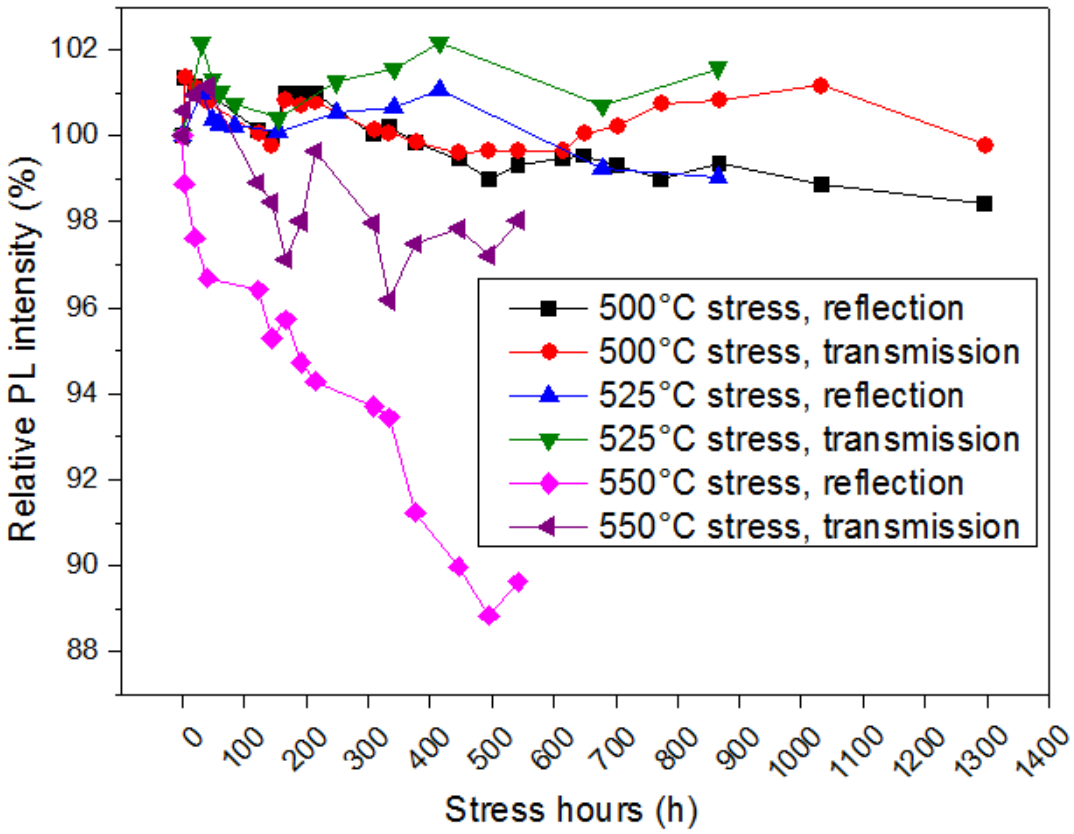


Figura 2.5: Andamento temporale della luminescenza dei fosfori durante gli stress a temperatura costante.

Il setup di misura utilizzato e l'approccio di test adottato è il medesimo descritto nel paragrafo precedente. Il risultato dell'analisi effettuata sui dati raccolti è rappresentato in Figura 2.5. Si può notare come la luminescenza del fosforo remoto

rimane nell'intorno del valore precedente allo stress, con variazioni di 1-2%, nel caso di stress a temperature di 500°C e 525°C per diverse centinaia di ore. Tuttavia, con lo stress a 550°C si osserva un graduale calo della luminescenza, con un tasso di diminuzione del segnale in riflessione maggiore rispetto a quello in trasmissione. Inoltre, si può notare come, dopo alcuni intervalli di stress (167h, 333h) l'intensità in trasmissione aumenti in corrispondenza di un calo di intensità in riflessione. Una possibile spiegazione di questo fenomeno, come anche del calo più rapido dell'intensità in riflessione, deriva dal fatto che la superficie esterna del fosforo remoto è più esposta all'atmosfera dello stress rispetto allo strato di polvere interno. Difatti, il segnale di luminescenza acquisito in riflessione è probabilmente dovuto allo strato di materiale più superficiale, mentre in trasmissione viene rilevato il contributo di tutti gli strati interni attraversati dal fascio di luce di eccitazione. Inoltre, le particelle di polvere che si trovano in superficie del fosforo remoto sono più facilmente suscettibili al distacco dal resto del materiale.

La caratterizzazione dello stress a 550°C non raggiunge la stessa durata degli altri due stress effettuati a causa del completo distacco della polvere dal substrato di zaffiro successivamente alle 542 ore di stress.

Oltre al calo della luminescenza, è possibile valutare l'effetto dello stress ad alta temperatura sulla variazione della forma dello spettro di fotoluminescenza, strettamente legata alle proprietà del colore emesso dai fosfori. Per farlo, si normalizzano gli spettri di luminescenza, relativi a diversi tempi di stress, per un valore corrispondente ad una determinata lunghezza d'onda (tipicamente, quella di picco); il grafico sovrapposto di tali spettri normalizzati può allora permettere di osservare come all'aumentare della durata dello stress la larghezza della banda di emissione aumenta o diminuisce, oppure come il picco di emissione si trasli verso lunghezze d'onda più lunghe o più corte.

Nel caso degli stress eseguiti a temperature costanti, non risulta visibile alcun effetto significativo sulla forma o la posizione dello spettro della banda di emissione dei fosfori, nonostante per la temperatura di 550°C avvenga un calo di intensità, quindi una diminuzione dell'ampiezza dello spettro. Un esempio di valutazione degli spettri normalizzati, relativo alle misure in riflessione per lo stress a 550°C, è rappresentato in Figura 2.6 e vi si può notare come tutti gli spettri normalizzati siano sostanzialmente sovrapposti, con un leggero allargamento dello spettro verso lunghezze d'onda più elevate.

Lo stress ad elevata temperatura permette quindi di concludere che il fosforo remoto a base di YAG:Ce^{3+} può mantenere invariate le sue proprietà di luminescen-

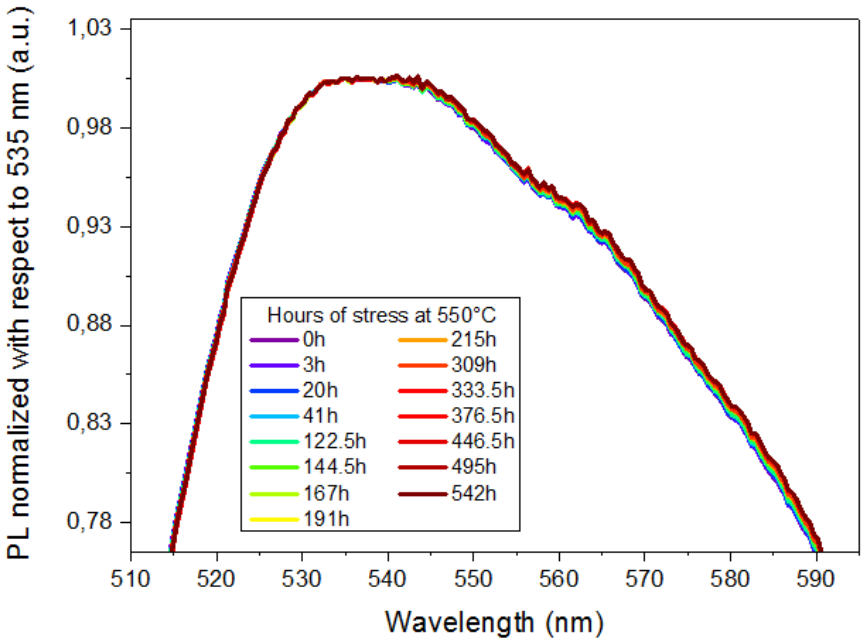


Figura 2.6: Porzione di spettri normalizzati per il valore di luminescenza a 535 nm delle misure in riflessione effettuate durante lo stress a temperatura di 550°C.

za subendo temperature fino a 525°C per tempi superiori alle migliaia di ore. Di conseguenza, questi fosfori remoti sono adatti all'impiego in applicazioni in cui l'affidabilità a lungo termine delle sorgenti d'illuminazione ad elevata intensità risulti essere di primaria importanza.

2.4 Analisi SEM

Per analizzare il degrado dei fosfori YAG:Ce^{3+} provocato dallo stress a temperatura elevata è stato fatto ricorso ad un microscopio elettronico il quale permette di osservare eventuali variazioni chimico-morfologiche indotte sulla superficie del campione. Questa analisi permette inoltre di verificare la forma, dimensione e uniformità delle particelle di fosforo dello specifico materiale.

L'analisi con un microscopio ESEM è stata effettuata su due campioni di fosfori remoti, uno non trattato, e uno sottoposto alla temperatura costante di 550°C per 20 ore circa. La Figura 2.7 mostra la composizione di elementi rilevati dall'analisi EDS nel fosforo remoto vergine: la *signature* corrisponde agli elementi che fanno parte della struttura tipica di un fosforo granato descritta nel Capitolo 1.

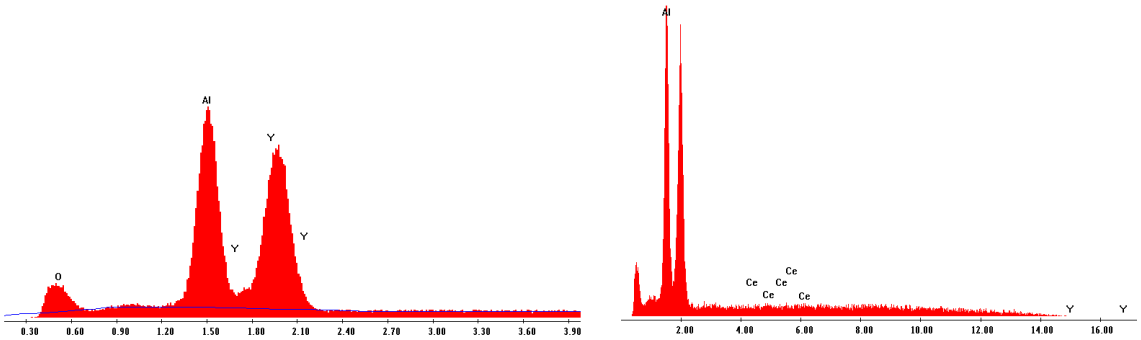


Figura 2.7: Analisi ESEM di elementi presenti nel fosforo YAG:Ce^{3+} non trattato. A sinistra, un ingrandimento della porzione iniziale dei dati a destra

Le Figure 2.8 e 2.9 mostrano le immagini della superficie della polvere dei fosfori remoti acquisite con il microscopio ESEM. Si può notare come le particelle dei fosfori abbiano una distribuzione relativamente uniforme, con dimensioni intorno a 8,5 μm, conformemente alle dichiarazioni della scheda del prodotto fornita dal produttore Intematix per il tipo NYAG4355-01-B08 di fosfori YAG:Ce^{3+} utilizzati.

Dalle immagini del fosforo stressato, non risultano tuttavia danni riconoscibili sulla superficie dei grani. Di conseguenza, non è possibile dedurre informazioni aggiuntive sull'effetto della temperatura elevata sui fosfori con questa tecnica di analisi.

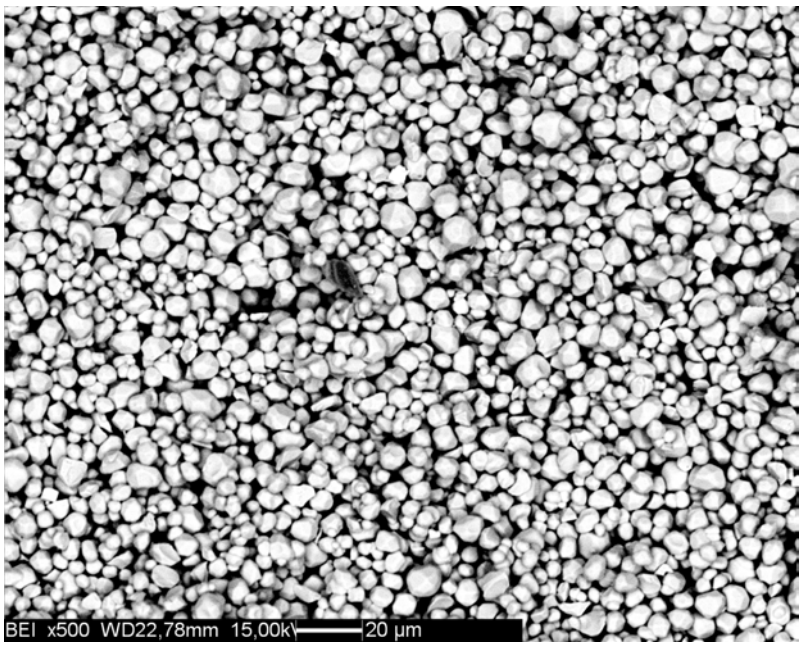


Figura 2.8: Immagine ESEM del fosforo YAG:Ce^{3+} non stressato.

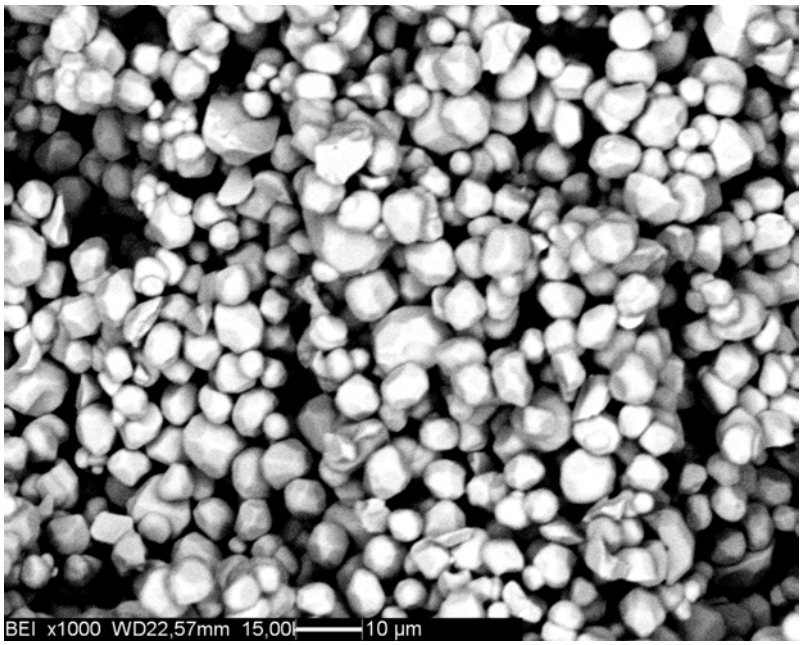


Figura 2.9: Immagine ESEM del fosforo YAG:Ce^{3+} stressato a temperatura costante.

2.5 Caratterizzazione della luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+}

2.5.1 Setup di misura con chuck termico

Per studiare il comportamento della luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+} al variare della temperatura in diverse condizioni di eccitazione ottiche da parte di fascio laser è stato realizzato un setup ottico di misura che include un chuck termo-regolato, schematizzato in Figura 2.10. In questo caso, l'eccitazione è effettuata da un laser blu PL TB450B di OSRAM, uguale a quello utilizzato nei prototipi sviluppati successivamente in questa tesi.

In questo setup il diodo laser è stato montato su un supporto termo-controllato tramite TEC (*Thermo Electric Cooler*), modello TCLDM9 di Thorlabs, connesso a un controllore ITC4005 di Thorlabs con lo scopo di mantenere il dispositivo operativo in regime di potenza ottica costante. In particolare, la regolazione della temperatura del TEC è stata impostata a 20°C per tutte le modalità di misura, permettendo di mantenere costanti la lunghezza d'onda di emissione del diodo laser e la sua corrente di soglia.

Il controllore ITC4005 è uno strumento che permette di comandare diversi tipi di diodi laser in modalità CW (*Continuous Wave*) con un massimo di 5 A di corrente

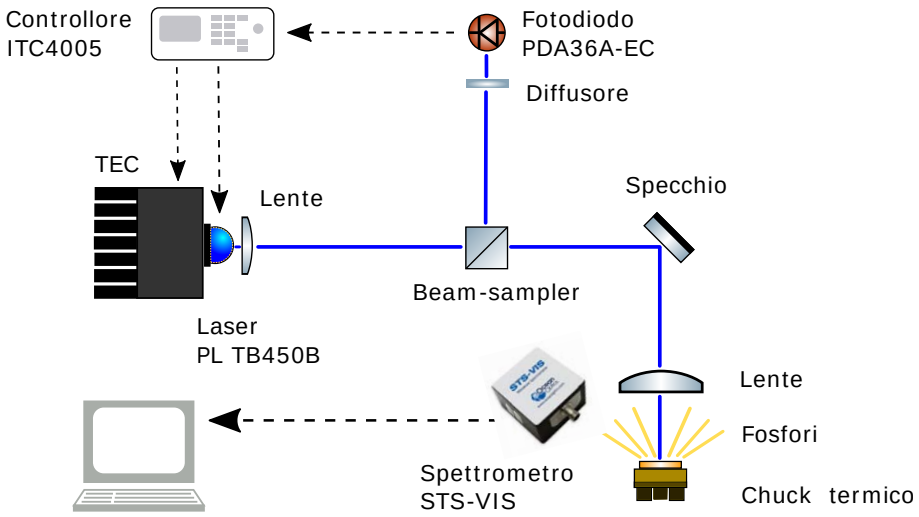


Figura 2.10: Schema del setup di misura con chuck termico.

e 12 V di tensione. Inoltre, esso può controllare il laser in modalità di corrente costante (CC), o in quella di potenza costante (CP) con l'aiuto di un fotodiodo esterno compatibile che monitori il fascio luminoso emesso. La modalità CP risulta particolarmente utile per le misure di luminescenza dei fosfori, in quanto essa permette di mantenere un'intensità di eccitazione del materiale costante nel tempo. Per tale scopo, il setup integra un fotodiodo PDA36A-EC analogo a quello impiegato nel setup di misura per stress in temperatura.

Per permettere al fotodiodo di rilevare il fascio emesso dal laser, questo setup utilizza un *beam-sampler*, ossia una finestra ottica con un rivestimento anti-riflesso su uno dei due lati (Fig. 2.11) che impedisce il verificarsi di riflessioni interne al vetro, le quali produrrebbero altrimenti un fascio trasmesso non omogeneo, con il cosiddetto effetto *ghosting* del raggio trasmesso. L'utilizzo di un beam-sampler costituisce una valida alternativa ad un beam-splitter, soprattutto nel caso di fasci laser ad elevata intensità, per i quali la soglia di danno dei beam-sampler è superiore a quella della maggior parte di beam-splitter. L'intensità elevata del fascio laser potrebbe danneggiare anche il fotodiodo; di conseguenza, in questo setup viene adottato un diffusore che riduce l'intensità della luce incidente sul sensore del fotodiodo. Inoltre, tale diffusore rende trascurabile l'effetto ghosting presente nel fascio di luce riflessa dal beam-splitter.

Per motivi di spazio e di disposizione, questo setup utilizza uno specchio per deviare verso il basso di 90° il fascio laser, inizialmente orizzontale, per farlo incidere sul fosforo remoto fissato al di sopra del chuck termico. Per focalizzare il fascio sui

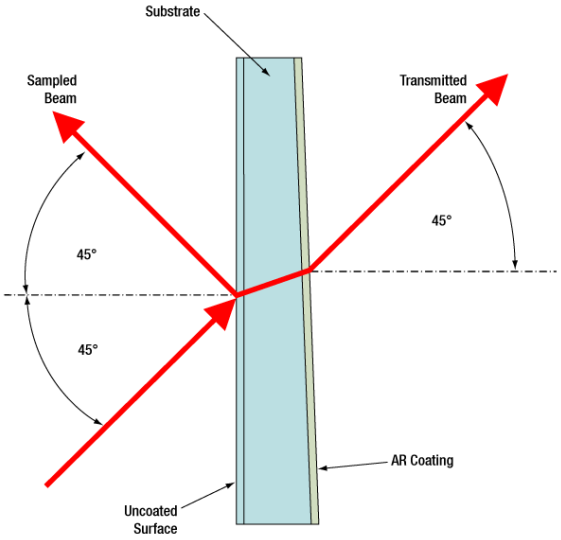


Figura 2.11: Schema di funzionamento di un beam-sampler [39].

fosfori e per poter variare l'intensità di eccitazione, è stata predisposta una lente piano convessa LA1951-A di Thorlabs con una lunghezza focale di 25,4 mm, allineata con lo specchio tramite dei pali di supporto.

L'acquisizione degli spettri di luminescenza del fosforo viene effettuata tramite uno spettrometro STS-VIS preventivamente calibrato e posizionato in modo tale da ricevere il massimo segnale utile in vicinanza alla superficie del fosforo remoto. Per ricavare i valori di intensità ottica sotto differenti condizioni di eccitazione, è inoltre necessario misurare la dimensione dello spot del fascio laser sulla superficie dei fosfori. A tale scopo, una volta fissato il fosforo remoto, è stato utilizzato un microscopio digitale DinoLite per scattare delle foto dello spot di luminescenza a intensità molto basse del fascio di eccitazione (per evitare la saturazione del sensore del microscopio), e posizionando inoltre un filtro di attenuazione tra il microscopio e il fosforo remoto. L'immagine acquisita da DinoLite è stata poi elaborata tramite Matlab per ricavare delle dimensioni approssimate dello spot dal valore FWHM del profilo di luminosità dell'immagine in lunghezza e in larghezza; l'equivalenza tra pixel e millimetri è stata calcolata tenendo conto dell'inclinazione del campo visivo del microscopio. Da queste elaborazioni risulta un diametro dello spot di eccitazione pari a circa 1,93 mm^2 (Fig. 2.12).

Per verificare la linearità tra il controllo in corrente del diodo laser e l'intensità di eccitazione del laser, oltre che per mappare la corrispondenza tra la tensione sul fotodiodo e l'effettiva potenza ottica che incide sui fosfori, è stata effettuata una

misura di caratterizzazione tramite una sfera integratrice posizionata al di sotto della lente di focalizzazione. Come risulta dai dati in Figura 2.13, la relazione è lineare una volta che il controllore opera a regime.

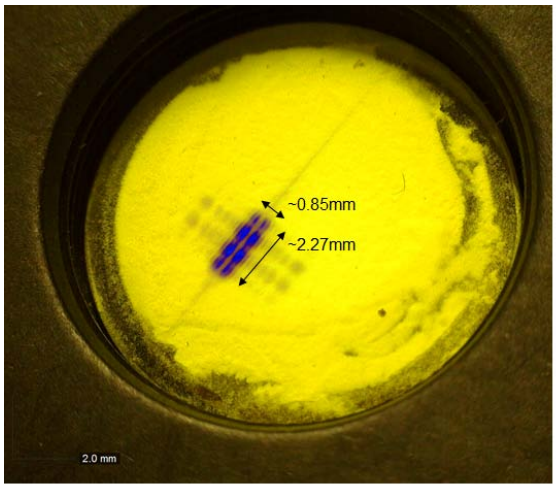


Figura 2.12: Sovrapposizione tra le immagini elaborate dello spot di eccitazione del laser e il campione di fosfori utilizzati per il calcolo delle dimensioni dello spot durante la misura con chuck termico.

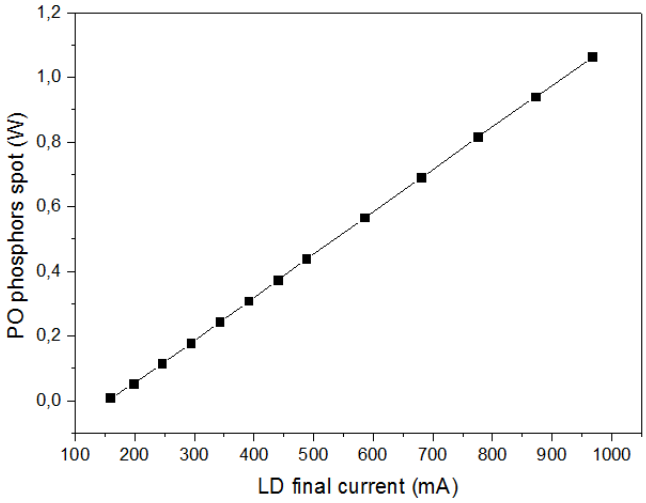


Figura 2.13: Relazione tra la potenza ottica incidente sul campione di fosfori e la corrente del diodo laser misurata tramite una sfera integratrice.

2.5.2 Quenching a bassa eccitazione

Utilizzando il setup di misura della luminescenza con feedback di potenza ottica e controllo della temperatura dei fosfori è possibile misurare l'entità del quenching termico, fenomeno del calo di efficienza di emissione radiativa dei fosfori descritto nel Capitolo 1 e rappresentato nelle Figure 1.27 e 1.28. Per rilevare l'effetto del riscaldamento del materiale ad una determinata temperatura imposta dal chuck termico è necessario che la sua eccitazione da parte del laser sia minima, in modo da evitare di introdurre un ulteriore riscaldamento delle particelle eccitate in presenza del fascio incidente.

Al fine di garantire un'eccitazione del materiale in modalità laser, la potenza ottica del laser per la condizione di bassa eccitazione è stata scelta in maniera tale da avere una corrente del diodo di circa 4 mA sopra la sua soglia di 152 mA circa a 20°C. La corrispondente potenza ottica incidente sui fosfori risulta essere di 1,3 mW; per cui, considerata la dimensione dello spot del laser sulla superficie del fosforo remoto della Figura 2.12 pari a circa 1,93 mm^2, consegue che l'intensità del fascio laser incidente vale 6,7e^{-4} W/mm^2 circa. Le temperature del chuck termico alle quali è stata misurata la luminescenza corrispondono a 30°C, 50°C, 80°C, 110°C, 140°C, 170°C, 200°C.

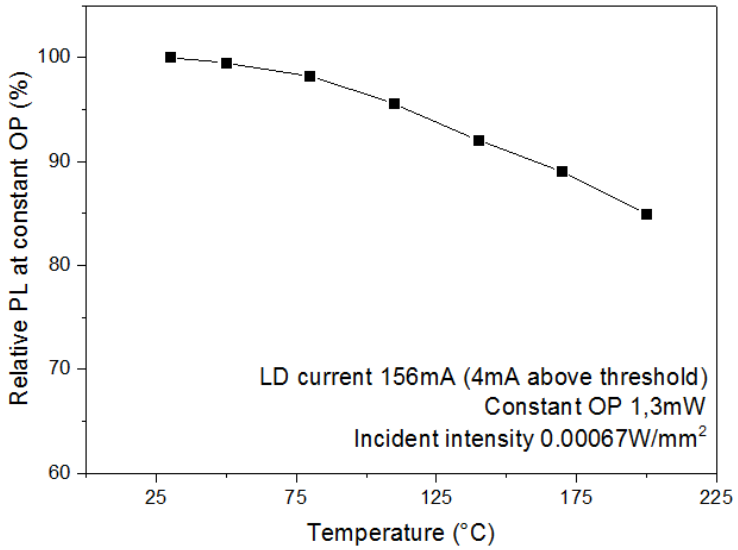


Figura 2.14: Luminescenza relativa dei fosfori YAG:Ce^{3+} in condizioni di bassa eccitazione al variare della temperatura del chuck termico.

I dati degli spettri di luminescenza acquisiti in tali condizioni di bassa ecci-

tazione mostrano una diminuzione della luminescenza relativa all'aumentare della temperatura (Fig. 2.14), con un calo a 200°C pari al 15% del valore a 30°C. Questo andamento è simile a quello descritto in letteratura (ad esempio, Fig. 1.27). Inoltre, il grafico degli spettri normalizzati (Fig. 2.15) mostra una traslazione del picco dello spettro di emissione, assieme ad un leggero allargamento della banda, verso lunghezze d'onda più alte all'aumentare della temperatura del fosforo.

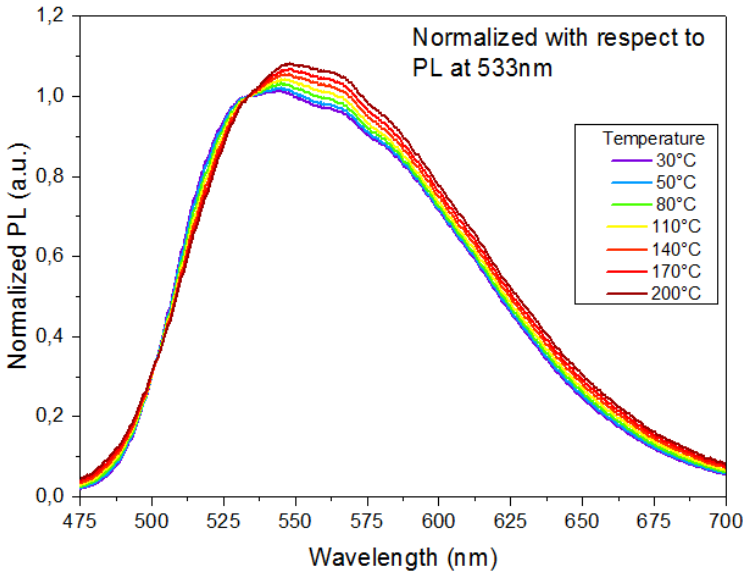


Figura 2.15: Spettri normalizzati della luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+} in condizioni di bassa eccitazione (intensità incidente 0,00067 W/mm^2) al variare della temperatura del chuck termico.

2.5.3 Variazione della luminescenza con la temperatura e l'intensità di eccitazione

L'effetto dell'innalzamento della temperatura dei fosfori può influire sulle loro proprietà di luminescenza in condizioni operative, ossia congiuntamente all'eccitazione con il fascio laser. Questo significa che un aumento dell'intensità di eccitazione comporta una variazione non lineare della luminescenza per temperature elevate. In riferimento all'applicazione pratica, risulta utile studiare questo comportamento per ottimizzare il funzionamento del relativo sistema LARP nei confronti dell'intensità del fascio di eccitazione in modo da garantire un'efficienza elevata.

Utilizzando il setup descritto nel paragrafo precedente, sono stati misurati gli spettri di luminescenza dei fosfori eccitati da uno spot di 1,93 mm^2 circa (Fig. 2.12) per differenti temperature del chuck (30°C, 50°C, 80°C, 110°C, 125°C, 140°C, 170°C, 200°C). I setpoint di potenza ottica costante per il controllo del diodo laser sono stati scelti in modo da corrispondere a un range di intensità di corrente del diodo laser tra 160 mA e 1 A a 20°C. Successivamente, per ogni setpoint utilizzato, sono stati misurati i valori a regime della corrente del diodo laser in CP mode e della potenza ottica incidente sui fosfori (Tabella 2.1), osservando il transiente di potenza ottica dopo l'istante di accensione del diodo laser grazie ad una sfera integratrice posizionata nel setup al posto dei fosfori remoti. Questa misura permette di ricavare la potenza del fascio laser che incide realmente sui fosfori, dato che gli elementi ottici del setup, quali il beam-splitter, lo specchio e la lente introducono a loro volta delle attenuazioni della luce emessa. Dalla potenza ottica incidente è possibile ricavare i valori corrispondenti di intensità incidente sapendo che la dimensione dello spot utilizzato nelle misure è di circa 1,93mm^2.

Corrente diodo laser a regime (mA)	PO incidente su fosfori (W)	Intensità incidente (W/mm^2)
160,0	0,00735	0,00381
198,2	0,05274	0,02733
246,2	0,11488	0,05952
294,6	0,17816	0,09231
343,1	0,24243	0,12561
391,5	0,30757	0,15936
440,3	0,37262	0,19307
488,3	0,43743	0,22665
585,4	0,56568	0,2931
681,0	0,68932	0,35716
775,7	0,81438	0,42196
872,3	0,93886	0,48646
968,4	1,0617	0,5501

Tabella 2.1: Corrispondenza tra i valori di corrente del diodo laser, potenza ottica e intensità incidente sul fosforo remoto utilizzati per le misure.

I dati forniti dagli spettri di luminescenza sono illustrati nelle figure 2.16a e 2.16b, rispettivamente in funzione dell'intensità di eccitazione dei fosfori e della temperatura del chuck termico. Questi grafici mostrano come la relazione tra la luminescenza e l'intensità incidente sia lineare per temperature più basse, diventando sempre meno lineare all'aumentare della temperatura. Inoltre, ad alte temperature è possibile vedere come al variare dell'intensità esista un intervallo di massimo della luminescenza; un ulteriore aumento dell'intensità non produce un ulteriore aumento della luminescenza, bensì una diminuzione. Questo calo è evidentemente dovuto al forte riscaldamento del materiale che diminuisce l'efficienza di emissione radiativa aumentando le ricombinazioni non-radiative. Analogamente, si può osservare come, a parità di intensità incidente, una temperatura dei fosfori più alta comporti una minore emissione radiativa di luminescenza.

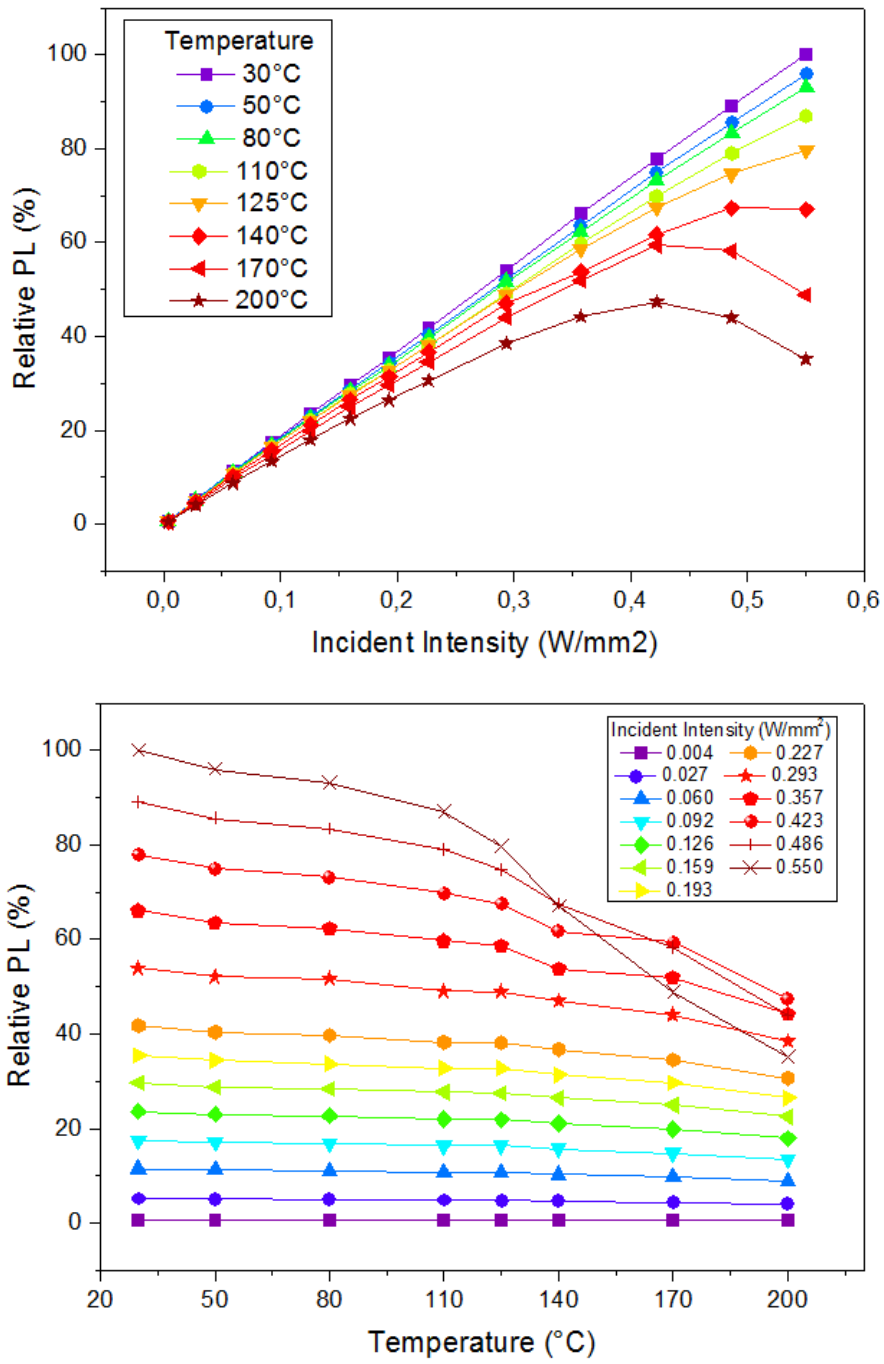


Figura 2.16: Luminescenza relativa in funzione della temperatura per diverse intensità d'eccitazione.

I dati sulla luminescenza in funzione della temperatura possono essere espressi inoltre sotto forma di grafico di Arrhenius, il quale permette di stimare il valore della barriera di attivazione termica del fenomeno del quenching termico osservato.

Considerando l'espressione che lega l'intensità della luminescenza del fosforo con la temperatura [5],

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + c\exp(-q\Delta E/kT)} \tag{2.1}$$

dove $I(T)$ e I_0 sono l'intensità di luminescenza rispettivamente a temperatura T e I_0 in questo caso è l'intensità a 30°C, c è una costante, k la costante di Boltzmann e ΔE l'energia di attivazione, è possibile stimare δE dalla pendenza della retta

$$\log\left(\frac{I_0}{I(T)}\right) = \log A - \frac{q\Delta E}{kT} \tag{2.2}$$

dal grafico di $\log(I_0/I(T)-1)$ in funzione di q/kT [7]. Ad esempio, in corrispondenza dell'intensità di eccitazione più bassa tra quelle applicate durante le misure, relativa alla corrente di 160 mA del diodo laser, si ricava un valore di ΔE pari a circa 19,67 eV (Fig. 2.17). Ricavando in maniera analoga i valori della barriera di energia per tutti i valori di intensità di fascio laser incidente, si ottiene il grafico in Figura 2.18. Si può osservare che per basse intensità di eccitazione il valore della barriera di attivazione si trova intorno a 0,21 eV; esso aumenta significativamente per intensità più alte, probabilmente per via del comportamento non lineare della luminescenza misurata.

In analogia a quanto descritto nell'analisi della luminescenza in riferimento al quenching a bassa eccitazione, in questo caso è possibile confrontare gli spettri di emissione normalizzati per valutare la loro deformazione per diverse intensità di eccitazione. La Figura 2.19 mostra gli spettri normalizzati al variare della temperatura dei fosfori per tre livelli di intensità di eccitazione: basso, medio e alto. Al crescere della temperatura si osserva un'evidente allargamento degli spettri verso lunghezze d'onda più alte; tuttavia, questo effetto è molto più prominente per intensità di eccitazione basse e diminuisce con l'aumentare dell'eccitazione.

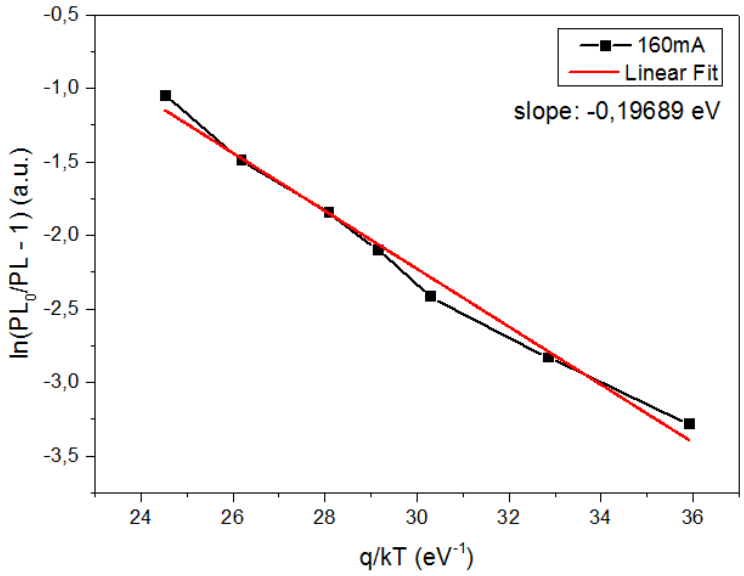


Figura 2.17: Fit lineare della relazione $\log(PL_0/PL-1)$ vs q/kT per la luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+} con eccitazione di 0,00381 W/mm^2.

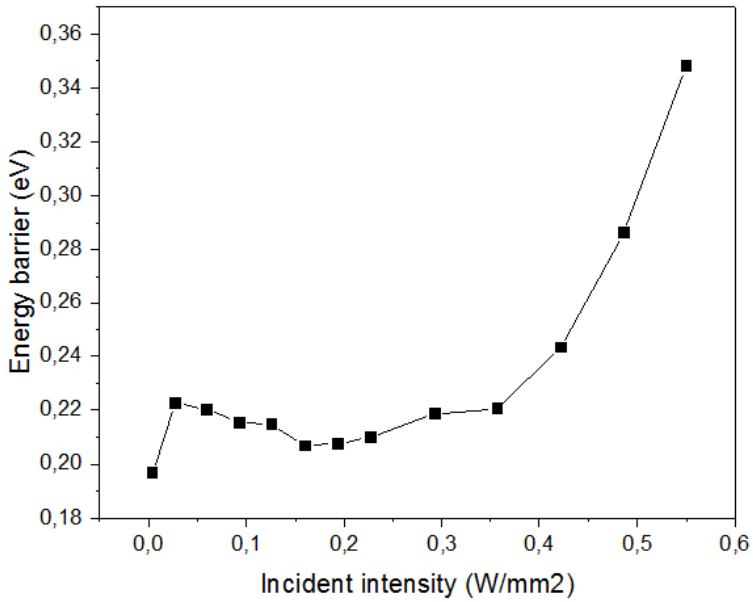


Figura 2.18: Barriera di energia di attivazione ottenuta dai dati misurati a diverse intensità di eccitazione dei fosfori YAG:Ce^{3+}.

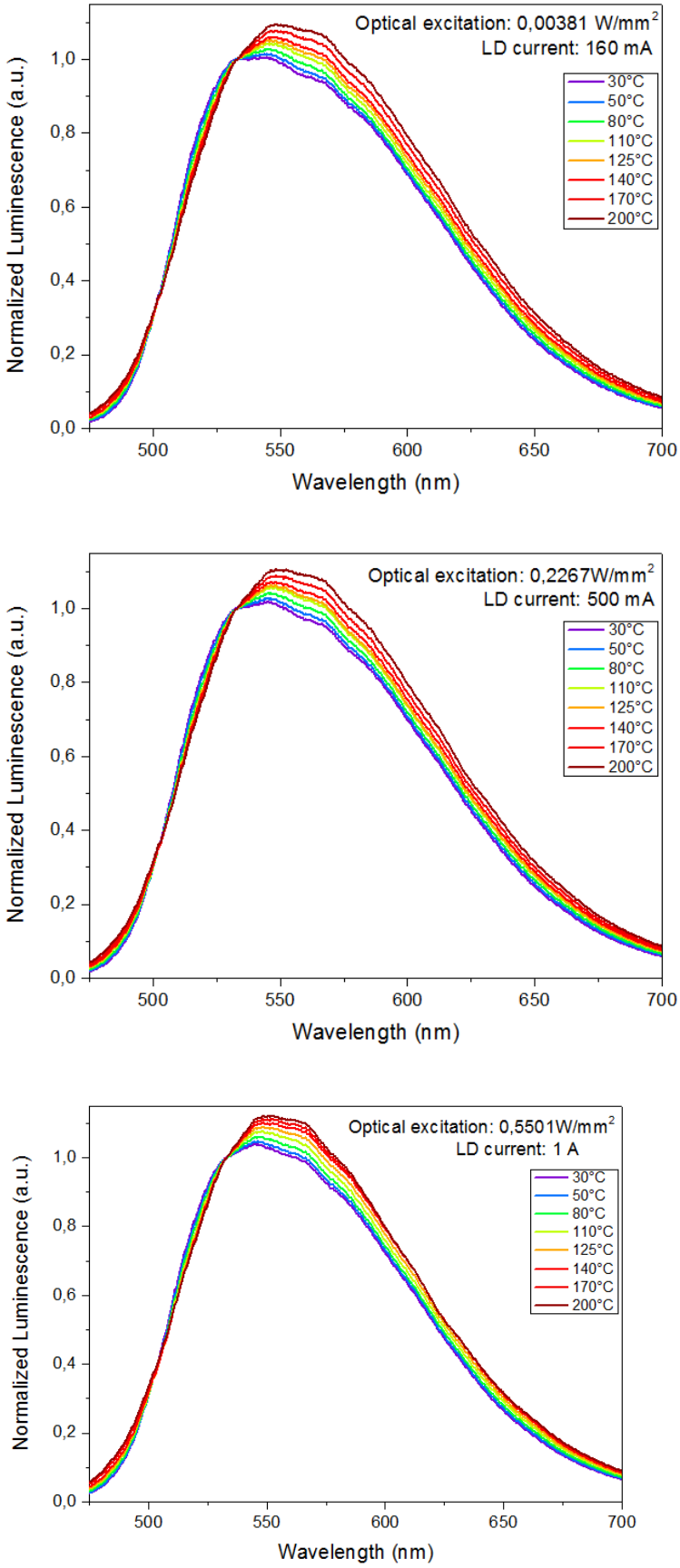


Figura 2.19: Spettri di luminescenza dei fosfori YAG:Ce^{3+} al variare della temperatura del chuck, normalizzati rispetto al valore a 533 nm (dall'alto verso il basso: intensità di eccitazione bassa, media e alta).

2.5.4 Stress ottico in condizioni operative

Un'ulteriore caratterizzazione del comportamento luminescente dei fosfori remoti realizzati per un prototipo LARP consiste nell'analisi degli spettri di luminescenza dei fosfori sottoposti a una prolungata eccitazione tramite il laser blu. In condizioni di elevata intensità incidente, un tale stress permette di simulare le condizioni operative reali del dispositivo e di osservarne le prestazioni luminose dopo un lungo periodo di funzionamento. Inoltre, esso può fornire dei dati per stimare l'intensità della luminescenza in un dato momento del tempo dopo l'accensione per determinate condizioni di intensità di fascio laser incidente.

Il setup utilizzato per questo stress è quello descritto nella sezione 2.5.1, con l'unica differenza che consiste nella rimozione del chuck termico, non necessario in primo luogo. Il setup risultante è mostrato in Figura 2.20.

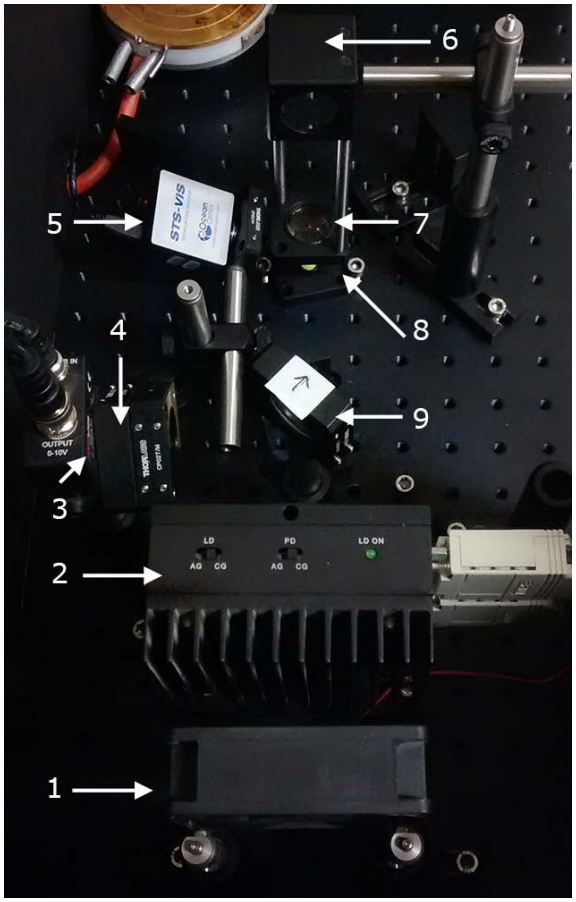


Figura 2.20: Foto del setup di misura per lo stress con fascio laser. 1) ventola, 2) supporto TEC con diodo laser montato, 3) fotodiodo, 4) diffusore, 5) spettrometro, 6) specchio, 7) lente di focalizzazione, 8) campione di fosfori, 9) beamsampler.

Al fine di operare il diodo laser in regime di potenza ottica costante nota, è stata effettuata una mappatura con 4 setpoint della relazione lineare tra la potenza ottica a regime del fascio incidente e il valore di lettura del fotodiodo di feedback nel setup (Fig. 2.21). La potenza ottica è stata monitorata da una sfera integratrice posizionata nel setup in luogo dei fosfori remoti, osservando il transiente di potenza del fascio creato dal diodo laser controllato in potenza ottica costante; i setpoint utilizzati per la mappatura, corrispondenti a dei valori di corrente del diodo laser, sono elencati in Tabella 2.2.

Setpoint fotodiodo (V)	**Corrente diodo laser a regime (mA)**	**PO incidente su fosfori (mW)**
0,20	197,6	49,7
1,35	396,1	308,8
2,52	593,3	571,5
3,60	785,9	822,9
4,70	980,3	1071,0

Tabella 2.2: Corrispondenza tra i valori di setpoint del fotodiodo, corrente del diodo laser e potenza ottica utilizzati per la mappatura della potenza ottica incidente sui fosfori.

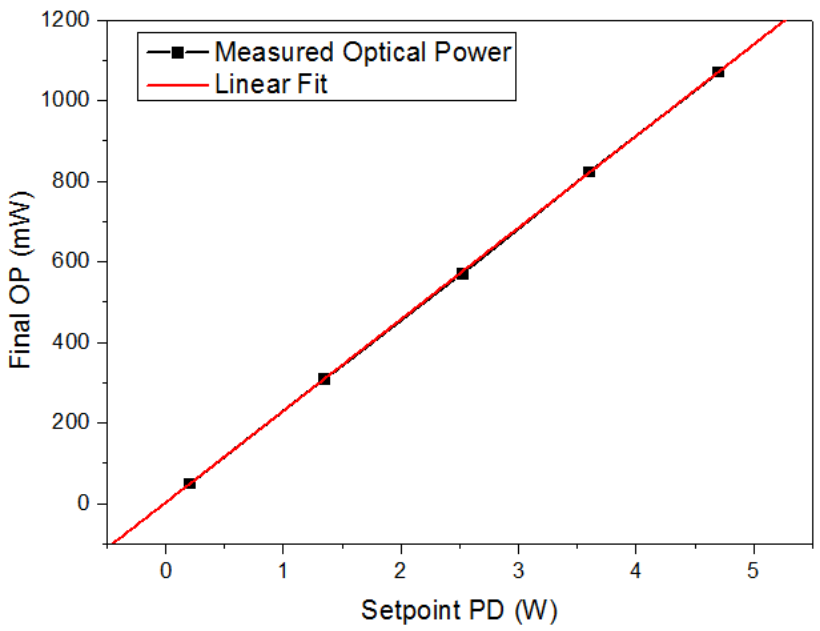


Figura 2.21: Relazione lineare tra la potenza ottica a regime e il setpoint del fotodiodo per la modalità in potenza ottica costante del controllo del diodo laser ricavata dai dati della tabella 2.2.

Questi dati permettono di regolare le impostazioni del controllore del laser ITC4005 in modo da fornire qualunque potenza ottica costante desiderata per la misura (entro i limiti di calibrazione), ricavando il setpoint relativo dall'interpolazione del fit lineare associato. Per valutare l'area dello spot sono state acquisite delle immagini della superficie dei fosfori remoti posizionati nel setup con un microscopio digitale DinoLite (Fig. 2.22), poi elaborate tramite software Matlab, facendo riferimento alle dimensioni della finestra della *cage* che alloggia il fosforo remoto per tenere conto della deformazione dell'immagine dovuta all'inclinazione del microscopio. La posizione della lente di focalizzazione è stata poi regolata in modo da ottenere uno spot dalle dimensioni e dalla forma uniforme. A causa delle dimensioni del fascio collimato e delle distanze tra gli elementi nel setup, non è stato possibile ottenere uno spot uniforme con dimensioni di circa $1mm^2$. Per giungere a tale scopo si è tentato

Figura 2.22: Dettaglio del setup di misure in cui è evidenziato il posizionamento relativo di fosfori, spettrometro e microscopio.

di procedere ponendo un diffusore prima dello specchio, includendo inoltre una lente per la ricollimazione: purtroppo tale sistema introduceva una perdita di circa 20% della potenza ottica, abbastanza grande da impedire il verificarsi del quenching della luminescenza per correnti del diodo laser inferiori a 1A.

La dimensione dello spot utilizzata per lo stress è stata pari a circa 0,34 mm^2; tale dimensione permette di avere uno spot relativamente concentrato, con la lente di focalizzazione sufficientemente distante dalla superficie dei fosfori, cosa che ha permesso sia di ottenere facilmente una buona immagine dell'area dello spot con il microscopio sia di acquisire un forte segnale con lo spettrometro. Inoltre, in tali condizioni la potenza ottica "di soglia" oltre la quale si verifica il fenomeno del quenching è di circa 911 mW, corrispondente ad una corrente non eccessivamente elevata del diodo laser (circa 880 mA).

Gli stress sono stati condotti su vari campioni di fosfori remoti, alcuni realizzati con deposizione tramite alcol benzilico e lento *spin coating*, altri attraverso deposizione diretta con alcol etilico. Per quanto riguarda i fosfori processati con alcol benzilico, si nota un evidente degrado della luminescenza nel tempo per un'intensità incidente di 2,67 W/mm^2 (Fig. 2.25), con uno spot di eccitazione di 0,341 mm^2 mostrato in Figura 2.23. Questo valore di intensità rappresenta il limite oltre cui si osserva un calo reversibile della luminescenza all'accensione del diodo laser, rilevabile osservando l'acquisizione dello spettrometro in tempo reale con il programma SpectraSuite. Lo stress mette in evidenza un decadimento esponenziale con costante di tempo pari a 1342 minuti. Il grafico dei dati in Figura 2.25 mostra delle oscillazioni periodiche causate dall'impianto di climatizzazione che probabilmente influenza il controllore ITC4005, altamente sensibile alla temperatura ambientale.

Gli spettri normalizzati rispetto al valore a 540 nm mostrano un allargamento verso lunghezze d'onda maggiori all'aumentare della durata dello stress. Come già osservato in esperimenti precedenti, questo effetto è probabilmente dovuto al riscaldamento del materiale luminescente.

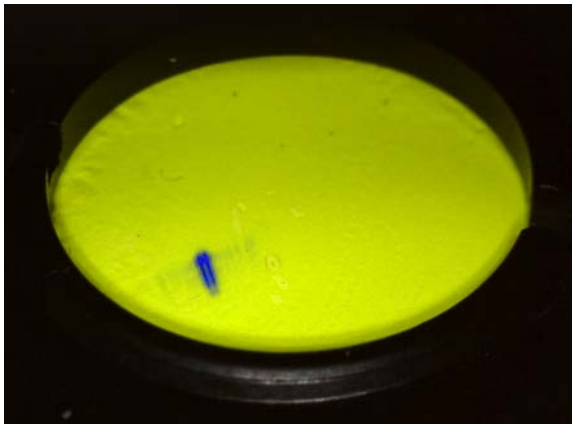


Figura 2.23: Sovrapposizione tra le immagini elaborate dello spot di eccitazione del laser e il campione di fosfori utilizzati per il calcolo delle dimensioni dello spot durante lo stress a 2,67 W/mm^2 di intensità incidente. Area dello spot 0,341 mm^2.

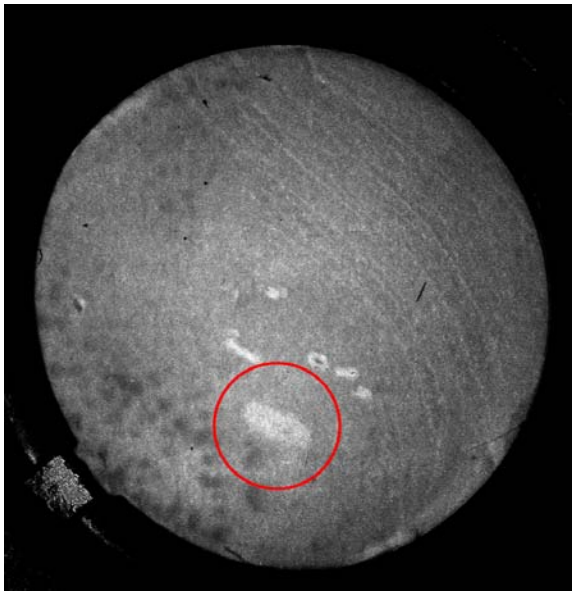


Figura 2.24: Immagine desaturata ad alto contrasto della superficie dei fosfori dopo lo stress con un fascio incidente con intensità di 2,67 W/mm^2, illuminata da un LED blu. Nel cerchio rosso è visibile la forma dello spot del fascio laser incidente per via di una minore emissione dei fosfori stressati.

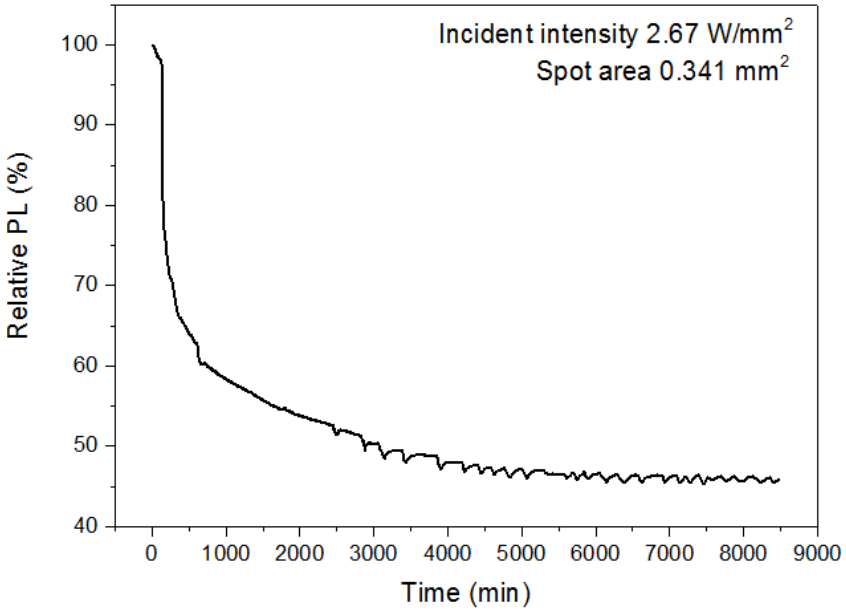


Figura 2.25: Grafico dei dati di luminescenza in funzione del tempo di stress a 2,67 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol benzilico.

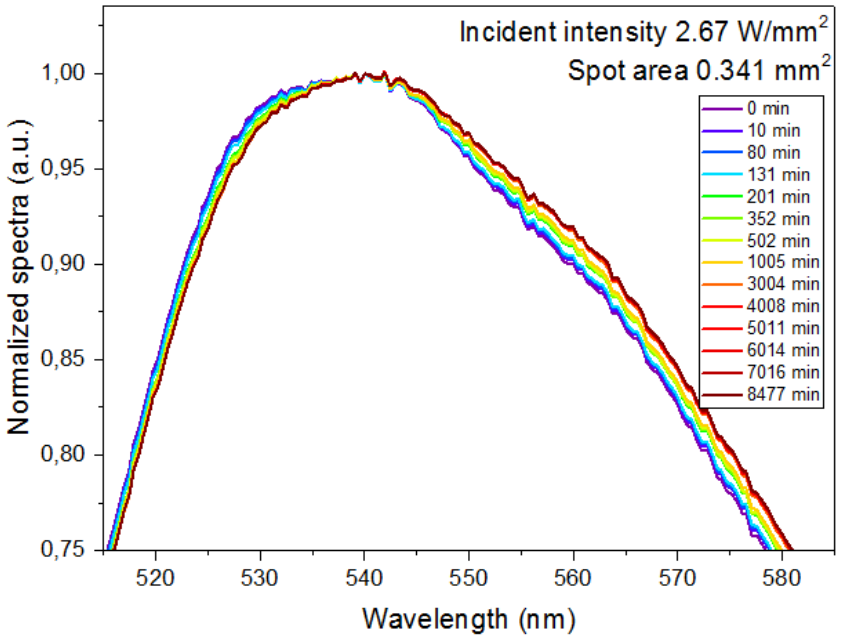


Figura 2.26: Porzione di spettri normalizzati rispetto al valore a 540 nm relativi ad alcuni istanti nell'arco dello stress a 2,67 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol benzilico.

Un secondo stress è stato condotto su un campione di fosforo remoto realizzato con alcol benzilico sottoposto a metà dell'intensità di eccitazione rispetto al primo stress. Questa condizione è stata ottenuta misurando lo spot ottenuto posizionando la *cage* del secondo fosforo remoto al posto di quella del primo (Fig. 2.27), e impostando il setpoint di feedback del controllore in modo tale da ottenere una potenza ottica adeguata, grazie ai dati della Figura 2.21. I risultati dello stress mostrano un degrado minore (Fig. 2.29), con un tempo di decadimento esponenziale della luminescenza più lungo, pari a 2489 minuti, e un minore effetto sulla forma dello spettro di emissione (Fig. 2.30) rispetto allo stress con intensità incidente doppia. I dati della luminescenza nel tempo includono analogamente l'effetto rumoroso delle oscillazioni della temperatura ambientale nel locale dell'esperimento, più evidente per via della minore variazione del segnale utile.

In entrambi gli stress il danno creato dal fascio laser ad alta intensità sui fosfori è permanente, in quanto la luminescenza rilevata dopo aver arrestato lo stress e aver lasciato raffreddare il fosforo raggiunge un'intensità analoga a quella alla fine dello stress. Inoltre, il danno creato dallo spot del fascio laser è visibile sulla superficie dei fosfori se questa viene illuminata con un LED blu, tramite il quale si può notare più facilmente che la regione superficiale che ha subìto lo stress emette in maniera meno intensa rispetto il resto del materiale fosforescente superficiale (Fig. 2.24 e 2.28b).

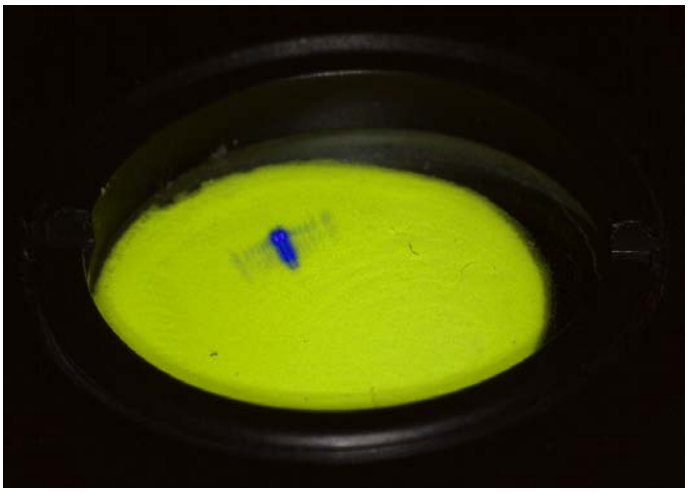
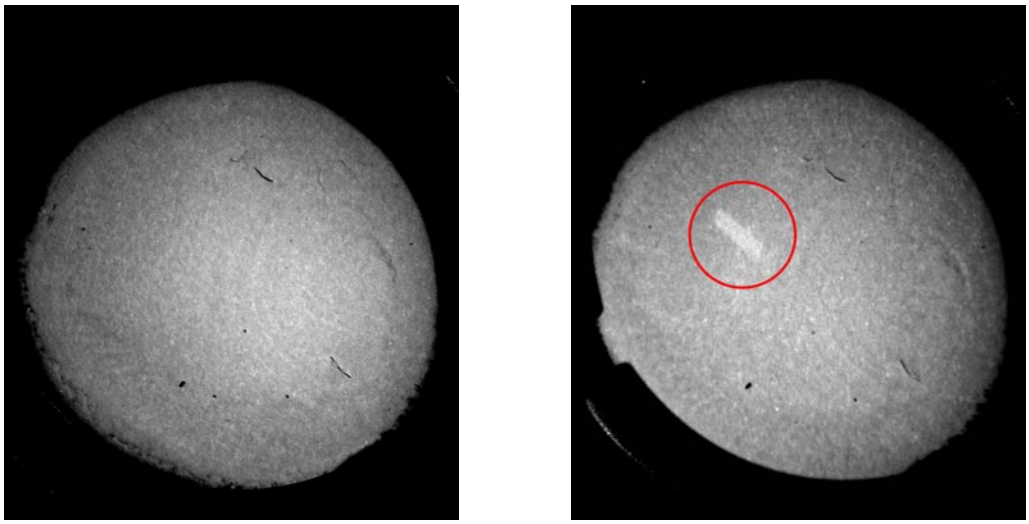


Figura 2.27: Sovrapposizione tra le immagini elaborate dello spot di eccitazione del laser e il campione di fosfori utilizzati per il calcolo delle dimensioni dello spot durante lo stress a 1,3352 W/mm^2. Area dello spot 0,359 mm^2.



(a) Prima dello stress **(b)** Dopo lo stress

Figura 2.28: Confronto tra le foto desaturate ad alto contrasto della superficie dei fosfori sottoposti allo stress di fascio incidente con intensità di 1,3352 W/mm^2, illuminati da un LED blu. Nel cerchio rosso è visibile la forma dello spot del fascio laser incidente dovuta ad una minore emissione dei fosfori stressati.

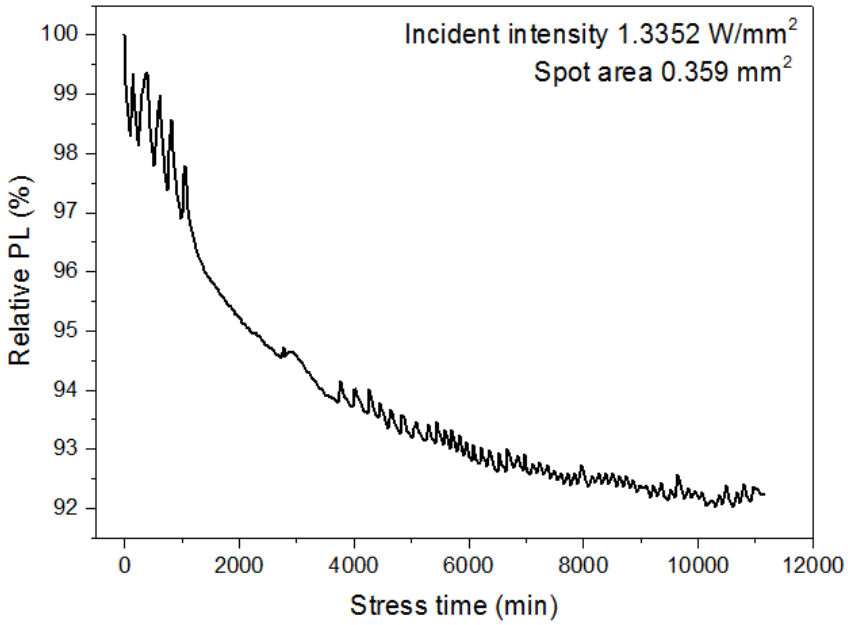


Figura 2.29: Grafico dei dati di luminescenza in funzione del tempo di stress a 1,3352 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol benzilico.

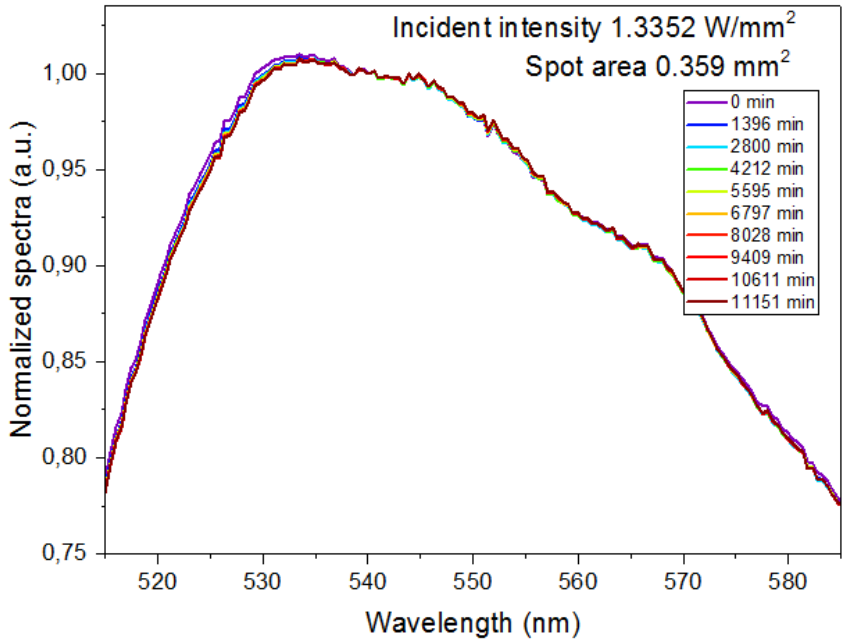


Figura 2.30: Porzione di spettri normalizzati rispetto al valore a 540 nm relativi ad alcuni istanti nell'arco dello stress a 1,3352 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol benzilico.

Un terzo stress simile è stato condotto su un fosforo remoto realizzato con l'utilizzo dell'alcol etilico come carrier durante la deposizione del materiale luminescente. Per un corretto confronto tra i due metodi di deposizione, è stato deciso di mantenere la stessa intensità incidente dello stress a bassa intensità tra quelli relativi ai fosfori remoti realizzati con alcol benzilico.

In questo caso, la cage con il fosforo remoto è stata posizionata allo stesso modo dello stress precedente (effettuato con un'intensità incidente pari a 1,3352 W/mm^2). Nonostante la posizione della lente di focalizzazione non sia stata modificata, la dimensione dello spot sulla superficie dei fosfori risulta essere in questo caso leggermente diversa dal caso precedente (0,394 mm^2, invece di 0,359 mm^2). Ciò è probabilmente dovuto a una diversa profondità di collocazione del fosforo remoto all'interno della cage. Tuttavia, grazie alla mappatura tra la potenza ottica del diodo laser ed i setpoint operativi del fotodiodo (Fig. 2.21), è comunque possibile ricavare il valore di setpoint con cui impostare il sistema di misura in modo tale da ottenere la stessa intensità incidente dell'esperimento precedente. A causa della risoluzione limitata del valore di setpoint, pari a 1 mV, il valore di intensità incidente più vicino a quello desiderato vale 1,3348 W/mm^2.

I risultati di questo stress sono illustrati in Figura 2.31. Confrontando l'andamento della luminescenza durante lo stress con il grafico analogo ricavato durante lo stress precedente, si può osservare come ora la variazione della luminescenza sia sostanzialmente trascurabile, in quanto minore dello 0,5% su un intervallo di quasi 10000 minuti (circa 166 ore). Durante lo stesso tempo di stress alla medesima intensità, il fosforo remoto dell'esperimento precedente subiva un calo di luminosità di circa 7,5% (Fig. 2.29). Il grafico degli spettri normalizzati dell'ultimo stress (Fig. 2.32) non mostra alcun cambiamento della forma dello spettro.

Questi stress dimostrano che il tipo di solvente utilizzato per deporre le particelle di fosfori sul substrato può influire sul degrado della luminescenza di queste particelle nel tempo. In particolare, è stato dimostrato come l'alcol benzilico abbia un effetto negativo in questo senso. In ogni caso, è possibile affermare che il processo di realizzazione di un fosforo remoto può influire sulle sue proprietà e prestazioni all'interno di un sistema LARP.

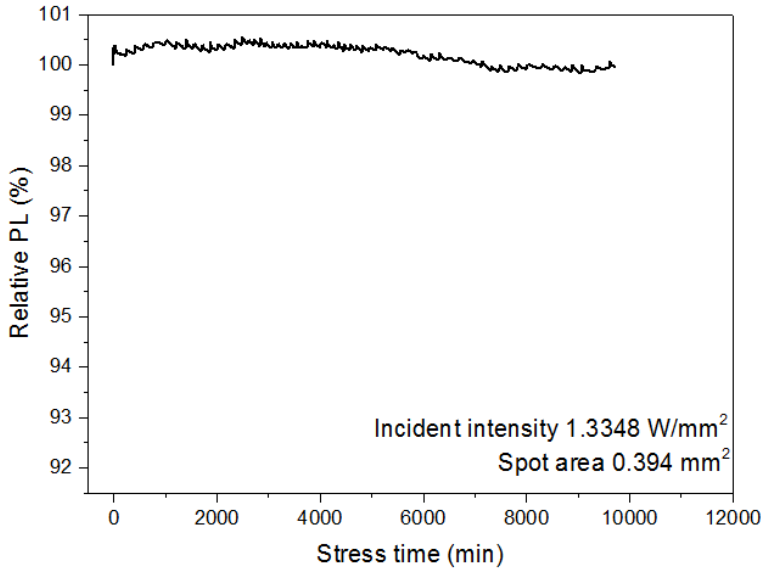


Figura 2.31: Grafico dei dati di luminescenza in funzione del tempo di stress a 1,3348 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol etilico.

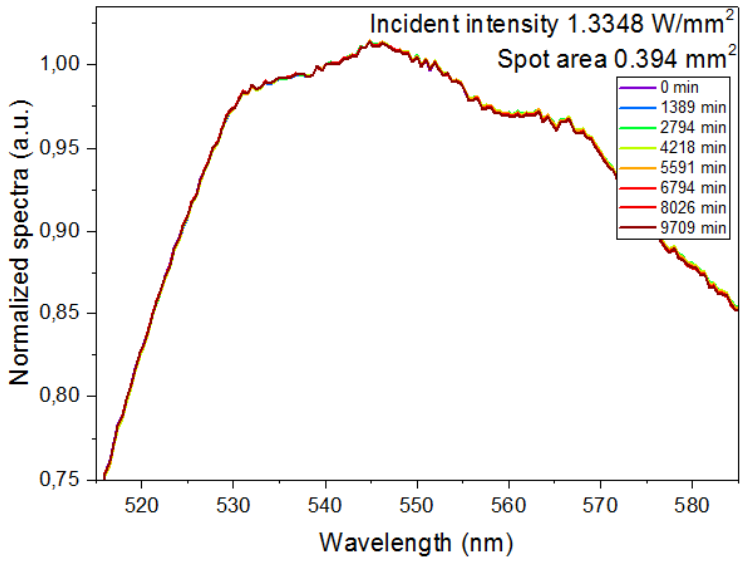


Figura 2.32: Porzione di spettri normalizzati rispetto al valore a 540 nm relativi ad alcuni istanti nell'arco dello stress a 1,3348 W/mm^2 di intensità incidente. Campione realizzato tramite deposizione diretta con alcol etilico.

2.6 Conclusioni

La parte di lavoro di tesi descritta in questa sezione ha permesso di studiare diversi aspetti della luminescenza e dell'affidabilità di campioni di fosfori remoti realizzati in laboratorio con fofori YAG:Ce^{3+} di Intematix per essere utilizzati nei prototipi di sistema LARP descritti in seguito.

Gli stress ad alte temperature, hanno mostrato che i fosfori realizzati mantengono inalterate le proprietà di luminescenza anche se sottoposti a stress termici di centinaia di ore a temperature fino a 525°C. Un degrado della luminescenza viene osservato per temperature di 550°C, sia in trasmissione sia in riflessione rispetto al fosforo remoto, rispettivamente del 2% e del 10% circa dopo 500 ore di stress; tuttavia, nessuna variazione significativa della forma dello spettro di luminescenza viene osservato. Ciò significa che i fosfori remoti realizzati possono operare a lungo in un sistema LARP senza incorrere in un degrado irreversibile indotto otticamente. Infatti, poiché la temperatura di quenching termico di fosfori è di molto superiore a 525°C, il materiale non sarà mai sottoposto a livelli di temperatura tali da indurre degrado.

Analizzando l'andamento della luminescenza in funzione della temperatura e dell'intensità di eccitazione, si osserva che la temperatura dei fosfori durante la loro emissione influenza in modo importante la loro efficienza di luminescenza radiativa: già a basse eccitazioni sussiste un fenomeno di quenching termico, progressivo con la temperatura, che a 200°C comporta un calo della luminescenza di circa il 15% rispetto all'intensità a 30°C, oltre che una traslazione dello spettro di emissione verso lunghezze d'onda più lunghe. Per eccitazioni sempre più elevate con fascio laser, si osserva che per via del riscaldamento del fosforo remoto la luminescenza non aumenta linearmente, e per intensità di eccitazione e temperature sufficientemente alte può subire un calo per via della presenza di una barriera di attivazione di processi non-radiativi. Questo comportamento è sicuramente critico per un utilizzo in un sistema di illuminazione LARP reale. Di conseguenza, l'intensità di eccitazione operativa in un tale sistema deve essere scelta in modo da non provocare un eccessivo riscaldamento dei fosfori , il che provocherebbe un quenching di emissione, compromettendo l'efficienza totale del sistema.

Infine, l'effetto dello stress di un fascio laser intenso incidente sui fosfori per centinaia di ore è stato studiato per stimare il degrado della luminescenza della regione di fosfori eccitata dal fascio laser nel tempo. I risultati ottenuti mostrano che il degrado può dipendere fortemente dal metodo di realizzazione del fosforo remoto:

nello specifico si è osservato come l'utilizzo dell'alcol benzilico favorisca il degrado della luminescenza che tende a calare nel tempo con un andamento esponenziale.

Alla luce di queste analisi, possiamo concludere che l'utilizzo di fosfori remoti con polvere YAG:Ce^{3+} rappresenta una possibilità applicabile ai sistemi LARP ad alta potenza, purché si riescano a soddisfare in modo equilibrato dei requisiti operativi, relativi principalmente all'intensità incidente del fascio laser di eccitazione e alla temperatura operativa del fosforo remoto. Dal punto di vista di applicazione pratica queste condizioni si traducono nei seguenti requisiti nella progettazione di un sistema di illuminazione LARP:

- garantire un'incidenza del fascio laser con sufficiente defocalizzazione sulla superficie dei fosfori, soprattutto nel caso di elevate potenze ottiche, in modo da evitare un'intensità del fascio troppo elevata e un conseguente calo di luminescenza nel caso di operazione;

- prevedere una buona dissipazione del calore dei fosfori eccitati in modo da evitare un loro surriscaldamento che provocherebbe sia un calo di efficienza di conversione sia un degrado a lungo termine.

Se la realizzazione di un sistema LARP tiene conto di queste problematiche, la sua durata di vita operativa può essere caratterizzata rispetto al comportamento di degrado noto dei fosfori remoti e del diodo laser che lo compongono. Tuttavia, i requisiti esposti non sono banali da soddisfare, soprattutto se si desidera ottimizzare l'efficienza e le caratteristiche luminose del sistema pratico.

Capitolo 3

Elettronica di controllo

3.1 Controllo del laser via microcontrollore

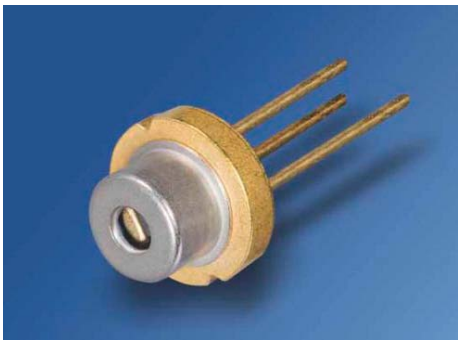
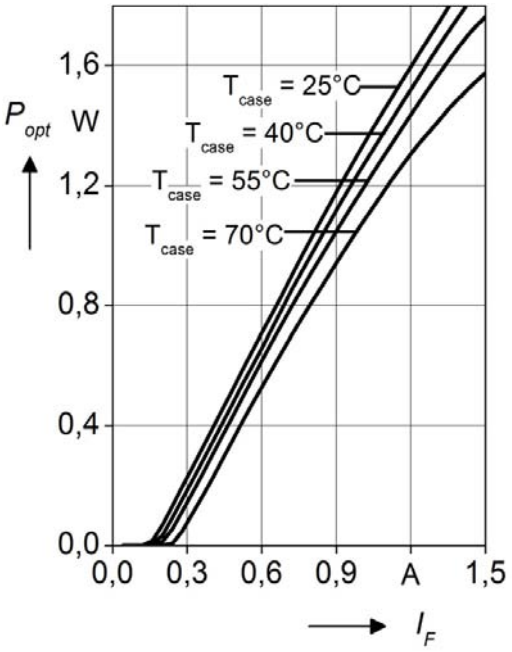
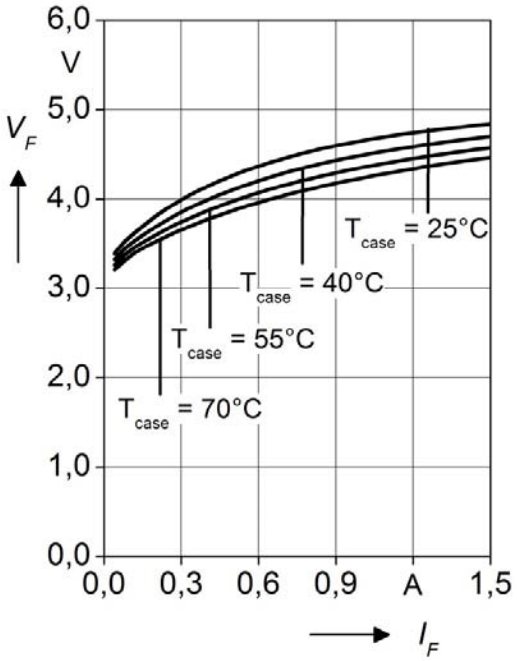


Figura 3.1: Diodo laser PL TB450B di Osram [26].

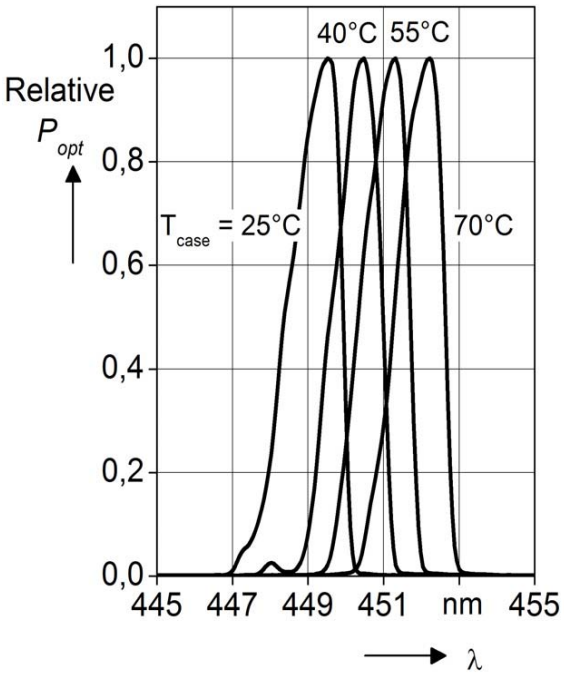
Come osservato nel capitolo 1, il diodo laser è un dispositivo che richiede un sistema ausiliario di controllo per fornire una precisa potenza ottica ad una lunghezza d'onda costante durante la propria operazione. In effetti, queste proprietà del laser possono subire una significativa variazione indesiderata con l'aumento della temperatura interna del dispositivo e a causa del degrado del chip di semiconduttore. In particolare, il diodo laser PL TB450B di Osram, scelto per l'utilizzo durante questa tesi per via della sua lunghezza d'onda d'emissione adeguata all'eccitazione dei fosfori YAG:Ce^{3+} e per la sua elevata potenza ottica, presenta una dipendenza dalla temperatura dichiarata dal produttore nel datasheet secondo i grafici in Fig. 3.2.



(a) Potenza ottica vs corrente.



(b) Tensione vs corrente.



(c) Potenza ottica relativa vs lunghezza d'onda.

Figura 3.2: Proprietà dipendenti dalla temperatura del diodo laser PL TB450B secondo il suo datasheet [26].

Per mantenere costanti le caratteristiche di emissione e di funzionamento, il controllo di un diodo laser in laboratorio viene effettuato tipicamente da strumenti appositi, come il controllore ITC4005 di Thorlabs, descritto nel capitolo 2.

Il requisito fondamentale per il funzionamento di un diodo laser è la presenza di una sorgente che fornisca al diodo laser la corrente di iniezione desiderata. Questa sorgente di alimentazione deve essere stabile e senza picchi di tensione o corrente che possono danneggiare irrimediabilmente il dispositivo. Deve inoltre essere presente un sistema di dissipazione termica, attivo o passivo, che mantenga la temperatura di giunzione del dispositivo entro livelli accettabili.

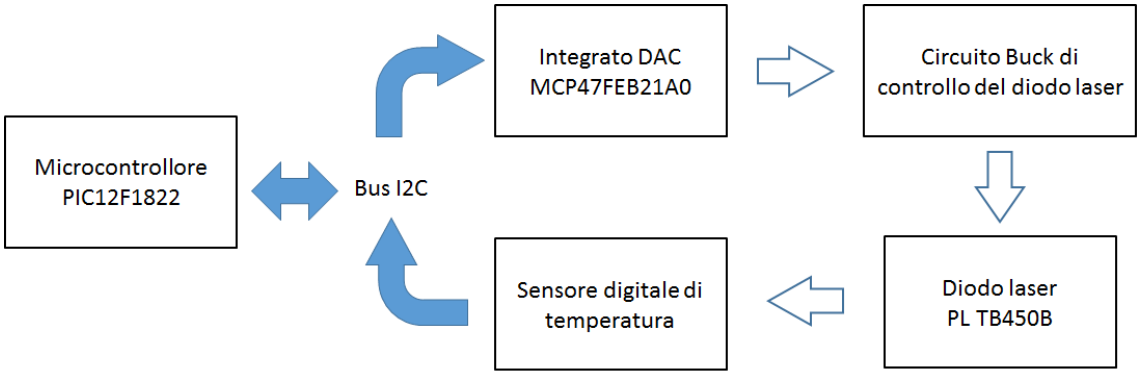


Figura 3.3: Schema a blocchi del sistema elettronico di controllo per il diodo laser progettato durante il lavoro di tesi.

Poiché l'obbiettivo prefissato di questa tesi è quello di progettare un prototipo di sistema di illuminazione *stand-alone*, è stato deciso di progettare e realizzare un sistema integrato di elettronica di controllo capace di fornire un'alimentazione regolata al diodo laser e con la possibilità di sfruttare il feedback della temperatura del dispositivo per mantenerne un'emissione stabile. Il sistema elettronico realizzato (schematizzato in Fig. 3.3) include un microcontrollore PIC che comanda un circuito di regolazione di corrente di tipo buck basato su un controllore integrato TPS9264 di Texas Instruments. Il microcontrollore è stato programmato per comunicare tramite il protocollo I2C con un sensore di temperatura, posto in prossimità del diodo laser, e con un convertitore DAC, utilizzato per inviare il segnale analogico di comando al circuito regolatore di corrente. Infine, utilizzando il software Cadence è stata progettata una *printed circuit board* (PCB) per l'integrazione dei componenti elettronici e la loro connessione ad un'alimentazione esterna nel prototipo di sistema LARP. Un circuito apposito fornisce una tensione di 12 V al circuito Buck e 5 V a tutti gli altri elementi dello schema a blocchi elettrico a partire da una tensione

PIC12F1822	
Oscillatore interno	32 MHz
Memoria Flash	3.5 KB
Memoria RAM	128 Byte
Tensione operativa	1.8 - 5.5 V
ADC interno	10 bit
Numero pin	8
Comunicazione digitale	UART, SPI, I2C, MSSP

Tabella 3.1: Principali caratteristiche del microcontrollore utilizzato [21].

di 24 V, convertibile dall'alimentazione della rete pubblica tramite un alimentatore commerciale.

Il microcontrollore adottato, PIC12F1822, presenta le caratteristiche adatte ad assumere in modo semplice e affidabile il ruolo richiesto all'interno del sistema elettronico di controllo (Tab. 3.1), ossia quello di attivare un adeguato segnale di comando al circuito di regolazione di corrente con una memoria operativa sufficiente per elaborare gli eventuali dati del sensore di temperatura o degli input dell'utente. Poiché il controllore TPS92640 del circuito driver di corrente del diodo laser richiede un segnale di comando analogico, è stato utilizzato un convertitore DAC integrato esterno MCP47FEB21A0 a 12 bit. Il microcontrollore è stato quindi programmato per trasferire al DAC il valore digitale corrispondente al segnale di comando analogico che si desidera fornire all'integrato TPS92640 per il controllo della corrente. Per comunicare al microcontrollore la temperatura del diodo laser è stato previsto un sensore digitale MCP9808 con risoluzione di 0.5°C nell'intervallo da -20°C a +100°C.

Infine, il circuito elettrico relativo al microcontrollore prevede l'intervento dell'utente per regolare l'accensione/spegnimento del sistema e la regolazione manuale dell'intensità del fascio di illuminazione grazie all'azionamento di un pulsante e di un potenziometro, i quali vengono monitorati direttamente dal microcontrollore tramite i suoi pin di ingresso analogici.

3.1.1 Protocollo I2C

Per effettuare la comunicazione di dati tra microcontrollore, DAC e sensore di temperatura è stata adottata una connessione con protocollo I2C. Tale metodo di comunicazione, semplice e affidabile, è supportato dai suddetti elementi elettronici e prevede l'utilizzo di sole due linee di connessione. Il protocollo I2C (pronunciato anche "i-quadro-c"), il cui nome sta per *Inter-Integrated Circuit*, fu inventato da Philips Semiconductor (oggi NXP Semiconductors), e si basa sulla comunicazione seriale tra

multipli master e slave. Esso viene tipicamente impiegato per la comunicazione a basse velocità (0.1, 0.4, 1, 3.4 o 5 Mbit/s, a seconda della modalità selezionata) tra periferiche e processori o microcontrollori per brevi distanze (per esempio su una stessa PCB) [24]. I vantaggi di questo protocollo comprendono:

- l'utilizzo di sole due uscite per i segnali di comunicazione, con la possibilità di collegare numerose periferiche ad un unico bus, permette di minimizzare le interconnessioni e il numero dei pin utilizzati negli IC, ottenendo complessivamente schede elettroniche più piccole ed economiche;
- nessuna necessità di interfaccia esterna con il bus, in quanto l'interfaccia I2C è spesso integrata internamente nel chip;
- la facilità nell'aggiungere o rimuovere ulteriori periferiche in tempi successivi alla progettazione iniziale;
- la possibilità di controllo via software del protocollo di indirizzamento e di trasmissione dei dati.

Inoltre, sul mercato sono ormai ampiamente diffuse numerose periferiche e microprocessori compatibili con il protocollo I2C, che presentano un basso consumo di corrente, una bassa sensibilità al rumore e un ampio intervallo di tensioni e temperature operative.

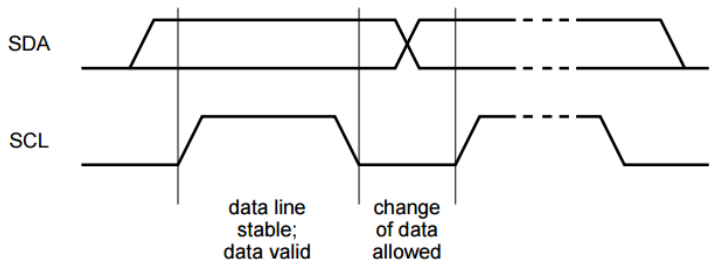


Figura 3.4: Trasferimento di un bit via bus I2C [24].

Il bus I2C utilizza due linee digitali SDA e SCL, corrispondenti rispettivamente a segnali seriali di dati e di clock. Entrambe le linee sono bidirezionali e devono essere collegate a una tensione di alimentazione positiva tramite resistori di pull-up, in modo che in situazione di bus libero esse si trovino entrambe a livello logico alto (HIGH). Infatti, a differenza dei protocolli UART o SPI, i driver del bus I2C sono di tipo open-drain, ossia essi sono capaci di forzare il corrispondente segnale al livello

logico basso (LOW), ma non di riportarlo a livello HIGH. In questo modo viene eliminata la possibilità che si verifichi una situazione in cui due dispositivi cercano di forzare una linea a due diversi livelli logici, condizione che può causare danni o un'eccessiva dissipazione di potenza nel sistema. La trasmissione di dati avviene tramite il cambio di livello logico della linea SDA, permesso solo quando SCL è al livello LOW. Di conseguenza, ogni impulso di clock permette la trasmissione di un singolo bit di dati (Fig. 3.4).

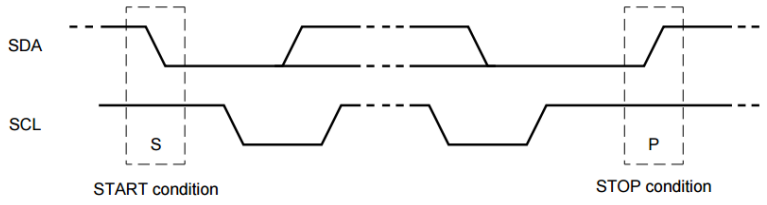


Figura 3.5: Segnali di START e di STOP del protocollo I2C inviati dal dispositivo master per iniziare o terminare la comunicazione [24].

Nel caso più semplice di un singolo dispositivo master che gestisce il bus I2C, è proprio il master a iniziare e a terminare la comunicazione grazie ai specifici segnali START e STOP. Per inviare lo START il dispositivo master mantiene SCL a livello HIGH e forza SDA a LOW. A quel punto tutto i dispositivi slave collegati sul bus si mettono in attesa di una trasmissione. Il segnale di STOP consiste invece nel passaggio da LOW a HIGH di SDA nell'immediato seguito a una transizione da LOW a HIGH di SCL. Nel caso di più dispositivi master, è possibile inviare uno START ripetuto per impedire che altri master diano inizio a una trasmissione indesiderata [35].

Il resto della comunicazione I2C consiste nello scambio di due tipi di frame di 8 bit: quelli di indirizzo e quelli di dati. Con il frame di indirizzo il master indica con quale dispositivo si desidera comunicare (i primi 7 bit del frame corrispondono all'indirizzo I2C del dispostivio slave, in ordine MSB) e quale operazione si desidera effettuare su quel dispositivo (un bit di Read/Write, con valore di 1 per la lettura e 0 per la scrittura); il frame di indirizzo viene inviato sempre subito dopo il segnale di START. Alcuni dispositivi utilizzano un indirizzo a 10 bit: in quel caso sono richiesti due frame di indirizzo, in cui il primo ha la forma 11110bb, in cui 'bb' sono i due bit più significativi dell'indirizzo di 10 bit, (la parte iniziale '11110' non è compatibile con nessun indirizzo possibile a 7-bit); il frame successivo è nuovamente di indirizzo e contiene gli 8 bit restanti dell'indirizzo a 10 bit.

Il nono bit dei frame di indirizzo e di dati è un bit di *acknowledge* ACK/NACK. Una volta che gli 8 bit precedenti sono stati inviati dal dispositivo trasmittente, il controllo della linea SDA viene lasciato al dispositivo ricevente, il quale può forzare la linea a livello basso per confermare di essere il destinatario del messaggio inviato e di aver ricevuto correttamente il byte. Nel caso in cui la linea rimanga a livello alto fino all'impulso di clock successivo, il dispositivo in attesa della risposta deduce che la trasmissione non è andata a buon fine e può comportarsi di conseguenza.

I frame di dati vengono inviati dopo il frame di indirizzo. In questo caso il master mantiene il controllo della linea SCL e i dati vengono inviati, in riferimento a questo clock, sulla linea SDA dal master o dal slave a seconda che l'operazione richiesta nel frame di indirizzo fosse di lettura o di scrittura. Il numero di frame di dati è indefinito: finché il master non invia il segnale di stop il dispositivo slave continua a inviare i dati, tipicamente secondo la successione dei byte nella memoria interna.

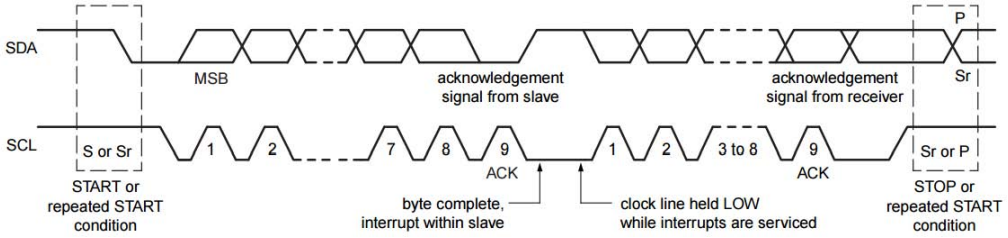


Figura 3.6: Sequenza di trasferimento di frame di bit via bus I2C [24].

Per effettuare la lettura o la scrittura di valori o impostazioni in una periferica è necessaria innanzitutto una sequenza di messaggi di scrittura da parte del master per indicare al dispositivo slave indirizzato a quale registro accedere e quale operazione effettuare. Tipicamente il primo frame di dati inviato dal master è di scrittura e contiene l'indirizzo del registro al quale si vuole accedere assieme al comando (caratteristico della periferica) corrispondente all'azione che si vuole eseguire sul registro. Il secondo messaggio (frame di indirizzo con frame di dati) può allora contenere i dati da scrivere o leggere dal registro in uno o più frame di dati. Nel caso dei dispositivi utilizzati in questo sistema elettronico, questi processi di comunicazione sono dettagliati di seguito.

Il microcontrollore PIC12F1822 supporta il protocollo I2C e prevede dei registri specifici per impostare i parametri della comunicazione e per inviare i dati senza che il programmatore debba gestire la temporizzazione dei singoli bit sulle linee di comunicazione. Il PIC è stato quindi programmato in linguaggio C con l'ambiente di sviluppo MPLAB X IDE creando delle funzioni apposite per l'invio dei bit di START,

STOP, ACK o NACK, e dei frame di indirizzo e di dati, attraverso le modifiche dei registri del PIC quali ad esempio SSPCON2 per la gestione della comunicazione e l'invio dei bit del protocollo, o SSPBUF, il registro buffer nel quale viene scritto il byte inviato o ricevuto sulla linea SDA. La comunicazione I2C viene configurata all'accensione del microcontrollore con una velocità di 100 kHz.

3.1.2 Comunicazione con il DAC

L'indirizzo I2C e gli indirizzi dei registri più importanti del modello di convertitore MCP47FEBXXA0 sono illustrati in Tabella 3.2. Oltre al registro di output che viene modificato ripetutamente scrivendovi il valore digitale da convertire in segnale analogico in uscita, i registri di configurazione vengono scritti all'avvio del microcontrollore in modo da impostare adeguatamente il dispositivo DAC. Infatti, il DAC

DAC MCP47FEB21A0	
Indirizzo I2C a 7 bit	0b1100000
Output register DAC0	0x00
Gain register	0x0A
Voltage reference control register VREF	0x08

Tabella 3.2: Principali registri del DAC utilizzati, con i rispettivi indirizzi [19].

converte il valore digitale scritto nel registro di output DAC0 in tensione analogica in uscita secondo la seguente formula:

$$V_{OUT} = \frac{V_{RL} \times \text{valore di DAC0}}{\text{\# di resistori nella } \textit{resistor ladder}} \times \text{Gain} \tag{3.1}$$

dove il numero di resistori per i modelli MCP47FEB2X vale 4096, V_{RL} è la tensione di riferimento indicata dal registro VREF, e Gain è il guadagno indicato dal relativo registro. Il microcontrollore è stato programmato in modo da impostare i registri di configurazione, effettuando la scrittura di appositi valori tramite il protocollo I2C, in modo che come tensione di riferimento venga selezionato il riferimento a band-gap interno, pari a 1.22 V, e che il guadagno venga impostato al valore 2. In questo modo, la tensione massima, corrispondente al massimo valore 0xFFF (4095 in base decimale) del registro a 12 bit DAC0, vale

$$V_{OUTmax} = \frac{1.22 \times 4095}{4096} \times 2 = 2.44\text{V} \tag{3.2}$$

Tale valore è adatto per il segnale di comando dell'integrato TPS9264 che richiede un segnale analogico di ampiezza tra 0 e 2.54 V.

La sequenza di comunicazione sul bus I2C tra il microcontrollore e il DAC per scrivere un dato in un determinato registro è la seguente:

PIC – bit START
PIC – frame di indirizzo:
indirizzo I2C del dispositivo (1100000) +
comando Write (0)
DAC – bit ACK di risposta
PIC – frame di dati:
indirizzo del registro (5 bit LSB) +
codice del comando di scrittura nel registro (00) +
bit riservato (x)
DAC – bit ACK di risposta
PIC – frame di dati:
primo byte
DAC – bit ACK di risposta
PIC – frame di dati:
secondo byte
DAC – bit ACK di risposta
PIC – bit STOP

Va ricordato che, trattandosi di un dispositivo a 12 bit, il valore dei registri è composto da 12 bit; di conseguenza, l'invio di un dato da scrivere in memoria comporta prima l'invio di un byte con i 4 bit MSB del dato e successivamente l'invio degli 8 bit restanti.

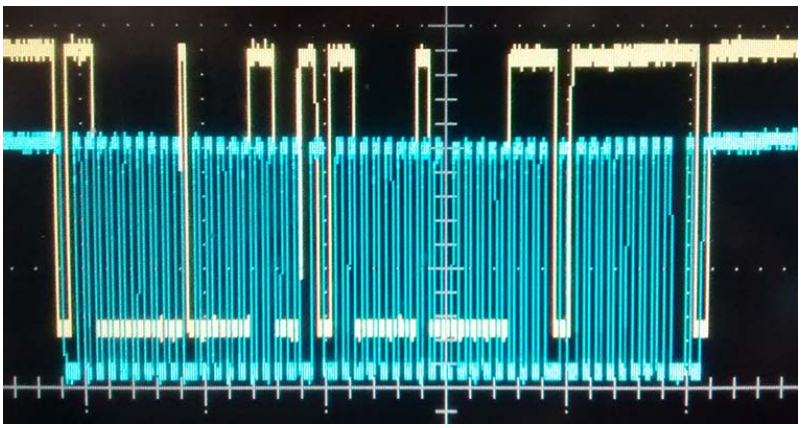


Figura 3.7: Segnali delle linee SCL (in azzurro) e SDA (in giallo) durante il collaudo della trasmissione I2C tra il microcontrollore e il DAC.

3.1.3 Comunicazione con il sensore di temperatura

Sensore MCP9808	
Indirizzo I2C a 7 bit	0b0011000
Ambient temperature register T_A	0x05

Tabella 3.3: Principali registri del sensore di temperatura [20].

La comunicazione con il sensore di temperatura tramite il protocollo I2C avviene in modo analogo alla comunicazione con il DAC. In questo caso è sufficiente eseguire la lettura del registro di temperatura ambiente nell'integrato, in quanto le impostazioni di default, ad esempio riguardo la risoluzione in temperatura, sono adeguate per il funzionamento richiesto.

Poiché il registro T_A della temperatura rilevata è un registro a 16 bit, durante la comunicazione vengono letti prima il byte superiore (bit 15-8) e poi quello inferiore (bit 7-0) di tale registro. I bit 15-13 di tale registro servono a indicare il superamento di determinate temperature critiche che possono essere impostate in specifici registri, mentre il bit 12 rappresenta il segno della temperatura. Per ottenere il valore effettivo di temperatura dai dati digitali di questo registro è necessario eseguire la conversione in gradi Celsius seguendo le indicazioni del datasheet:

Se $\mathrm{T_A} \geq 0$ °C, $\quad T_A = (\text{Byte superiore} \times 2^4 + \text{Byte inferiore} \times 2^{-4})$

Se $\mathrm{T_A} < 0$ °C, $\quad T_A = 256 - (\text{Byte superiore} \times 2^4 + \text{Byte inferiore} \times 2^{-4})$

Il sensore della temperatura integrato può quindi informare il microcontrollore riguardo alle variazioni termiche del diodo laser, nel momento in cui il sensore sia posizionato sufficientemente vicino.

3.2 Controllo di corrente del diodo laser

Il circuito di controllo adottato per la regolazione della corrente del diodo laser consiste in una topologia buck (ossia con una conversione di tensione DC-DC da un valore più alto a uno più basso) in cui il ruolo di controllore della corrente è svolto da un circuito integrato TPS92640 di Texas Instruments. Tale componente, capace di adeguarsi ad un ampio intervallo di tensioni operative, è infatti in grado di comandare in modo sincrono i transistor N-MOSFET del circuito esterno in funzione della corrente fornita ad una serie di diodi LED o laser con un'elevata efficienza. Il controller permette inoltre di mantenere una corrente, stabile e precisa fino a 5 A.

Grazie ad un ingresso PWM oppure analogico è possibile variare in modo uniforme la corrente di uscita, e quindi la luminosità dei dispositivi optoelettronici alimentati [38]. Inoltre, tale dispositivo effettua un controllo basato sul picco inferiore della corrente (*valley current control*) con un'architettura per il controllo del tempo di accensione degli n-FET tale da operare ad una frequenza di commutazione quasi costante e da non necessitare della compensazione (*slope compensation*) per evitare le instabilità che possono verificarsi utilizzando altri metodi di sensing.

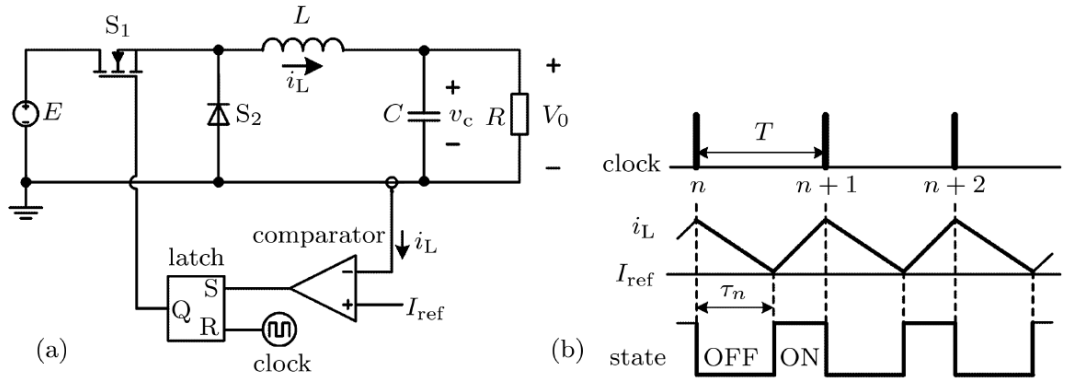


Figura 3.8: Modello di funzionamento di un convertitore buck con *valley current control*: a) circuito schematico; b) forme d'onda operative [13].

Il principio di funzionamento di un convertitore buck con controllo del picco inferiore di corrente è rappresentato in Fig. 3.8. Nella sua versione più semplificata, esso si basa su un processo di carica e scarica di un induttore comandato da uno switch S1 e un diodo S2; l'integrato TPS92640 comanda invece una versione sincrona con due switch, in cui uno switch svolge il ruolo del diodo della versione illustrata. Durante un intervallo detto T_{ON} lo switch S1 è acceso e S2 è spento, facendo in modo che la tensione positiva costante $(V_{in} - V_{out})$ ai capi dell'induttore L ne faccia crescere linearmente la corrente i_L. Durante un successivo intervallo di tempo T_{OFF}, S1 è spento e S2 è acceso: la tensione ai capi di L, pari a $-V_{out}$, fa decrescere la corrente dell'induttore. Il tempo totale $T = T_{ON} + T_{OFF}$ definisce la frequenza di commutazione del sistema.

A regime, in condizioni stazionarie (*steady-state*), il bilancio energetico del sistema impone idealmente la condizione

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{3.3}$$

quindi, poiché $D < 1$, si ha che $V_{out} < V_{in}$. Nella pratica, tuttavia, vale

$$D = \frac{V_{out}}{\eta \times V_{in}} \tag{3.4}$$

dove η è l'efficienza del sistema. Inoltre, il legame tra la corrente media dell'induttore $\overline{i_L}$ e la corrente di uscita I_o si trova applicando l'operatore di media in condizioni *steady-state* al nodo di uscita:

$$\overline{i_L} = \overline{i_C} + I_o = I_o \tag{3.5}$$

in quanto la corrente media sul condensatore $\overline{i_C} = 0$. Di conseguenza, regolando la corrente $i_L(t)$ è possibile controllare la corrente che scorre nei dispositivi optoelettronici connessi all'uscita del circuito.

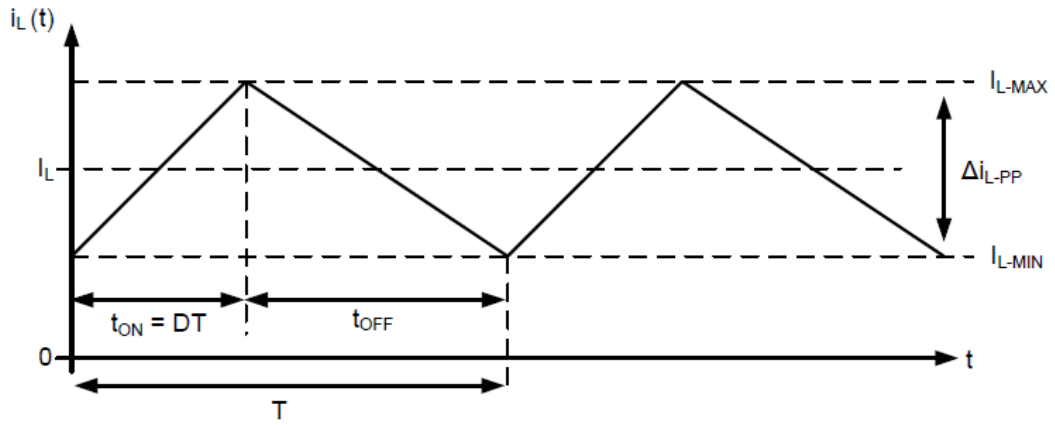


Figura 3.9: Forma d'onda ideale della corrente dell'induttore di una topologia buck in conduzione continua [38].

Il controllo della corrente in questa topologia avviene rispetto al valore i_{L-MIN}, ossia dove $i_L(t)$ è minima: ciò avviene confrontando $i_L(t)$ con un apposito valore di riferimento I_{ref}; quando la corrente dell'induttore raggiunge il livello di rifermento, il controllore inverte gli stati di S1 e S2 passando da T_{OFF} a T_{ON}. Quindi, basandosi sul valore del ripple di corrente $\Delta i_{L-PP} = I_{L-MAX} - I_{L-MIN}$, determinato dai parametri del circuito, il controllore è in grado di ottenere un determinato valore $\overline{i_L} = I_{Lmin} + \Delta I_{L-PP}/2$ (Fig. 3.9).

3.2.1 Dimensionamento

Il datasheet del circuito integrato riporta lo schema di un tipico circuito di controllo di un LED basato sull'integrato TPS92640 (Fig. 3.10). Il circuito include, oltre all'induttore L e ai due transistor Q_{HS} e Q_{LS} (corrispondenti rispettivamente a $S1$ e $S2$ dello schema in Figura 3.8), anche diversi componenti elettronici con funzioni utili all'inizializzazione o alla fase operativa del controllore. Lo stesso schema elettrico è implementato sulla scheda modulare di valutazione TPS92641EVM, la quale è stata utilizzata in laboratorio in fase di test della programmazione del microcontrollore. Tuttavia, la scheda di valutazione è progettata per comandare una serie di 10 LED a una corrente di 1 A, necessitando di un'alimentazione con tensioni tra 43 e 53 V. È stato quindi preferibile realizzare un circuito dimensionato appositamente per il funzionamento del singolo diodo laser con una tensione di alimentazione ridotta (12V).

Il dimensionamento del circuito segue le indicazioni del datasheet dell'integrato TPS9264x basandosi sulla scelta di specifiche in Tabella 3.4. Le resistenze R_{VOUT1} e R_{VOUT2} formano un partitore resistivo che fornisce all'integrato un segnale di

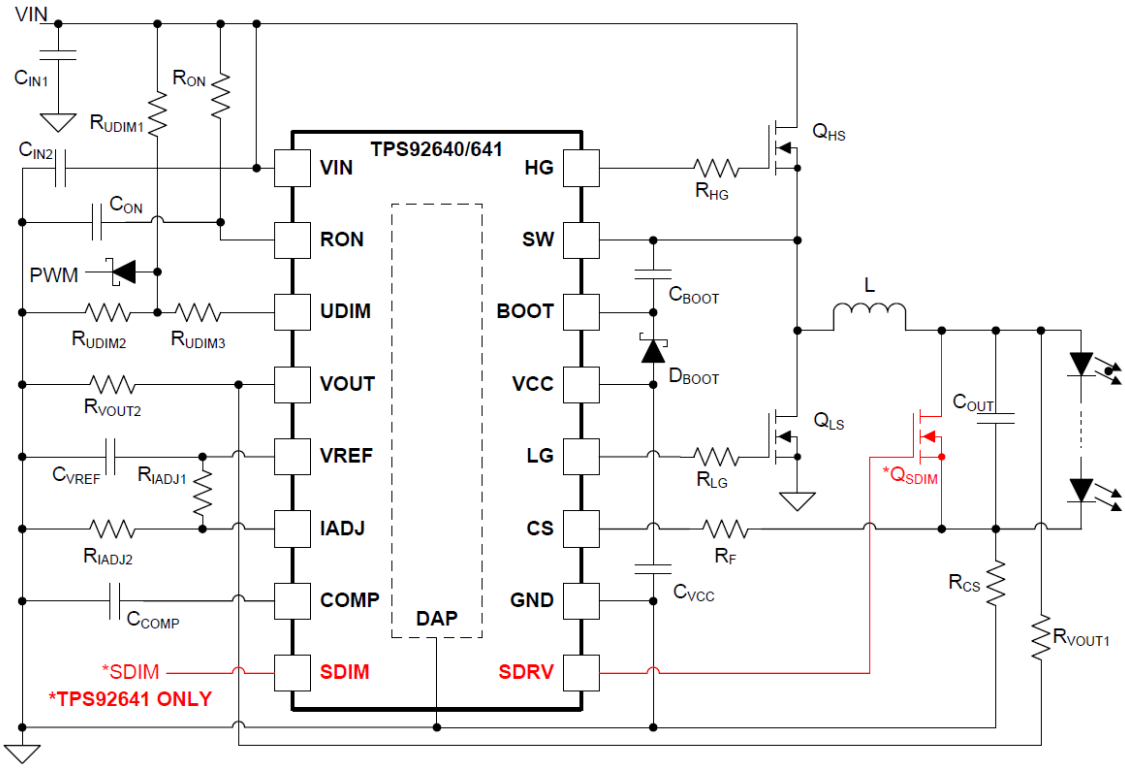


Figura 3.10: Schema di un driver buck sincrono per LED basato su un integrato TPS92640 [38].

Specifiche operative		
Tensione in ingresso	V_{in-max}	14 V
	V_{in}	12 V
	V_{in-min}	10 V
Tensione massima LD	V_{LASER}	7 V
Corrente massima LD	I_{LASER}	1 A
Massimo ripple LD	Δi_{L-PP}	10 mA
Tensione di accensione	$V_{TURN-ON}$	5 V
Efficienza stimata	η	90%
Frequenza di commutazione	f_{SW}	500 kHz
Resistenza interna stimata LD	r_D	1 Ω

Tabella 3.4: Specifiche utilizzate per il dimensionamento del circuito di controllo del diodo laser.

feedback di circa 2.5 V per la tensione di uscita:

$$V_{OUT} \times \frac{R_{VOUT2}}{R_{VOUT1} + R_{VOUT2}} = 2.5 \text{ V} \tag{3.6}$$

dove la tensione di uscita del circuito è data dalla tensione operativa massima del laser e dalla caduta di tensione dovuta alla presenza del resistore di sensing della corrente,

$$V_{OUT} = V_{LASER} + I_{LASER} \times R_{CS} \tag{3.7}$$

Scegliendo dei valori standard di $R_{CS} = 0.2\Omega$ e $R_{VOUT2} = 10k\Omega$, si ricava un valore di $R_{VOUT1} = 18k\Omega$.

Il tempo $T_{ON} = DT$ di carica dell'induttore è determinato da R_{ON} (connesso tra i pin RON e VIN dell'integrato) e C_{ON} (connesso tra i pin RON e GND): in questo modo la tensione in ingresso e R_{ON} impostano la corrente che scorre in C_{ON}, il quale comanda la pendenza della rampa di corrente attraverso il pin RON. La soglia della rampa di corrente è proporzionale alla frazione di feedback della tensione di uscita V_{OUT} ottenuta dal partitore resistivo formato da R_{VOUT1} e R_{VOUT2}. Tenendo conto di queste condizioni, si ottiene la seguente equazione della frequenza di commutazione f_{SW} dal reciproco di $T = T_{ON} + T_{OFF}$:

$$f_{SW} = \frac{\frac{R_{VOUT1}+R_{VOUT2}}{R_{VOUT2}}}{R_{ON} \times C_{ON}} \tag{3.8}$$

Per avere una frequenza tipica di $f_{SW} = 500kHz$ con un valore $C_{ON} = 1nF$, i calcoli forniscono un valore di $R_{ON} = 5.6k\Omega$.

Il legame tra il valore dell'induttore L e Δi_{L-PP} è il seguente:

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \times D}{\Delta i_{L-PP} \times f_{SW}} \tag{3.9}$$

con

$$D = \frac{V_{OUT}}{\eta \times V_{IN}} \tag{3.10}$$

dove però Δi_{L-PP} dipende dalla capacità di uscita,

$$C_{OUT} = \frac{\Delta i_{L-PP}}{8 \times r_D \times \Delta i_{LASER-PP} \times f_{SW}} \tag{3.11}$$

Selezionando un valore di $L = 47\mu H$ con le specifiche elencate sopra si ottiene $C_{OUT} = 3.3\mu F$.

La corrente media del diodo laser connesso in uscita viene regolata da un amplificatore di errore interno all'integrato confrontando la tensione sul resistore di sensing (V_{CS}) con la tensione del pin IADJ divisa per 10:

$$I_{LASER} = \frac{V_{IADJ}}{10 \times R_{CS}} \tag{3.12}$$

La tensione massima di IADJ ammessa è 2.54 V; variando la tensione in ingresso a questo pin si può regolare il punto di riferimento della corrente in uscita del circuito.

I resistori R_{UDIM1}, R_{UDIM2} e R_{UDIM3} permettono di determinare la finestra di isteresi per l'accensione operativa del circuito, secondo le equazioni

$$R_{UDIM1} = \frac{1.276V \times R_{UDIM1}}{V_{TURN-ON} - 1.276V} \tag{3.13}$$

$$R_{UDIM3} = \frac{\left(\frac{V_{HYS}}{21\mu A} - R_{UDIM1}\right) \times R_{UDIM2}}{R_{UDIM1} + R_{UDIM2}} \tag{3.14}$$

Selezionando un valore di $R_{UDIM1} = 100k\Omega$ si ottengono dei valori di resistori standard $R_{UDIM2} = 33k\Omega$ e $R_{UDIM3} = 150k\Omega$.

Infine, secondo le indicazioni del datasheet, i transistor presenti devono tollerare uno stress minimo in tensione e corrente pari a

$$V_{T-MAX} = 1.2 \times V_{IN-MAX} \tag{3.15}$$

$$I_{T-MAX} = 1.5 \times D_{MAX} \times I_{LASER} \tag{3.16}$$

3.3 Realizzazione della PCB

L'intero sistema elettronico è stato integrato su un'apposita scheda PCB disegnata per ospitare i circuiti e i componenti elettronici relativi al microcontrollore, DAC e al controllo di corrente. Inoltre, sono stati inclusi un pulsante e un potenziometro per permettere all'utente di intervenire sul sistema in modo semplice, grazie alla possibilità di spegnere/accendere il sistema e di variare l'intensità della corrente del diodo laser, e quindi della luce in uscita dal sistema di illuminazione.

Per l'alimentazione dei componenti è stato utilizzato un regolatore RECOM R-7812-0.5 che permette di convertire una tensione di 24 V verso i 12 V utilizzati dal circuito buck con un'efficienza del 97%; questi 24 V si possono ottenere facilmente dalla rete elettrica con un comune alimentatore. La tensione di alimentazione di 5 V del microcontrollore e del DAC viene invece ottenuta dai 12 V disponibili con un regolatore lineare MC7805.

Il *layout* della scheda elettronica è stato progettato con l'utilizzo del software Cadence. A questo scopo, è stato innanzitutto disegnato lo schema delle connessioni elettriche (Fig. 3.12), riportando la configurazione dei pin degli integrati PIC 12F1822, DAC MCP47FEB21A0 e controllore buck TPS92641, secondo i rispettivi datasheet. Per realizzare il layout elettrico della PCB a partire da questo schema, ad ogni simbolo elettrico è stato associato il layout geometrico dei *pad* per i componenti di tipo SMD e dei *pin* per i componenti *through-hole*, a seconda del relativo modello di componente utilizzato. Mentre per alcuni componenti il layout geometrico è standard (come ad esempio il formato 1206 delle resistenze e condensatori), per altri componenti è stato necessario disegnare manualmente la disposizione dei pad o dei pin seguendo le dimensioni indicate nei datasheet.

Successivamente, il layout della PCB è stato creato disponendo i simboli dei componenti elettronici e disegnando le interconnessioni. La scheda elettronica progettata contiene due lati (*TOP* e *BOTTOM*). Tutti i componenti, inclusi i terminali necessari per le connessioni esterne di strumenti di alimentazione e test, sono stati posizionati sul lato frontale, TOP. Lo spessore delle linee di connessione dedicate all'alimentazione e a correnti importanti sono state rese più larghe per ridurre la dissipazione resistiva lungo queste linee. La disposizione dei componenti relativi al circuito buck tiene conto della necessità di minimizzare gli effetti di interferenza elettromagnetica al suo interno. A questo scopo, è necessario minimizzare i loop di correnti di segnali, posizionando i componenti passivi vicino all'integrato TPS92641, e i loop di potenza con correnti discontinue, relative alla commutazione

dei due NFET. Inoltre, un piano di massa posto al di sotto di questo circuito (lato BOTTOM) permette di ridurre l'accoppiamento del rumore nel circuito. Un unico piano di massa esteso su entrambi i lati della PCB garantisce inoltre un punto di riferimento di massa uguale per tutti i componenti, facilitando allo stesso tempo alcune delle interconnessioni.

Generati i file gerber del layout, una fresatrice automatica ProtoMat S62 ha realizzato il circuito stampato, effettuando le perforazioni necessarie. In seguito, i componenti SMD sono stati installati sulla PCB ponendo manualmente la pasta saldante sui relativi pad manualmente, collocando i componenti, ed esponendoli ad un adeguato profilo di temperatura in un apposito forno per saldatura SMD. I componenti THT restanti, assieme ai via, sono stati poi saldati manualmente.

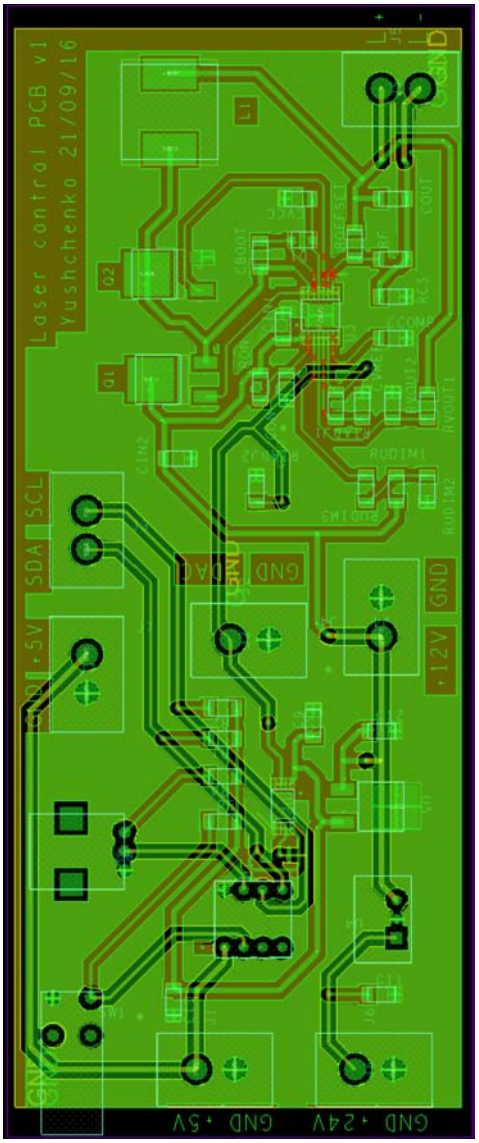


Figura 3.11: Layout della PCB progettata con il software Cadence (scala 1:1).

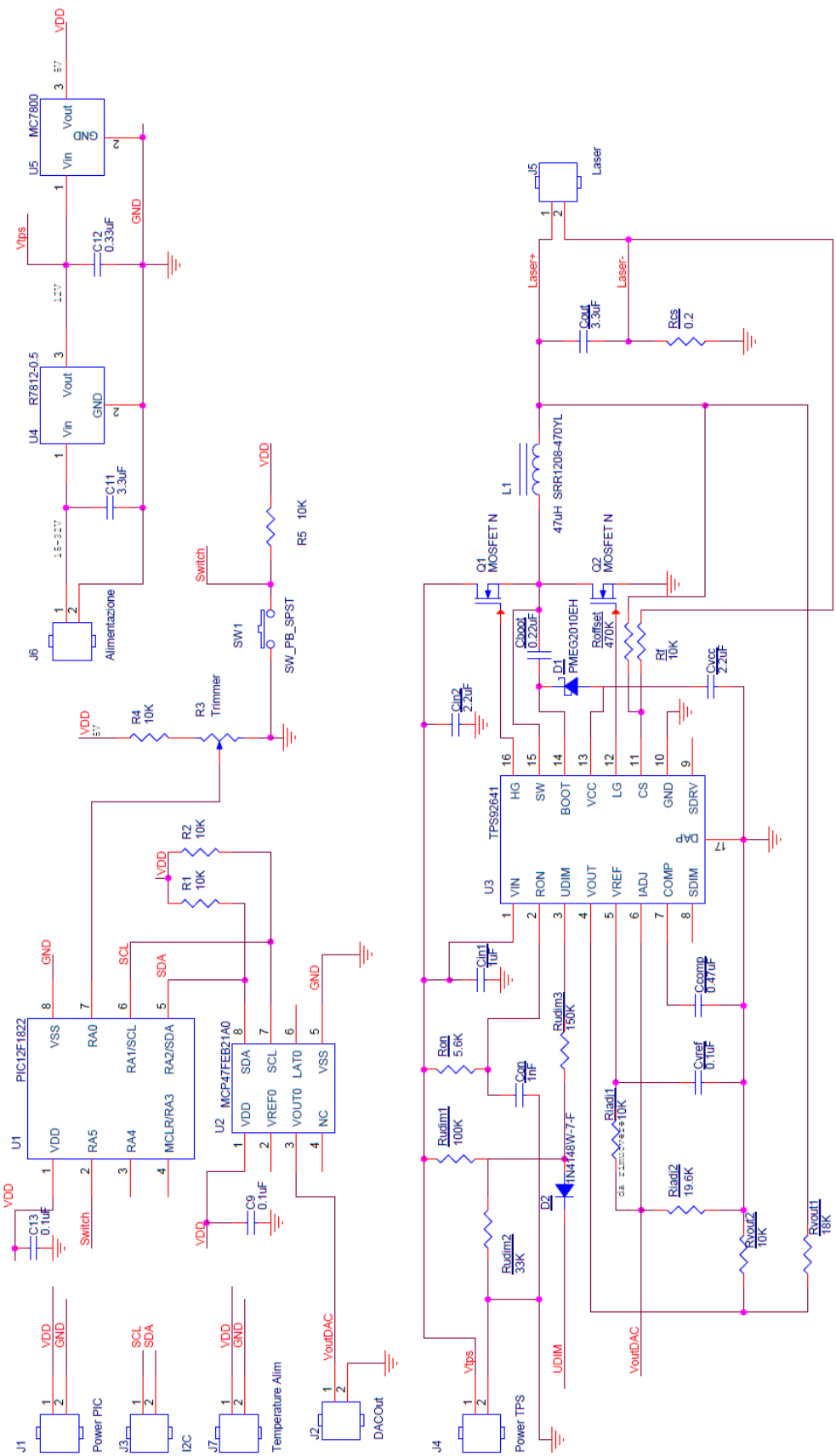


Figura 3.12: Schema elettrico della PCB per il controllo del laser progettata con il software Cadence.

3.4 Considerazioni

I test di collaudo della PCB hanno dimostrato che la comunicazione I2C implementata per questa scheda funziona correttamente, quindi il microcontrollore elabora correttamente l'input del potenziometro e il DAC converte un corretto segnale di comando del circuito di controllo di corrente in seguito alla ricezione dei dati inviati dal PIC. Inoltre, il circuito svolge correttamente il suo ruolo di fornire una corrente al diodo laser, con variazione lineare tra lo zero e il valore massimo, in funzione del segnale analogico ricevuto dal DAC.

Nella pratica è stato osservato che la corrente massima che il circuito riesce a fornire al diodo laser è di circa 260 mA, la quale permette di verificare il funzionamento del prototipi LARP realizzati in condizioni operative sopra la soglia del diodo laser. Tuttavia, tale valore non rispetta la specifica desiderata. Questo problema può essere legato al dimensionamento dei componenti del circuito di controllo dell'integrato TPS92641, oppure alla scelta della tensione di alimentazione del circuito. Ulteriori investigazioni sono previste in questa direzione al fine di ottimizzare la PCB per raggiungere un funzionamento ad alte prestazioni del sistema LARP.

Inoltre, è prevista l'integrazione di un sensore di temperatura per poter variare automaticamente la corrente di iniezione in seguito all'autoriscaldamento del dispositivo. Tuttavia, il design del supporto e del dissipatore del diodo laser (descritti nel capitolo successivo), assieme ad alcuni elementi optomeccanici dei prototipi impediscono il posizionamento del sensore in prossimità del laser. Di conseguenza, è necessario analizzare delle soluzioni di progettazione meccanica, assieme alla scelta del sensore di temperatura adeguato, al fine di ottenere l'informazione sulla temperatura della sorgente del sistema.

Infine, una volta risolti questi aspetti critici, è possibile modificare il layout della PCB per renderla più compatta ed adatta all'integrazione in un prototipo LARP stand-alone. A questo scopo, si possono prendere in considerazione gli aspetti ergonomici (posizione del potenziometro e del pulsante di accensione) e pratici (posizione dei connettori per l'alimentazione da rete elettrica) in funzione del design meccanico del corpo del prototipo.

Capitolo 4

Sistema LARP in trasmissione

4.1 Descrizione

Un sistema LARP generico, oltre ad una sorgente laser e un fosforo remoto descritti in precedenza, richiede anche un insieme di componenti opto-meccanici adibiti a manipolare il fascio del laser, e a miscelarlo con l'emissione dei fosfori per ottenere un fascio di illuminazione idealmente uniforme e direzionato: tali elementi comprendono tipicamente lenti, diffusori, beam-splitter e specchi. Inoltre, per garantire un corretto funzionamento del diodo laser e del fosforo remoto, un sistema LARP reale richiede dei metodi di dissipazione del calore finalizzati ad evitare l'eccessivo surriscaldamento di entrambi i componenti. In riferimento a queste necessità pratiche, il proposito di questa tesi è stato quello di realizzare dei setup ottici adatti ad essere caratterizzati e trasformati in un prototipo di sistema reale, effettuando uno studio sperimentale delle configurazioni più semplici di elementi opto-meccanici in combinazione con un diodo laser e un fosforo remoto. Bisogna infatti ricordare che i sistemi LARP possono includere più di un diodo laser (come anche diversi tipi di fosfori): tuttavia, tali soluzioni di solito comportano un maggiore numero di elementi opto-meccanici, un costo e consumo di energia significativamente maggiori e soprattutto maggiori difficoltà di progettazione, la risoluzione delle quali esula dallo scopo di questa tesi.

Avendo prefissato l'impiego di un solo diodo laser, le tipologie di sistemi LARP possibili sono sostanzialmente due (Fig. 4.1): una in cui il fascio del laser attraversa il fosforo remoto, eccitandolo durante un parziale assorbimento, e si miscela con l'emissione dei fosfori per formare la luce in uscita (configurazione in "*trasmissione*"); l'altra in cui la luce da proiettare viene formata nel semispazio di provenienza

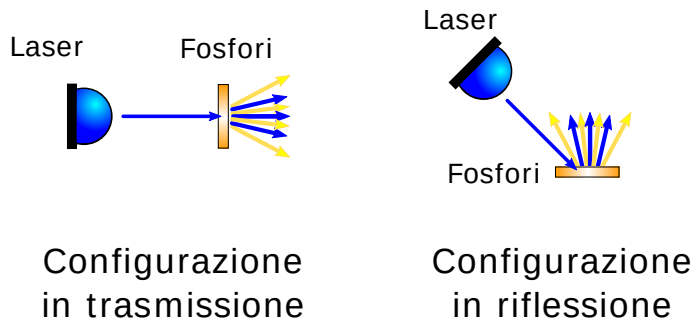


Figura 4.1: Schemi delle due principali configurazioni di sistemi LARP.

del fascio laser, il quale incide sul fosforo remoto, lo eccita parzialmente e viene riflesso sia dalle particelle di fosfori sia dal substrato che li sostiene (configurazione in "*riflessione*"). Su queste due configurazioni si basano i prototipi d'illuminatore realizzati ed analizzati durante questa tesi: il setup in trasmissione viene descritto nel seguito di questo capitolo, mentre il prototipo in riflessione verrà presentato nel capitolo successivo.

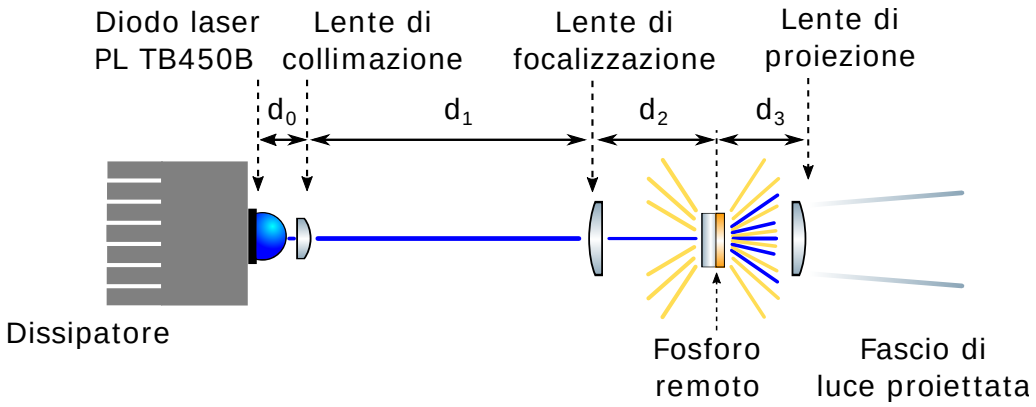
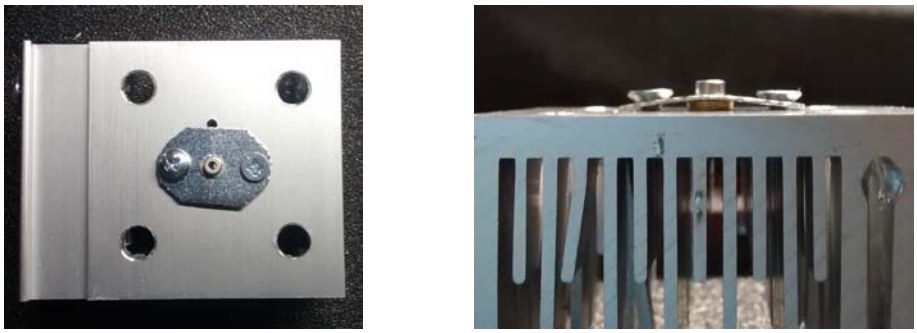


Figura 4.2: Schema del setup ottico "in trasmissione".

Lo schema del setup in trasmissione è rappresentato in Fig. 4.2: esso include, oltre al diodo laser OSRAM PL TB450B, un dissipatore, tre lenti Thorlabs convesse con diverse lunghezze focali, e un fosforo remoto.

4.1.1 Supporto e dissipazione del diodo laser

Per raffreddare il diodo laser durante l'operazione è stato impiegato un dissipatore passivo in alluminio per chipset elettronici FHP08 di Rainbow Components. Il dissipatore, delle dimensioni di 61,8 x 50 x 32,5 mm è stato opportunamente modificato in modo che fosse possibile fissarvi saldamente il diodo laser in una posizione fissa,



(a) **(b)**

Figura 4.3: Dissipatore opportunamente modificato per ospitare il diodo laser, a) vista dall'alto in cui sono visibili la lastra di fissaggio del diodo laser e i fori di ancoraggio del cage system, b) vista laterale.

e in modo che fosse possibile ancorare al dissipatore i pali del cage system su cui sono stati allineati tutti gli altri elementi del setup ottico. Poiché le lenti utilizzate nel setup sono lenti standard del diametro di 1/2", esse possono essere fissate su delle cage apposite; questi elementi opto-meccanici di supporto, identici alla cage di sostegno del fosforo remoto, predispongono nativamente di quattro fori per pali di supporto e allineamento con altri eventuali elementi compatibili con il cage system. Dunque, oltre a quattro fori per i pali di allineamento del diametro di 6 mm, e ad altrettanti fori laterali filettati per le viti di fissaggio dei pali, al centro della superficie del dissipatore è stato realizzato un foro di 4 mm di diametro, in modo che la base del package del diodo laser, del diametro di 5,6 mm, potesse appoggiarsi sulla superficie facendo passare attraverso il foro i terminali di alimentazione. Infine, per mantenere il diodo laser in posizione fissa, è stata predisposta una lastra in alluminio con un foro in corrispondenza della testa del diodo laser, in modo che con l'aiuto di due viti la lastra effettuasse una pressione sufficiente sulla sua base. Il dissipatore così realizzato è presentato in Figura 4.3.

A causa delle imprecisioni nella realizzazione dei fori di ancoraggio e dell'impossibilità di centrare con precisione il diodo laser sulla superficie del dissipatore, sussiste il problema di allineamento imperfetto del fascio laser rispetto al centro degli assi ottici delle lenti del setup. Dato che per avere un buon allineamento del sistema ottico è necessario che il fascio sia ortogonale alle lenti, un errore di posizionamento di pochi decimi di millimetro della sorgente o degli elementi ottici in un setup con fascio laser può facilmente provocare delle indesiderate aberrazioni o deviazioni del fascio, le quali possono facilmente accumularsi ed amplificarsi dopo ogni elemento ottico.

Per tale ragione, la prima lente di collimazione, posizionata a pochi millimetri dal diodo laser, è fissata ad un movimentatore xy che ha permesso di muovere la lente nelle due direzioni ortogonali all'asse ottico pur mantenendo la *cage* fissata sui pali di allineamento.

4.1.2 Collimazione

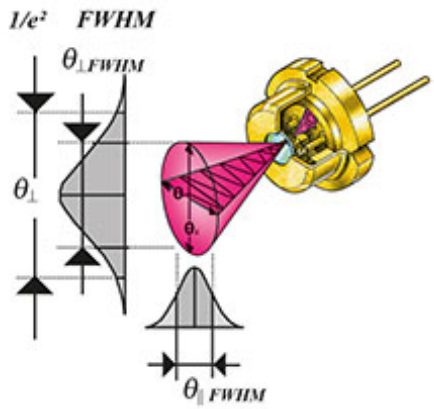


Figura 4.4: Fascio emesso da un diodo laser con angoli di divergenza $\theta_\perp$ e $\theta_\parallel$ esplicitati [30].

Una lente essenziale per qualsiasi setup comprendente un diodo laser è la lente di collimazione. Infatti, la maggior parte di diodi laser emette la luce in forma di cono divergente di radiazione, con una sezione ellittica e una distribuzione di intensità all'interno del cono di forma pressoché gaussiana. La divergenza del fascio viene caratterizzata dai valori $\theta_\perp$ e $\theta_\parallel$ (Fig. 4.4), misurati rispettivamente sul piano perpendicolare e su quello parallelo alla superficie attiva, ad una distanza dove il fascio ha una determinata ampiezza rispetto al massimo di intensità (tipicamente FWHM (50%) oppure $1/e^2 \approx 1,7\times$FWHM ($\approx$13,5%)). Il datasheet del diodo laser PL TB450B riporta i valori tipici di $\theta_\perp = 23°$ e $\theta_\parallel = 7°$. Per poter utilizzare in pratica un fascio divergente, è necessario impiegare delle ottiche di collimazione posizionate in prossimità della sorgente; tipicamente, quando il fascio collimato deve avere dimensioni comprese tra 1 e 5 mm, a tale scopo viene utilizzata una lente asferica, in quanto essa non introduce aberrazioni sferiche. La scelta delle caratteristiche di questa lente si basa solitamente sull'angolo di divergenza maggiore del diodo laser, e va effettuata in modo da raccogliere la maggiore quantità di luce del fascio. Con l'approssimazione di lente sottile, si ottiene che la distanza focale della

lente di collimazione vale

$$f = \frac{r}{\tan\theta} \tag{4.1}$$

dove r è il raggio del fascio collimato che si vuole ottenere, e θ è l'angolo di divergenza maggiore in gradi, come in Figura 4.5.

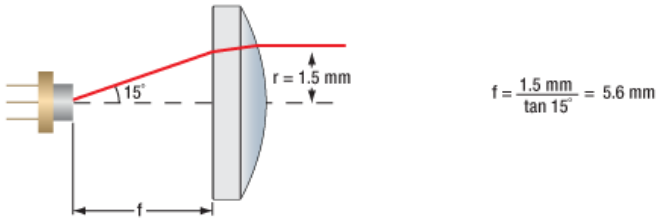


Figura 4.5: Esempio di calcolo di lunghezza focale della lente per collimare il fascio di un diodo laser con divergenza di 15° in un fascio con raggio di 1,5 mm [39].

Nei calcoli dei parametri di collimazione bisogna inoltre tenere conto che la sorgente del fascio non è idealmente puntiforme ma possiede una dimensione finita. Il principio di invarianza ottica ci dice che il prodotto tra il raggio e la divergenza del fascio deve rimanere costante sia prima che dopo la lente. In riferimento alla Figura 4.6 si ha quindi che, se la sorgente ha una dimensione y_1 e una divergenza θ_1, collimando il fascio di questa sorgente con una lente di lunghezza focale f per ottenere un fascio di raggio y_2 si ottiene necessariamente che la divergenza del fascio collimato sarà pari a $\theta_2 = y_1/f$ [23]. Questo significa che, a seconda della lente utilizzata, esiste un vincolo tra la dimensione e la divergenza del fascio collimato: è possibile ottenere un fascio più sottile, ma esso avrà una divergenza maggiore dopo il suo punto di focalizzazione, mentre un fascio di diametro più grande può mantenere all'incirca la stessa dimensione e rimanere collimato per distanze lunghe.

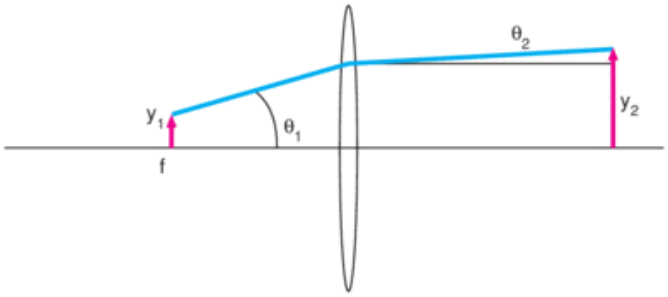


Figura 4.6: Collimazione di una sorgente non puntiforme [23].

Inoltre, è necessario garantire che l'apertura numerica (NA) del diodo laser sia minore di quella della lente. NA è una quantità adimensionale che costituisce una

misura dell'angolo di accettazione di un elemento ottico emittente (diodo laser) o trasmettente (lente, fibra). Tipicamente, NA è espressa come

$$\mathrm{NA} = n_i \sin \theta_a \tag{4.2}$$

dove n_i è l'indice di rifrazione del materiale esterno all'elemento ottico (tipicamente aria, con $n_i \approx 1$), e θ_a è il massimo semi-angolo di accettazione dell'elemento ottico, oppure l'angolo di massima divergenza nel caso del diodo laser. Nel caso di lenti utilizzate nelle applicazioni laser, il valore di NA aumenta con il diametro della lente (a parità di lunghezza focale) ed è legato alla quantità di fascio divergente incidente che la lente può convogliare senza troncare il fascio: più il valore di NA è elevato, minore è il troncamento. Per un fascio laser gaussiano, invece, il valore di NA è legato alla minima dimensione dello spot del fascio:

$$\mathrm{NA} \approx \frac{\lambda_0}{\pi w_0} \tag{4.3}$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda della luce del fascio nel vuoto e w_0 è il raggio del fascio nel punto di minimo misurato in riferimento alla larghezza $1/\mathrm{e}^2$.

Infine, la lente di collimazione, come tutte le lenti del sistema, deve avere un buon indice di trasmissione alla lunghezza d'onda del fascio laser, cosa che viene tipicamente ottenuta grazie a specifici materiali di composizione o di rivestimento (*coating*).

Riassumendo, per garantire che la lente di collimazione sia capace di accogliere la maggior parte del fascio emesso dal diodo laser in modo divergente, è necessario che NA_{lente} sia maggiore di NA_{laser}. Solitamente, risulta conveniente scegliere $\mathrm{NA}_{lente} \approx 2{\times}\mathrm{NA}_{laser}$. Nel caso di questo setup, per avere un fascio collimato di circa $2r = 1$ mm di diametro, i calcoli delle eq. 4.1 e 4.2 forniscono:

$$\begin{aligned} f_{teorico} &= 2,356 \text{ mm} \\ \mathrm{NA}_{laser} &\approx 0,39 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Tenendo conto dei requisiti e dei modelli commerciali disponibili, per la collimazione è stata utilizzata una lente asferica C440TMD-A di Thorlabs con una focale di 2,76 mm e NA $= 0,52$ e un rivestimento anti-riflesso passabanda nell'intervallo 350 -700 nm. Con questa lunghezza focale le dimensioni teoriche del fascio collimato

lungo i due assi ellittici sono di circa:

$$\begin{aligned} 2r_{\perp} &= 2f \tan\theta_{\perp} = 2,343 \text{ mm} \\ 2r_{\parallel} &= 2f \tan\theta_{\parallel} = 0,678 \text{ mm} \end{aligned} \tag{4.5}$$

Si può osservare che la focale della lente di collimazione focale è corta, quindi questa lente deve essere posizionata con molta precisione. Inoltre, va notato che la lunghezza focale si riferisce alla distanza dal punto di emissione di luce all'interno del *package* del diodo laser, di cui non si conosce il valore esatto. Il processo di collimazione del fascio laser è quindi un processo da eseguire con grande accuratezza manuale e consiste nell'avvicinare gradualmente il supporto della lente al diodo misurando il fascio risultante finché non si raggiunge un buon grado di collimazione. Ricordando che la collimazione ideale è difficile raggiungere nella realtà, questo processo rimane estremamente critico, in quanto una buona collimazione è fondamentale per poter ottenere successivamente un fascio uniforme e poco divergente.

4.1.3 Focalizzazione

Nel setup ottico in trasmissione è presente una lente piano-convessa che focalizza il fascio collimato sulla superficie dei fosfori, permettendo di ottenere uno spot di eccitazione di dimensioni variabili. Il metodo per focalizzare un fascio collimato si basa su uno schema invertito rispetto a quello utilizzato per la collimazione (Fig. 4.7). In questo caso, la lente piano-convessa è rivolta con la concavità in direzione opposta a quella della lente di collimazione, in modo da avere il punto focale alla propria destra sullo schema in figura. La lunghezza focale di questa lente può essere più grande di quella della lente di collimazione, in modo da permettere una maggiore libertà nel posizionamento della lente rispetto al fosforo e la possibilità di variare il rapporto di ingrandimento del fascio.

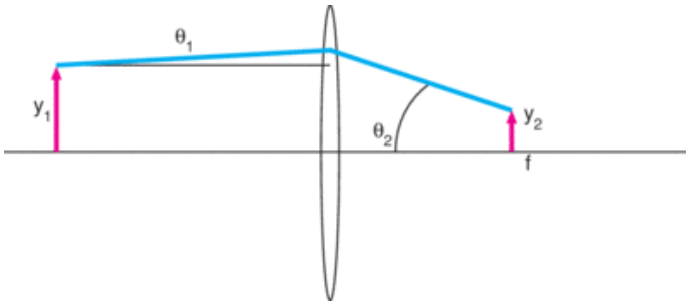


Figura 4.7: Focalizzazione di un fascio collimato [23].

Anche in questo caso, l'invarianza ottica impone una dimensione minima della dimensione del fascio nel punto focale per una determinata lente dalla relazione:

$$y_2 = \theta_1 f \tag{4.6}$$

Come lente di focalizzazione è stata utilizzata una lente asferica ACL25416U-A di Thorlabs con $f = 16$ mm, NA=$0,79$ e diametro di 1". Tale lente è stata posizionata ad una distanza $d_1 \approx 35$ mm dalla lente di collimazione.

Posizionando gli elementi ottici in modo che il fosforo remoto si trovi non esattamente nel punto focale è possibile ottenere uno spot più grande. In effetti, le prove hanno dimostrato che lo spot incidente non deve essere troppo focalizzato, poiché, come analizzato nel capitolo 2, un'intensità di fascio laser incidente troppo elevata può causare un calo di luminosità o danni alle particelle dei fosfori. Infatti, per elevate intensità di eccitazione, si verifica un calo di luminescenza dei fosfori per via dell'attivazione della barriera termica. Tale fenomeno è rilevabile in tempo reale con l'occhio umano oppure con uno spettrometro posto in veloce acquisizione continua.

Di conseguenza, per poter operare il sistema con le potenze ottiche d'eccitazione più elevate permesse dal diodo laser, è necessario che lo spot sia sufficientemente defocalizzato, in modo da garantire un funzionamento lineare prolungato nonostante il riscaldamento locale dei fosfori. Allo stesso tempo, è stato osservato che uno spot troppo grande causa un fascio proiettato asimmetrico e non omogeneo, per via della separazione del fascio nei diversi modi del diodo laser.

In fase di test si è osservato che la distanza d_2 ottimale dei fosfori remoti rispetto alla lente di focalizzazione può variare in base alla distanza d_1 tra la lente di focalizzazione e la lente di collimazione. Questo deriva probabilmente dal fatto che il fascio collimato possiede una divergenza tale da influire sulle dimensioni e sulle deformazioni del fascio in lunghezza. Il valore di distanza d_2 utilizzato per la caratterizzazione del setup è di 17 mm. Inoltre, il fosforo remoto viene posizionato con la superficie dei fosfori rivolta verso il diodo laser, in modo da evitare in caso contrario eventuali riflessioni dirette del fascio laser dal substrato.

4.1.4 Proiezione

In seguito all'eccitazione tramite laser, la luce viene emessa dalle particelle di fosforo in tutte le direzioni dello spazio; inoltre, sia i raggi emessi sia il fascio laser vengono deviati dalle riflessioni interne al materiale e al substrato di supporto dei fosfori.

Questi fenomeni fanno sì che la luce in uscita dal fosforo remoto sia fortemente divergente. Per raccogliere la maggior parte di questa luce e indirizzarla in un fascio di illuminazione ristretto, è necessaria una lente di proiezione con un diametro elevato e una lunghezza focale corta. Dopo aver testato diverse lenti, per tale scopo è stata scelta una lente piano-convessa LA1951-A di Thorlabs, con una lunghezza focale $f = 25,4$ mm e diametro di 1". Posizionando tale lente ad una distanza $d_3 = 8$ mm dalla faccia posteriore del substrato dei fosfori remoti, si ottiene un fascio proiettato relativamente omogeneo ed uniforme, con una divergenza di circa 2°.

4.2 Caratterizzazione delle prestazioni del setup

4.2.1 Caratterizzazione tramite immagini del fascio incidente su un foglio di riferimento

Un'estensiva ricerca delle combinazioni ottimali di lenti e delle distanze tra loro è stata necessaria per ottenere un fascio con un compromesso tra le seguenti caratteristiche:

- forma il più circolare possibile;
- divergenza del fascio di circa 2°, tipica per un'applicazione di proiezione di luce a lunga distanza;
- omogeneità e uniformità della luce all'interno del fascio proiettato

Una problematica importante del setup in trasmissione è rimasta tuttavia irrisolta: nonostante si fosse riusciti a raggiungere un'omogeneità e divergenza del fascio relativamente buone, il colore del fascio proiettato risultava essere giallo, molto lontano dal bianco ricercato. Testando fosfori remoti con diversi spessori di materiale luminescente si è osservato che il colore giallo del fascio proiettato è dovuto a uno spessore troppo elevato dei fosfori, i quali non trasmettono sufficiente luce del laser per una corretta miscelazione di spettri.

Non essendo stato possibile produrre un fosforo remoto con spessore di fosfori sufficientemente sottile da avvicinarsi alla luce bianca, per la caratterizzazione del setup ottico è stata impiegata una lastra di fosfori Intematix commerciale. Tale lastra è progettata per applicazioni di illuminazione basate su LED ed è realizzata con fosfori YAG:Ce incapsulati con silicone, uno strato diffusivo, e un substrato in

vetro. Questa soluzione permette di utilizzare nel setup uno spessore di fosfori sottile ed uniforme, fornendo una luce relativamente bianca.

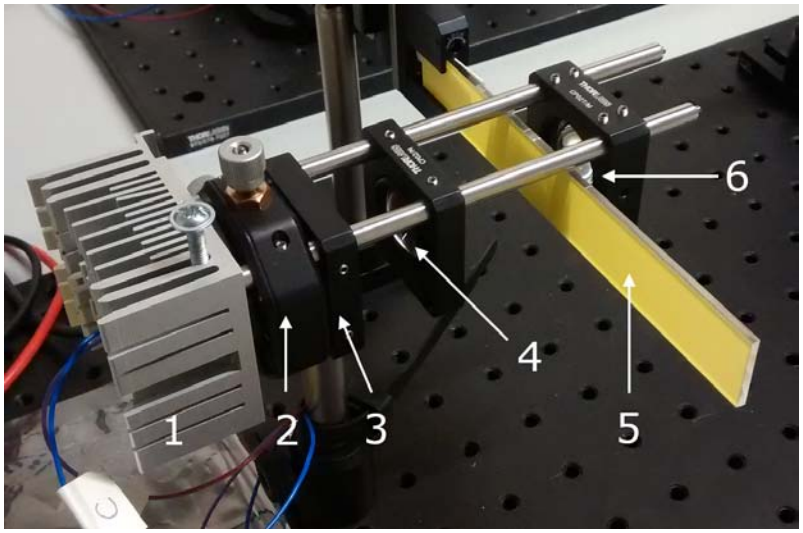


Figura 4.8: Setup in trasmissione: 1) dissipatore, 2) *cage* X-Y con la lente di collimazione, 3) *cage* di supporto, 4) lente di focalizzazione, 5) lastra con fosfori Intematix, 6) lente di proiezione.

Il setup finale, mostrato in Figura 4.8, è stato caratterizzato in funzione delle proprietà luminose del fascio prodotto. Nella prima fase di caratterizzazione il fascio proiettato è stato analizzato studiandone la forma geometrica e i profili RGB all'interno di una sua sezione tramite un'elaborazione delle immagini dello spot creato dal fascio su un foglio bianco di riferimento. Queste immagini sono state acquisite ed elaborate con Matlab per diverse intensità di luce proiettata. In particolare, le correnti di iniezione del diodo laser prescelte corrispondono alla sequenza 220 mA, 230 mA, 240 mA, 250 mA, 275 mA, 300 mA, 325 mA, 350 mA, 375 mA, 400 mA, 425 mA, 450 mA, 475 mA, 500 mA. Correnti più elevate hanno mostrato una possibile comparsa del calo di luminosità, percepibile anche ad occhio nudo, dovuta ad un'intensità di eccitazione troppo elevata e un'insufficiente dissipazione termica dei fosfori.

Per avere un riferimento delle dimensioni della sezione del fascio, sul foglio bianco è stata stampata una griglia di punti di riferimento distanti 1 cm. In questo modo, ricavando il numero di pixel dell'immagine digitale corrispondenti a 1 cm reale, è possibile misurare le dimensioni del fascio; conoscendo la distanza del foglio di riferimento dal setup è possibile quindi valutare il valore della divergenza del fascio proiettato.

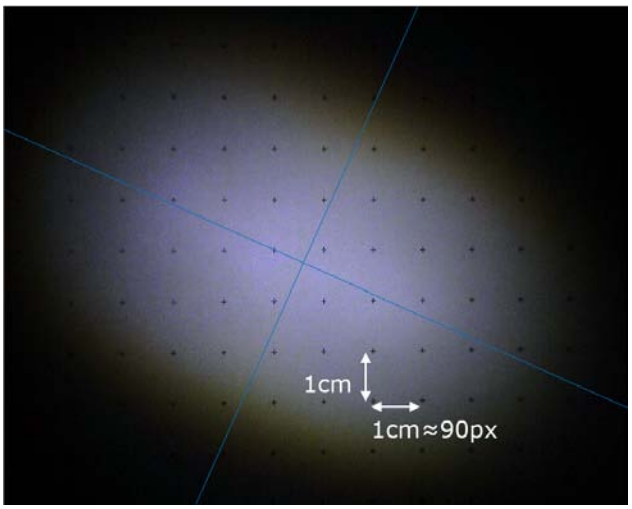


Figura 4.9: Spot d'illuminazione generato sul foglio di riferimento dal sistema in trasmissione con diodo laser pilotato a 500 mA. In figura sono evidenziati gli assi principali dello spot.

La dimensione del fascio è stata ricavata dall'immagine corrispondente alla corrente del diodo laser di 500 mA. La foto relativa, riportata in Figura 4.9, mostra che il fascio ha una forma ellittica, per via dell'ellitticità del fascio collimato del laser. Tramite codice Matlab, applicando una soglia del 10% del valore di picco dell'intensità all'immagine convertita in una scala di colori di grigio, sono stati ricavate le coordinate degli assi maggiore e minore dell'ellisse risultante. Dalla conversione della lunghezza in pixel di questi assi in centimetri (1 cm $\approx$ 90 pixel), sono state ricavate le dimensioni del fascio di 13,5 cm e di 9,5 cm rispettivamente per l'asse maggiore e per l'asse minore. Considerando che questa immagine corrisponde alla sezione del fascio ad una distanza di 132 cm dalla lente di proiezione, si ricavano i seguenti valori di divergenza del fascio lungo i due assi:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{maggiore}} &: 2,7^\circ \\ \theta_{\text{minore}} &: 2,1^\circ \end{aligned} \tag{4.7}$$

In seguito, sono stati ricavati i profili di intensità delle immagini del fascio scomposte nelle componenti R, G e B lungo le direzioni dei due assi principali, per ogni corrente imposta al diodo laser. Alle immagini del fascio è stata preventivamente applicata una procedura di *smoothing* basata sul metodo Perona-Malik, il quale applica una diffusione anisotropica dell'intensità dei pixel, preservando i dettagli e le direzioni del gradiente. I profili ricavati dalle immagini elaborate, normalizzati rispetto al loro massimo, sono presentati in Figura 4.10.

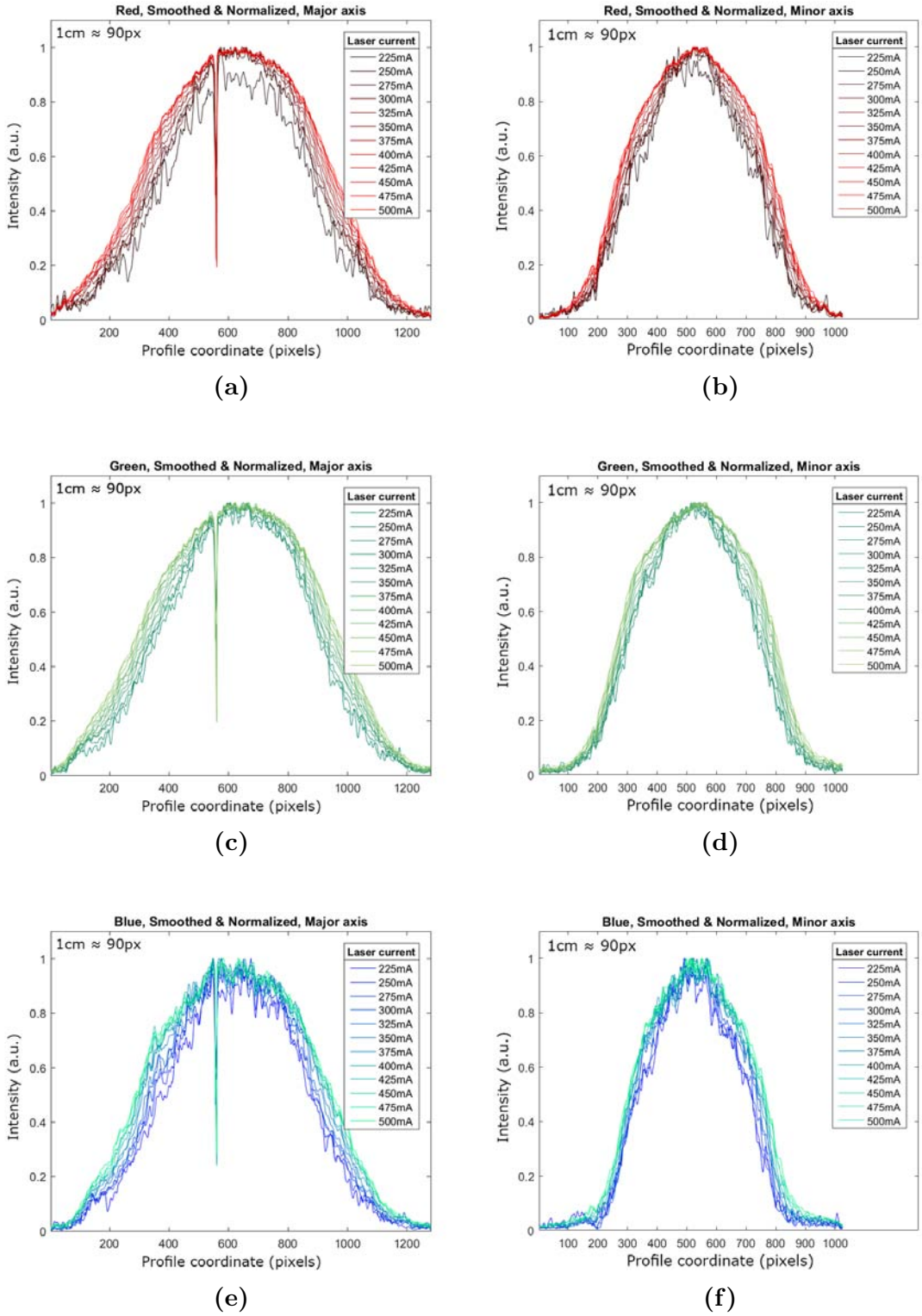
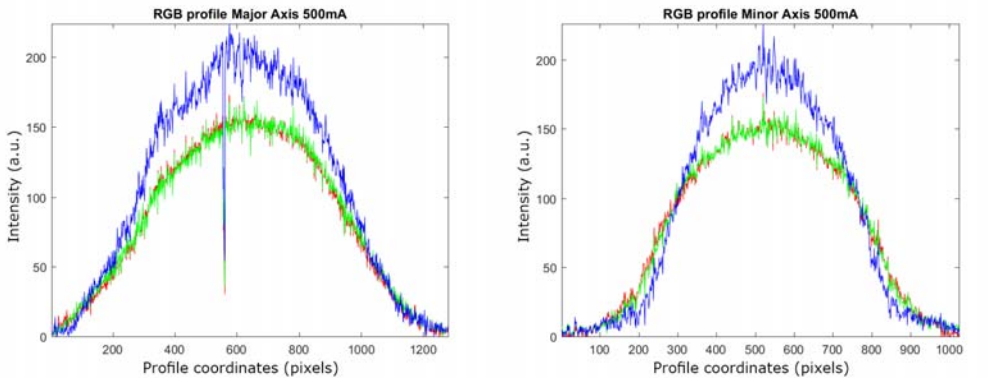


Figura 4.10: Profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio ottenuto tramite il setup in trasmissione.

Analizzando i profili relativi all'asse principale si può evidenziare che all'aumentare della corrente del diodo laser l'ampiezza del profilo di intensità aumenta in maniera pressoché uguale per i tre colori RGB. Questo fatto conferma l'uniformità del colore del fascio lungo questo asse percepita dall'occhio umano.

Osservando i profili dell'asse secondario si può invece notare che il profilo della componente blu rimane più stretto in larghezza dei profili rossi e verdi, anche all'aumentare della corrente del laser. In effetti, intorno ai bordi del fascio in direzione secondaria si possono notare delle zone di colore più giallo, diverso dalla zona centrale del fascio (Fig. 4.9). La presenza di una minore quantità di blu è messa in evidenza anche osservando i profili RGB sovrapposti (Fig. 4.11b).

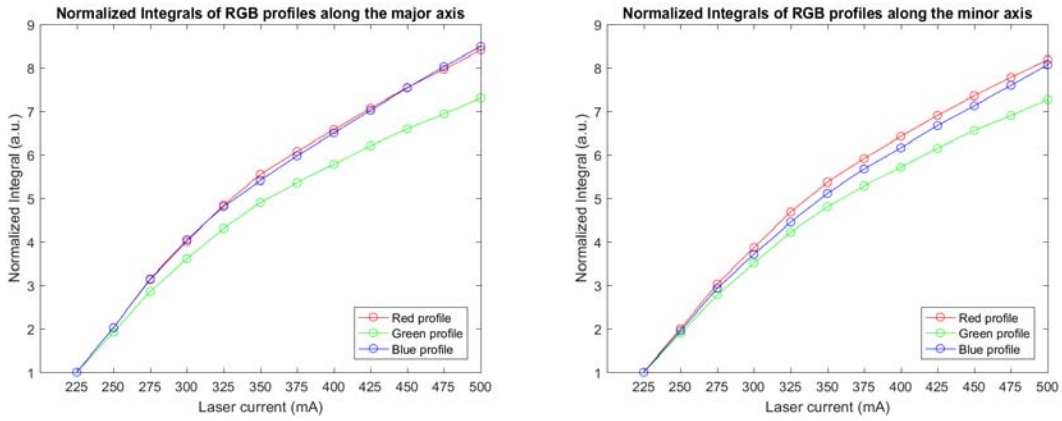
Per evidenziare la differenza di omogeneità di colore lungo i due assi, è possibile confrontare gli integrali delle curve dei profili di intensità delle tre componenti RGB (Fig. 4.12). Se ne può dedurre che, all'aumentare della corrente del diodo laser, l'incremento del contributo del colore blu è minore lungo l'asse secondario rispetto all'asse principale.



(a) **(b)**

Figura 4.11: Profili RGB lungo i due assi principali per un polarizzazione di 500mA.

Integrando invece i valori di intensità delle intere immagini del fascio per diverse correnti del laser, previa sottrazione dell'immagine di buio e conversione in scala di grigio, si può ottenere una stima della relazione tra la luminosità del fascio e la corrente del diodo laser. Come si osserva in Figura 4.13, tale relazione non è lineare: probabilmente la sua causa è una presenza di quenching termico per via di una cattiva dispersione del calore dei fosfori ad alte intensità di eccitazione.



(a) **(b)**

Figura 4.12: Integrali normalizzati dei profili RGB lungo i due assi principali.

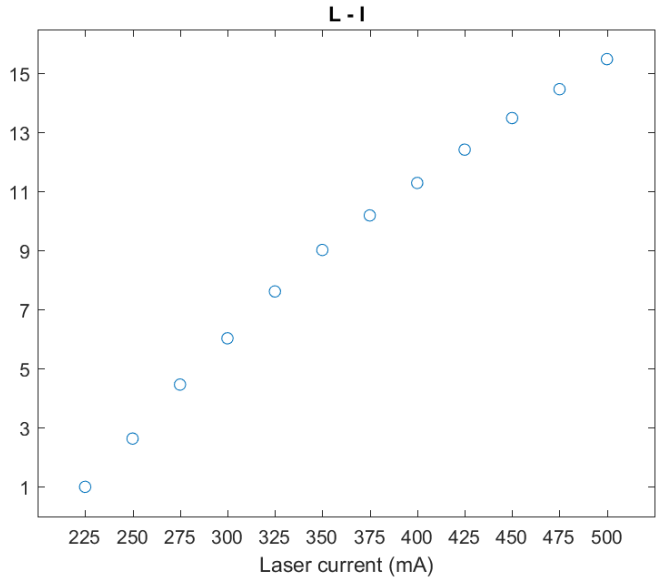


Figura 4.13: Stima della relazione L-I.

4.2.2 Caratterizzazione in sfera integratrice

Per misurare con precisione le caratteristiche luminose della luce emessa dal setup ottico realizzato, e per calcolarne con esattezza la potenza luminosa, l'emissione di questo setup è stata misurata in una sfera integratrice di largo diametro (65") LabSphere LMS-650.

La sfera integratrice è un tipico strumento di misura del flusso radiante totale di una sorgente luminosa. La funzione della sfera è quella diffondere al suo interno la luce emessa dalla sorgente grazie a riflessioni multiple sulle sue pareti, con l'obbiettivo di rendere la radiazione da misurare indipendente dalla distribuzione spaziale e dalla polarizzazione della sorgente, mantenendone solo l'informazione della distribuzione spettrale di potenza. Una stretta apertura di uscita, tipicamente protetta da uno schermo per evitare l'accoppiamento diretto con la sorgente da misurare, permette di caratterizzare la radiazione diffusa con uno spettrometro esterno collegato tramite fibra ottica. Le caratteristiche di una sfera integratrice generica dipendono per lo più dalla qualità del rivestimento delle pareti interne (il quale deve garantire un'elevata riflettività delle radiazioni da misurare, e dal rapporto tra la sezione dell'apertura di uscita e la superficie interna, tipicamente minore del 5%).

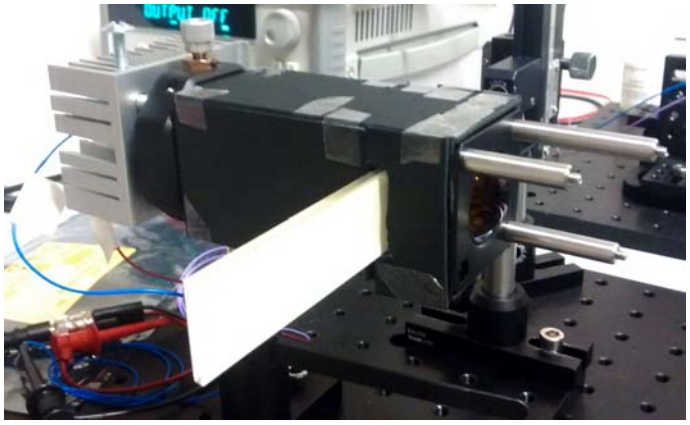


Figura 4.14: Setup in trasmissione adeguatamente preparato per la caratterizzazione in sfera integratrice.

Nel caso della sfera LMS-650, la sorgente viene collocata al centro esatto dello strumento tramite su un supporto regolabile in altezza, il quale mette a disposizione le connessioni elettriche necessarie (Fig. 4.15). Per misurare correttamente il fascio emesso, inoltre, il setup ottico è stato circondato da cartone nero, in modo da proiettare in uscita la sola luce luce uscente dalla lastra contenete i fosfori remoti (Fig. 4.14).

Figura 4.15: Prototipo posizionato all'interno della sfera integratrice.

La corretta misurazione di una sorgente tramite una sfera integratrice richiede due fasi di calibrazione. La prima, che coinvolge l'intero setup, viene effettuata periodicamente per determinare la corretta conversione dei conteggi per unità di lunghezza d'onda dello spettro in densità spettrale di potenza assoluta. Come per la calibrazione di uno spettrometro, questa operazione richiede la misura di una lampada alogena apposita; il rapporto tra la risposta del sistema e lo spettro noto della lampada costituisce un file di calibrazione che viene utilizzato per la correzione delle misure successive. Una seconda calibrazione è invece necessaria ogni qualvolta viene introdotto una nuova sorgente da misurare, in quanto la presenza della sorgente può creare assorbimenti o riflessioni che influiscono sulla misura assoluta dello spettro di emissione della sorgente stessa. In questo caso, l'operazione consiste nel misurare la risposta del sistema con la sorgente da misurare posizionata sul suo supporto e spenta, accendendo una seconda lampada alogena, la quale è opportunamente posizionata vicino alla parete interna della sfera e protetta da uno schermo. I dati di calibrazione sono quindi costituiti dal rapporto tra lo spettro misurato in presenza del sistema da misurare e lo spettro misurato con la sfera vuota.

Gli spettri acquisiti nella sfera integratrice al variare della corrente di polarizzazione sono rappresentati in Figura 4.16. Un problema emerso in fase di misure è costituito dalla presenza di un forte segnale del laser, il cui picco è circa 31 volte

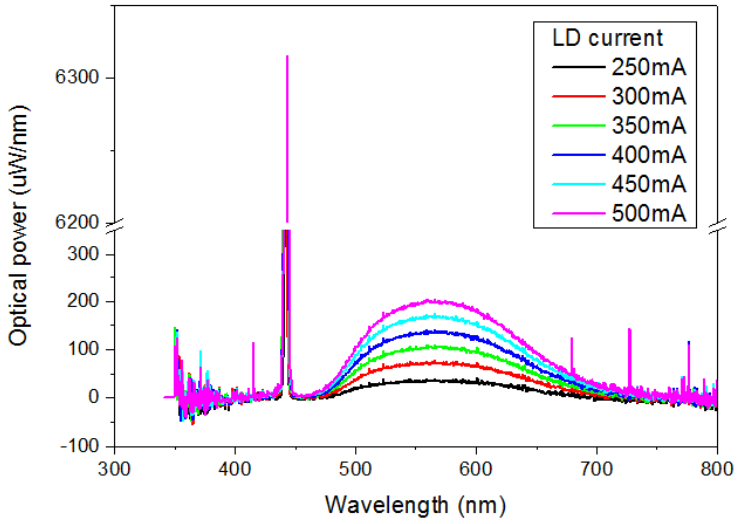


Figura 4.16: Spettri acquisiti durante la caratterizzazione tramite sfera integratrice.

maggiore del massimo di emissione dei fosfori. Questa condizione costringe infatti ad effettuare una misura con breve tempo di integrazione, in modo da evitare la saturazione dei pixel dello spettrometro relativi alle lunghezze d'onda del diodo laser, il che comporta però un'elevata rumorosità della misura nella regione spettrale relativa alla luminescenza dei fosfori.

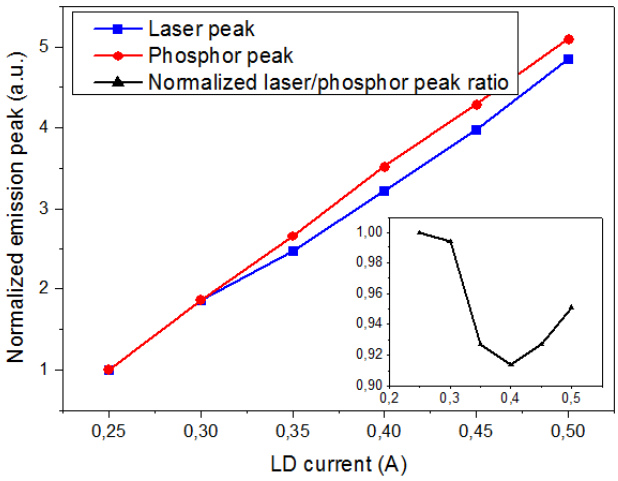


Figura 4.17: Incremento dei valori di picco normalizzati all'aumentare della corrente del diodo laser. Nel riquadro, il rapporto normalizzato tra il picco dello spettro del laser e quello dello spettro dei fosfori al variare della corrente (unità di misura a.u.).

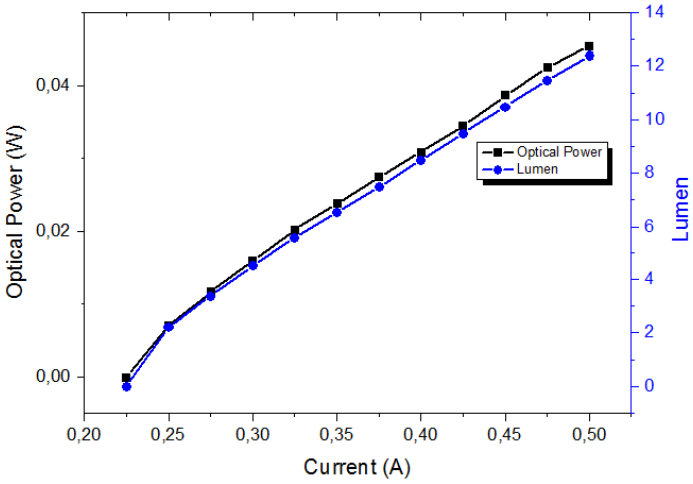


Figura 4.18: Andamento della potenza luminosa e del flusso luminoso del fascio emesso misurato in sfera integratrice al variare della corrente di polarizzazione.

Si può osservare che le relazioni tra la potenza ottica e il flusso luminoso del fascio proiettato e la corrente del diodo laser sono sostanzialmente lineari per correnti sufficientemente maggiori della corrente di soglia del diodo laser (Fig. 4.18). Tuttavia, i valori di queste grandezze luminose sono dell'ordine di alcune decine di milliwatt e della decina di lumen. In altre parole, il fascio proiettato è estremamente debole ed insufficiente per un'applicazione di illuminazione.

Le misure di irradianza assoluta del fascio permettono di valutare l'efficienza del sistema. Considerando le condizioni di misura di massima potenza ottica di 0,0454 W con una corrente del diodo laser di 0,5 A, e sapendo che la tensione operativa del diodo laser in tali condizioni era di circa 4,2 V, si ricava che l'efficienza totale del sistema è pari a

$$\eta_{tot} = \frac{P_{proiezione}}{P_{LD}} = \frac{0,0454 \text{ W}}{4,2 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A}} = 2,16\% \tag{4.8}$$

Le misure dei transitori della potenza ottica incidente sui fosfori in questo setup mostrano che una corrente del diodo laser di 500 mA corrisponde ad una potenza ottica a regime del fascio di eccitazione di 0,404 W. Questo significa che il rapporto tra la potenza elettrica in ingresso al diodo laser e la potenza ottica che eccita i fosfori risulta essere

$$\eta_1 = \frac{P_{eccitazione}}{P_{LD}} = \frac{0,404 \text{ W}}{2,1 \text{ W}} = 19,24\% \tag{4.9}$$

L'efficienza nel convertire la luce incidente sui fosfori in luce proiettata dal setup

in queste condizioni operative è pari a

$$\eta_2 = \frac{P_{proiezione}}{P_{eccitazione}} = \frac{0,0454 \text{ W}}{0,404 \text{ W}} = 11,24\% \tag{4.10}$$

I valori di efficienze ricavate sono estremamente bassi per un sistema di illuminazione pratico. In effetti, mentre il valore di η_1 è in linea con un'efficienza tipica di un diodo laser di 25-30%, le perdite maggiori di potenza ottica avvengono tra l'eccitazione dei fosfori e la proiezione della luce utile, come evidenziato dal valore di η_2. Il motivo di queste perdite risiede principalmente nel fatto che il fosforo remoto emette luce in tutte le direzioni dello spazio: nelle fasi di creazione del setup è stato possibile constatare che una grande parte di luce viene emessa nel semispazio di provenienza del fascio laser. Di conseguenza, la luce raccolta dalla lente di proiezione è solo una frazione della luce effettivamente generata dal fosforo remoto. Al fine di ottimizzare questo aspetto del sistema, sarebbe necessario utilizzare degli elementi ottici posizionati ad una minore distanza dal fosforo remoto, oppure una superficie riflettente capace di indirizzare verso il fascio proiettato la luce non raccolta dalle ottiche.

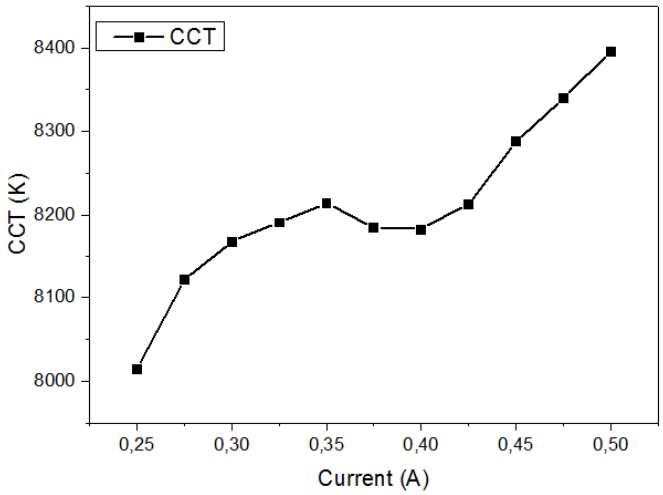


Figura 4.19: Relazione tra la corrente del diodo laser e CCT del fascio emesso misurato in sfera integratrice.

I valori di CCT misurati sono compresi tra 8000 K e 8400 K (Fig. 4.19), quindi il fascio emesso ha una temperatura molto fredda, troppo fredda per un'applicazione di illuminazione. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di eccessivo segnale del laser rispetto alla luminescenza dei fosfori, come osservato dall'analisi degli spettri acquisiti. Analogamente, i valori delle coordinate cromatiche x,y indicano che la luce

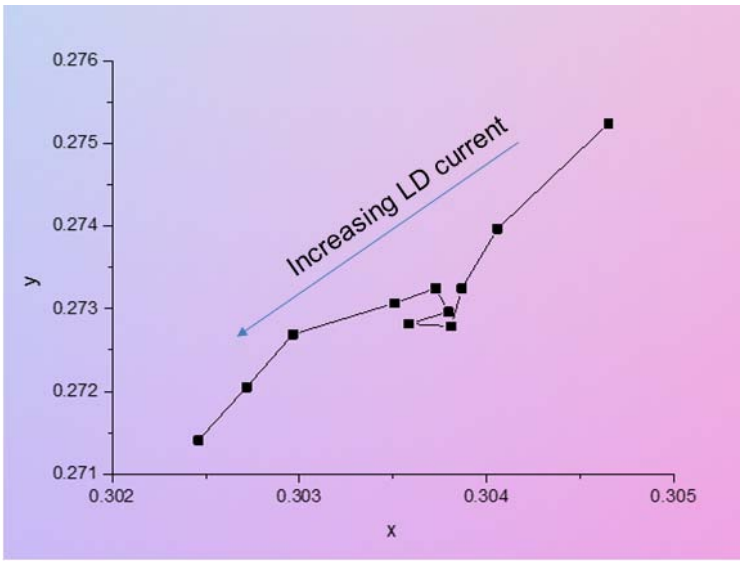


Figura 4.20: Coordinate cromatiche x,y del fascio emesso misurato in sfera integratrice all'aumentare della corrente del diodo laser.

prodotta dal setup è più vicina alla regione blu del diagramma cromatico (Fig. 4.20). Una luce adeguatamente bianca dovrebbe invece avere delle coordinate (x,y) più vicine al punto (0.33, 0.33).

4.3 Utilizzo di pellet di KBr e YAG:Ce^{3+} come fosfori remoti

Come osservato negli esperimenti descritti sopra, uno degli aspetti più problematici di una configurazione LARP in trasmissione consiste nel controllo della quantità di luce del diodo laser trasmessa dal fosforo remoto rispetto all'intensità di luce emessa dalle particelle di fosforo. Per una corretta miscelazione di luce bianca, è necessario quindi poter realizzare i fosfori remoti con un determinato spessore o densità di particelle luminescenti, in modo da controllare l'assorbimento della luce laser.

Poiché la tecnica di deposizione di fosfori impiegata precedentemente non ha potuto garantire una sufficiente precisione riguardo allo spessore dello strato di particelle creato, si è tentato di proporre un metodo alternativo per realizzare fosfori remoti con determinati valori di spessore e/o densità di particelle luminescenti. In questa sezione viene descritta una soluzione esplorata in collaborazione con il Dipartimento di Chimica, tipicamente impiegata nella realizzazione di *pellet* con materiale destinato ad essere sottoposto ad analisi IR.

Il metodo in questione consiste nel mescolare in modo uniforme il materiale in polvere da analizzare con la polvere di un sale inorganico trasparente alle lunghezze d'onda IR; il miscuglio viene pressato manualmente in una macchina apposita, in modo che il sale di supporto si compatti, incorporando nel sottile disco (pellet) così formato il materiale da analizzare [17]. Per trasporre questo metodo nell'ambito LARP di questa tesi, il materiale da analizzare è stato sostituito direttamente dalla polvere di YAG:Ce^{3+} in nostro possesso. Per quanto riguarda il sale inorganico di supporto, un'applicazione LARP in trasmissione richiede che questo sale sia il più possibile trasparente alle lunghezze d'onda del diodo laser (nel nostro caso, 450 nm) e dell'emissione fosforica. In sostanza, si tratta di selezionare i sali con maggiore trasmissività nell'intervallo di luce visibile.

Analizzando i dati relativi ai materiali con cui tipicamente si realizzano gli elementi ottici, si possono evidenziare i sali inorganici. Tra questi, quelli con maggiore trasmissività nell'intervallo 0,4 - 0,8 μm sono riportati in Tabella 4.1. Nella tabella vengono inoltre riportati i valori di conducibilità termica (a circa 300 K): tale grandezza è di estrema importanza nella selezione del sale più adatto a costituire un fosforo remoto, in quanto, come osservato precedentemente, esso deve essere in grado di dissipare il calore per tollerare l'elevato stress termico indotto dal riscaldamento del materiale luminescente.

Materiale	Trasmissività nell'intervallo 0,4-0,8 μm	Conducibilità termica intorno a 300K (W/mK)
Zaffiro	82-85%	23,1 - 25,2
BaF_2	92-94%	11,72
CaF_2	94%	9,71
KCl	90-94%	6,53
KBr	77-88%	4,82
NaCl	75-85%	1,15

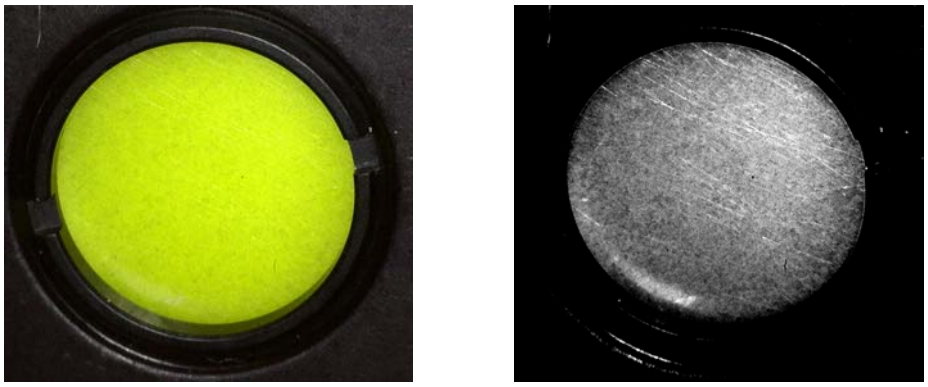
Tabella 4.1: Dati di alcuni materiali utilizzati come componenti di ottiche in trasmissione [41].

Per via della disponibilità immediata del bromuro di potassio (KBr), tale materiale è stato utilizzato come componente principale dei pellet realizzati. Tra le alternative utilizzabili in futuro si segnala in particolare il fluoruro di calcio (CaF_2) sia per via delle sue buone caratteristiche ottiche e termiche sia per l'assenza di rischi per la salute. I pellet realizzati sono stati ottenuti mescolando polvere di KBr con la polvere YAG:Ce^{3+} utilizzata per i fosfori remoti dei prototipi di questa tesi. Sono stati realizzati diversi pellet, con diverse concentrazioni e quantità totali di materia-

le. In particolare, la massa totale dei pellet prodotti varia tra 150 e 350 mg circa, range scelto in quanto esso permette di ottenere dei pellet con sufficiente stabilità meccanica per poter essere manipolati. I pellet sono stati realizzati pressando il miscuglio di polveri desiderato in un'apposita pressa manuale (Fig. 4.21), applicando una pressione di circa 10 tonnellate per 20-30 secondi. Questa operazione fornisce dei dischi con uno spessore di circa 1 mm e un diametro di 1/2" che permette di collocarli nelle sopracitate cage utilizzate come supporto ai fosfori remoti. Tuttavia, per via dell'irregolare usura subita dal perno pressante del macchinario, la superficie del campione presenta una serie di irregolarità, osservabili a occhio nudo (Fig. 4.22). Inoltre, è possibile notare che, specialmente nel caso di pellet particolarmente sottili, il pellet presenta delle aree altamente non uniformi al proprio interno; ciò può essere dovuto alla tendenza del KBr a formare grumi a causa dell'umidità dell'aria, oppure ad una pressione non uniforme applicata dalla pressa.

Le percentuali di fosfori YAG:Ce^{3+} rispetto al totale della massa dei pellet creati corrispondono al 2,7%, 3,8% e al 5%.

Figura 4.21: Pressa manuale utilizzata per la realizzazione dei pellet.



(a) **(b)**

Figura 4.22: Immagini della superficie di un pellet montato in una cage: a) immagine originale; b) immagine convertita in toni di grigio ad alto contrasto per mettere in risalto le irregolarità della superficie.

4.3.1 Caratterizzazione dei pellet

I pellet realizzati con diverse percentuali di materiale luminescente e differente massa totale sono stati analizzati per mezzo di immagini e misure colorimetriche del fascio proiettato in seguito all'eccitazione e la trasmissione del fascio laser. Lo scopo di queste misure è stato quello di individuare il pellet con la miglior combinazione di caratteristiche che potesse svolgere il ruolo di fosforo remoto in un sistema LARP in trasmissione.

L'analisi di immagini del fascio proiettato su un foglio bianco con griglia di riferimento è stata effettuata con lo stesso metodo implementato per la caratterizzazione del prototipo in trasmissione (sezione 4.2.1).

Le misure colorimetriche sono state effettuate in alcuni punti della sezione del fascio (al centro, ai lati del centro a 2 cm di distanza, in alto e in basso rispetto al centro a 1 cm di distanza) utilizzando una sfera integratrice FOIS-1 di OceanOptics, la cui apertura di ingresso è stata ridotta ad un foro del diametro di circa 2 mm, allo scopo di misurare una ristretta area del fascio. La sfera integratrice è stata collegata ad uno spettrometro USB4000 attraverso una fibra ottica. Dagli spettri acquisiti sono infine stati ricavati i valori "puntuali" delle grandezze colorimetriche x,y e CCT. Bisogna osservare, tuttavia, che il concetto di CCT è valido solamente quando il relativo punto di coordinate x,y si trova sufficientemente vicino al locus planckiano del diagramma x,y, condizione che non è sempre verificata.

Infine, per valutare l'entità dell'assorbimento della luce laser dovuto al sale KBr all'interno dei pellet, è stato realizzato un pellet composto al 100% di KBr. In seguito, è stata misurata la potenza della luce laser trasmessa da questo pellet,

focalizzandola con una lente verso l'ingresso di una sfera integratrice, collegata al power-meter PM100USB. Il confronto tra la potenza trasmessa e quella incidente (misurata in assenza del pellet) fornisce un'indicazione sull'ulteriore attenuazione introdotta dalla presenza del sale KBr, permettendo di valutare l'efficienza del pellet nel ruolo di supporto del fosforo remoto in una configurazione in trasmissione.

I risultati delle analisi sono riportati nelle figure 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28. Di seguito vengono descritte le principali osservazioni riguardo questi risultati:

- **Pellet con 2,7% di YAG:Ce^{3+}, massa totale 248 mg:** l'elevata granularità del sale KBr e il basso quantitativo di fosfori danno origine ad un fascio non uniforme e causano la presenza di intensi picchi di trasmissione localizzati.. In generale, il fascio trasmesso risulta eccessivamente blu, con un'elevata quantità di luce laser trasmessa dal pellet, rispetto allo spettro di luminescenza dei fosfori (Fig. 4.24).

- **Pellet con 3,8% di YAG:Ce^{3+}, massa totale 210 mg:** valgono le medesime osservazioni esposte per il pellet precedente (Fig. 4.25).

- **Pellet con 3,8% di YAG:Ce^{3+}, massa totale 292 mg:** lo spessore maggiore, a parità di percentuale di fosfori, fa in modo che la luce del laser sia maggiormente assorbita dal pellet dando luogo ad uno spettro di luminescenza più intenso rispetto alle misure precedenti. Tuttavia, la granularità del pellet introduce delle non-uniformità nei profili del fascio e diversi picchi di emissione laser o di luminescenza diventano osservabili. Globalmente, il fascio ha dei valori x,y e di CCT più vicine a quelli della luce bianca desiderata, tuttavia i valori hanno poca uniformità all'interno della sezione del fascio (Fig. 4.26).

- **Pellet con 5% di YAG:Ce^{3+}, massa totale 146 mg:** nonostante una maggiore percentuale di fosfori, la minore massa del pellet, e quindi un minore spessore, da luogo ad un'elevata granularità e ad una predominanza dello spettro di luce laser trasmessa con la presenza di picchi di emissione laser o di luminescenza fosforica (Fig. 4.27).

- **Pellet con 5% di YAG:Ce^{3+}, massa totale 308 mg:** in questo caso, lo spettro è dominato dall'emissione dei fosfori, pressoché uniforme all'interno del fascio di proiezione. Tuttavia, in questo caso lo spessore del pellet e la percentuale di fosfori risultano essere troppo elevati, il che dà luogo ad un'emissione prettamente gialla, come visibile dalle caratteristiche cromatiche riportate in Figura 4.27.

Per quanto riguarda la misura dell'assorbimento da parte del pellet con 100% di KBr da 170 mg, nel caso di misura con un diodo laser a 442 nm pilotato a 250 mA, si ottengono dei valori potenza di ottica di 41,75 mW per il fascio incidente e 6,78 mW per il fascio trasmesso, corrispondenti ad un 16,24% di trasmissività. Questo risultato è molto diverso da quello atteso, in quanto la trasmissività ottica del materiale KBr dovrebbe essere compresa tra 77% e 88% circa per le lunghezze d'onda tra 0,4 μm e 0,8 μm (Fig. 4.23). I motivi di questa discrepanza possono essere l'elevato scattering della luce all'interno del pellet realizzato (per via delle regioni non uniformi al suo interno) e il fatto che i dati in figura si riferiscono ad un monocristallo di KBr.

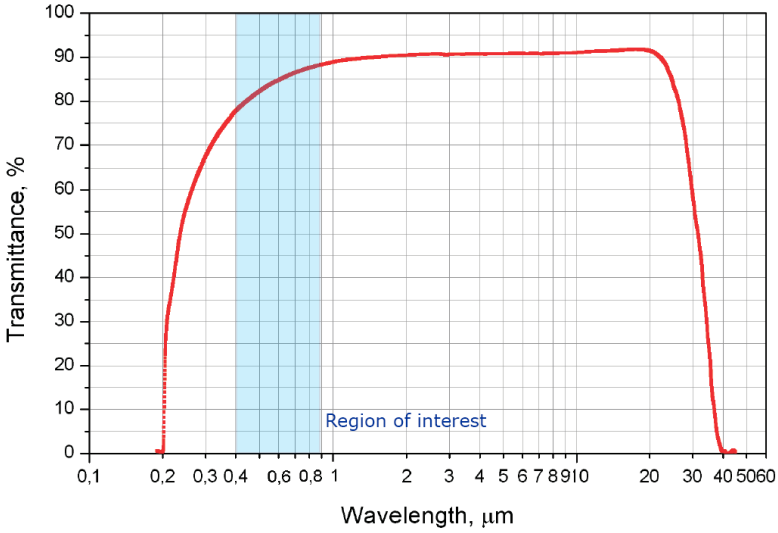
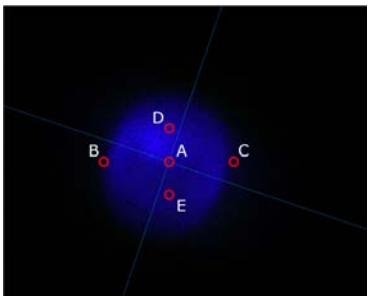


Figura 4.23: Trasmissività di KBr [41].



A	B	C	D	E
Undefined	34291K	10748K	Undefined	Undefined
0,2270 x	0,2426 x	0,2923 x	0,2255 x	0,2326 x
0,1456 y	0,2520 y	0,2569 y	0,1440 y	0,1692 y

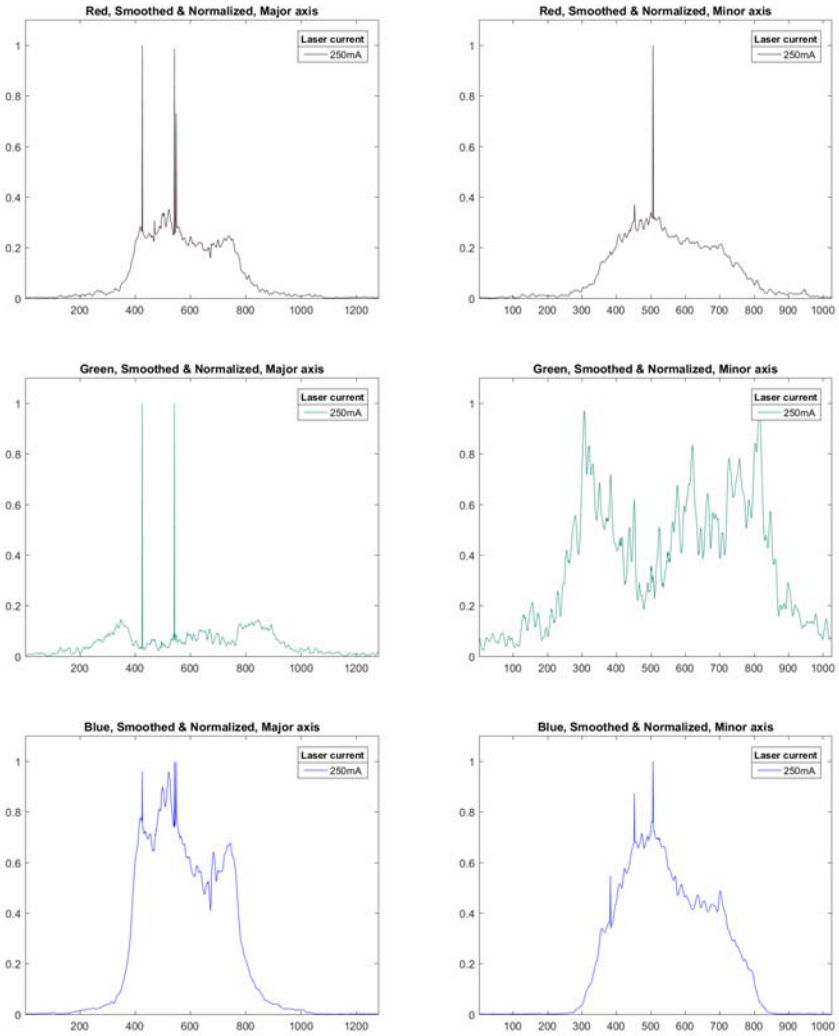
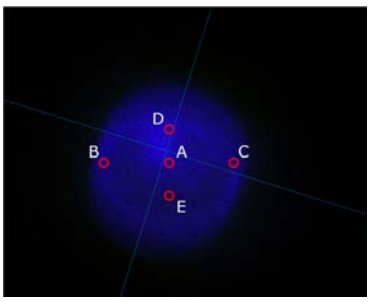


Figura 4.24: Analisi del pellet contenente 2,7% di YAG:Ce^{3+}, con massa totale di 248 mg. In alto a destra, i valori CCT e x,y misurati in corrispondenza di diversi punti del fascio, rappresentati nella figura in alto a sinistra; i grafici successivi mostrano i profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio prodotto con il pellet in questione.



A	B	C	D	E
Undefined	Undefined	6750K	Undefined	Undefined
0,2387 x	0,2434 x	0,3094 x	0,2242 x	0,2584 x
0,1849 y	0,1836 y	0,3225 y	0,1483 y	0,2211 y

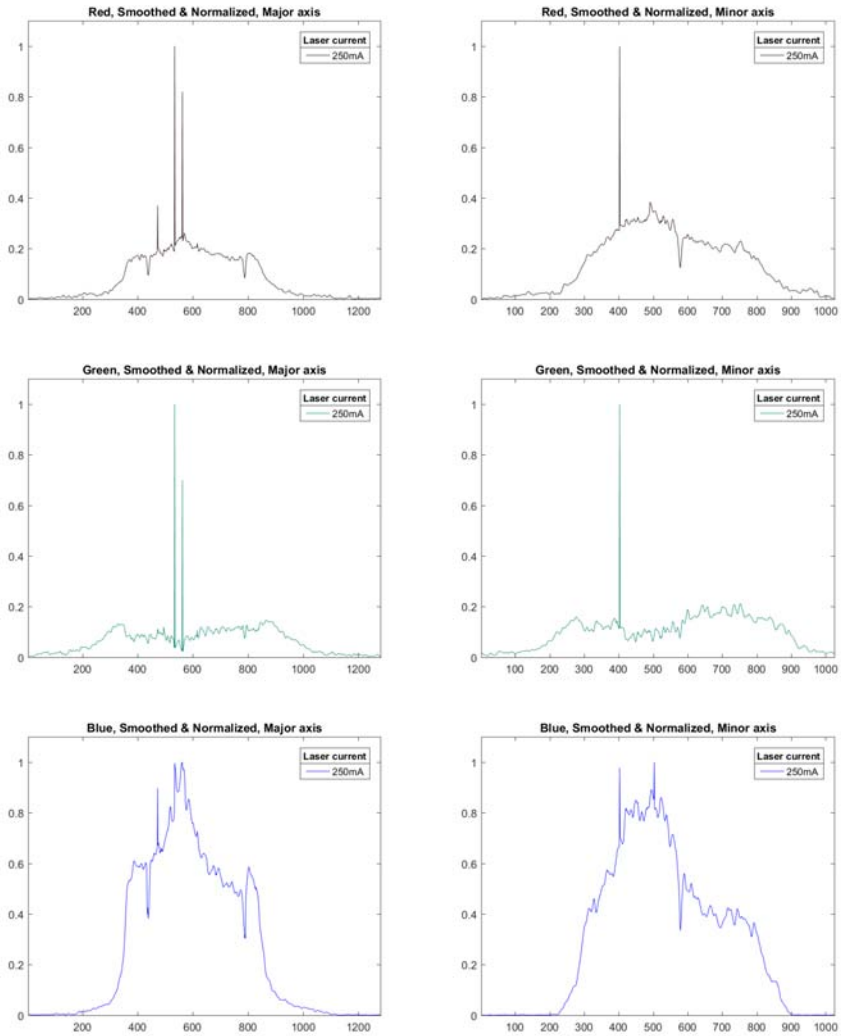
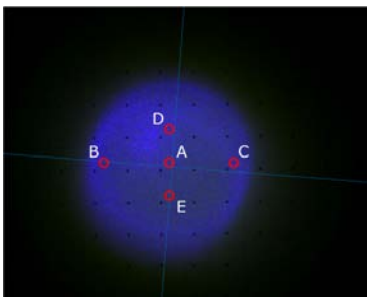


Figura 4.25: Analisi del pellet contenente 3,8% di YAG:Ce^{3+}, con massa totale di 210 mg. In alto a destra, i valori CCT e x,y misurati in corrispondenza di diversi punti del fascio, rappresentati nella figura in alto a sinistra; i grafici successivi mostrano i profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio prodotto con il pellet in questione.



A	B	C	D	E
6571K	12757K	5808K	9001K	5634K
0,3085 x	0,2780 x	0,3247 x	0,2876 x	0,3286 x
0,3493 y	0,2623 y	0,3656 y	0,2941 y	0,4070 y

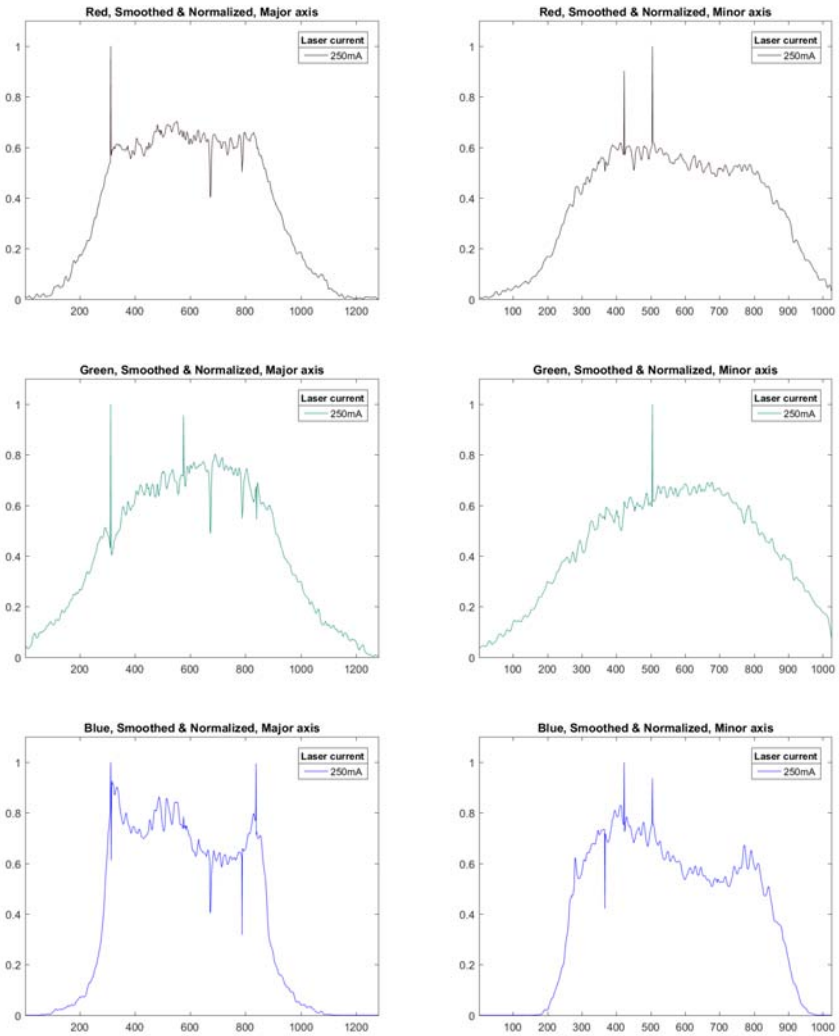
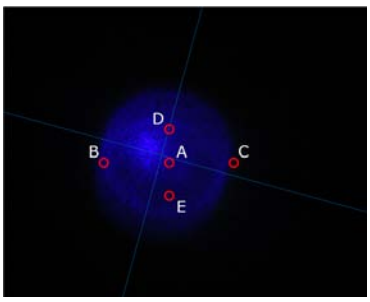


Figura 4.26: Analisi del pellet contenente 3,8% di YAG:Ce^{3+}, con massa totale di 292 mg. In alto a destra, i valori CCT e x,y misurati in corrispondenza di diversi punti del fascio, rappresentati nella figura in alto a sinistra; i grafici successivi mostrano i profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio prodotto con il pellet in questione.



A	B	C	D	E
Undefined	Undefined	5492K	Undefined	7770K
0,2008 x	0,2081 x	0,3330 x	0,2105 x	0,2963 x
0,1054 y	0,1168 y	0,3756 y	0,1144 y	0,3111 y

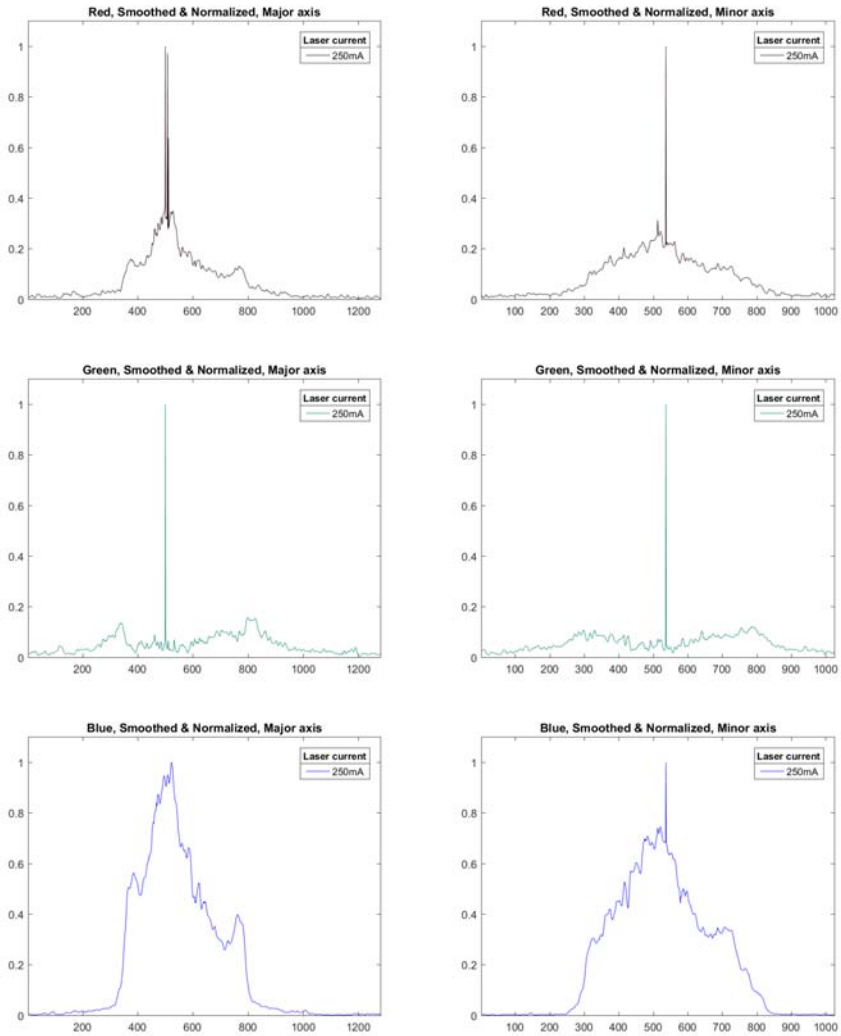
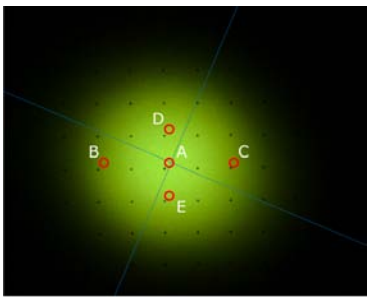


Figura 4.27: Analisi del pellet contenente 5% di YAG:Ce^{3+}, con massa totale di 146 mg. In alto a destra, i valori CCT e x,y misurati in corrispondenza di diversi punti del fascio, rappresentati nella figura in alto a sinistra; i grafici successivi mostrano i profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio prodotto con il pellet in questione.



A	B	C	D	E
4311K	4264K	4246K	4427K	4400K
0,4164 x	0,4047 x	0,4066 x	0,3929 x	0,3944 x
0,5982 y	0,5291 y	0,5323 y	0,5206 y	0,5197 y

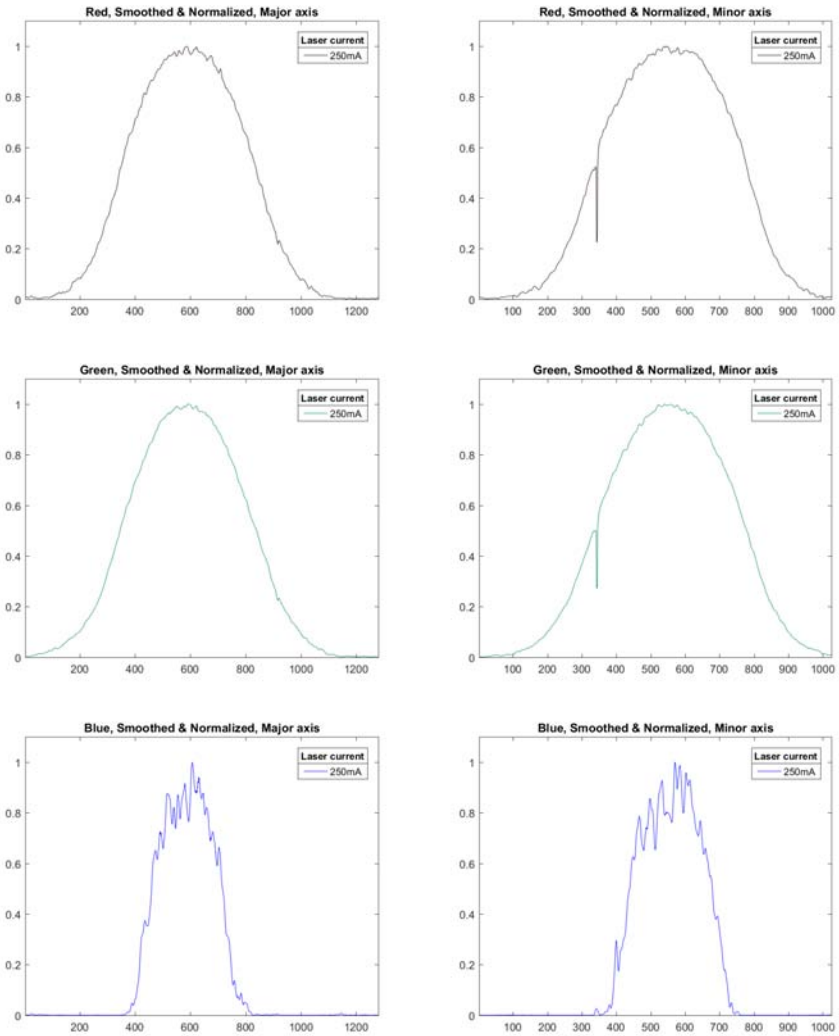


Figura 4.28: Analisi del pellet contenente 5% di YAG:Ce^{3+}, con massa totale di 308 mg. In alto a destra, i valori CCT e x,y misurati in corrispondenza di diversi punti del fascio, rappresentati nella figura in alto a sinistra; i grafici successivi mostrano i profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio prodotto con il pellet in questione.

4.3.2 Osservazioni conclusive

La realizzazione e l'analisi dei pellet in KBr con basse percentuali di YAG:Ce^{3+} permettono di concludere che essi non hanno caratteristiche sufficientemente adeguate per essere utilizzati come fosfori remoti in un sistema LARP in trasmissione. Ciò è dovuto principalmente alla non-omogeneità dei pellet, causata dalla difficoltà di mescolare e di distribuire all'interno della pressa in modo preciso ed uniforme piccole quantità di fosfori con la polvere di sale KBr, la quale tende a formare grumi all'esposizione con l'aria. La non-omogeneità dei pellet si traduce, infatti, in un fascio proiettato non uniforme.

Inoltre, la miscelazione della luce ottenuta utilizzando i pellet come fosfori remoti in trasmissione dipende fortemente dalla percentuale di materiale fosforescente al suo interno e dallo spessore del pellet. Le misure raccolte hanno evidenziato una difficoltà nel trovare una corretta combinazione tra queste caratteristiche dei pellet. Risulta problematico ottenere un pellet che fornisca luce uniforme con un corretta quantità di laser trasmesso rispetto alla luce di luminescenza dei fosfori: mentre risulta relativamente facile ottenere una luce gialla uniforme (pellet spesso con elevata concentrazione di fosfori), risulta difficile ridurre lo spessore (il cui valore minimo è comunque limitato da problemi di stabilità meccanica) in modo controllato, oppure distribuire in modo uniforme un basso quantitativo di fosfori all'interno del pellet. Purtroppo, la tecnologia di realizzazione di pellet impiegata rende difficile il controllo sulla percentuale di fosfori YAG:Ce^{3+}, per via delle piccole quantità in gioco, e dello spessore e dell'uniformità dei pellet, per via delle imperfezioni meccaniche della pressa utilizzata. Lo strumento che applica la pressione alla miscela di polveri risulta non essere sufficientemente affidabile per tale scopo.

Tenendo conto anche dell'elevato assorbimento della luce laser blu da parte del sale KBr, un miglioramento delle prestazioni potrebbe essere ottenuto sostituendo questo materiale, per esempio, con CaF_2, il quale presenta una una maggiore conducibilità termica e trasmissività. Possibili studi futuri possono dunque essere incentrati sullo studio della compatibilità chimico-fisica tra il sale e il materiale luminescente, oppure sull'affidabilità operativa del pellet sottoposto a prolungate esposizioni al fascio laser, allo scopo di studiarne la stabilità termica.

4.4 Considerazioni

La progettazione e l'analisi delle prestazioni del setup in trasmissione mettono in evidenza numerosi aspetti critici di questa configurazione, che vanno risolti per ottenere un sistema di illuminazione LARP pratico con caratteristiche di illuminazione e di affidabilità accettabili:

- In primo luogo, risulta fondamentale utilizzare un fosforo remoto con una precisa trasmissività del fascio laser per garantire un corretto punto di bianco.
- La luminescenza omnidirezionale del fosforo remoto rende difficile raccogliere tutta la luce emessa in un fascio di illuminazione di forma e omogeneità desiderate. Utilizzando una sola lente di proiezione si ottiene una bassa efficienza totale del sistema.
- Lo spot di eccitazione del laser sulla superficie dei fosfori deve essere adeguatamente defocalizzato per non incorrere in un eccessivo surriscaldamento dei fosfori. Il quenching termico, infatti, può limitare la massima potenza di luminescenza operativa, provocando inoltre un degrado graduale nel tempo oppure un radicale danneggiamento dei fosfori con possibile loro distacco dal supporto. Allo stesso tempo, uno spot eccessivamente defocalizzato dà origine ad un fascio di emissione non-omogeneo, con aberrazioni visibili dei modi del diodo laser.
- Alcuni elementi ottici del setup richiedono un posizionamento ed allineamento precisi rispetto al diodo laser per garantire una corretta forma del fascio proiettato.

Alcune di queste problematiche potrebbero essere risolte aumentando la complessità del sistema. Ad esempio, per raccogliere la luce emessa dal fosforo remoto in direzione del diodo laser, si potrebbe progettare un apposito riflettore con un'apertura per permettere il passaggio del fascio laser di eccitazione. Tale riflettore potrebbe direzionare la luce verso la direzione di illuminazione desiderata; tuttavia, sarebbero necessari altri elementi ottici per convogliare la luce riflessa assieme al fascio raccolto dalla lente di proiezione.

La forma circolare del fascio può essere ottimizzata introducendo un diffusore nel cammino ottico tra il diodo laser e il fosforo remoto. Le prove effettuate mostrano che un diffusore standard non è capace di garantire una buona uniformità all'interno del fascio diffuso, portando ad aberrazioni e deformazioni nel fascio di

illuminazione finale. Tuttavia, è stato osservato che un diffusore con superficie ingegnerizzata (come l'Engineered Diffuser di Thorlabs) è in grado di fornire un fascio circolare uniforme grazie alle micro-lenti presenti in superficie. Allo stesso tempo, questo elemento ottico introduce una perdita del 10% della potenza ottica del fascio di eccitazione. Inoltre, i modelli disponibili in commercio presentano un'elevata divergenza in uscita, pari a circa 20°. Di conseguenza, è necessaria una lente adeguata per focalizzare il fascio di eccitazione sul fosforo remoto con le dimensioni desiderate.

Le osservazioni e i risultati ricavati grazie alle prove sul setup in trasmissione costituiscono un utile materiale di base per la progettazione del successivo setup con la configurazione ottica in riflessione. Infatti, alcune problematiche riscontrate (ad esempio, la necessità di non focalizzare in maniera eccessiva il fascio laser sulla superficie dei fosfori) emergono anche durante la realizzazione della seconda tipologia d'illuminatore e possono quindi essere prese in considerazione fin dall'inizio della progettazione. Altre problematiche del setup in trasmissione, in particolare quelle relative alla miscelazione della luce e alla proiezione di luce prodotta con maggiore efficienza, promettono un migliore risultato con il nuovo setup, grazie alle caratteristiche di una configurazione in riflessione.

Capitolo 5

Sistema LARP in riflessione

5.1 Setup ottico in incidenza radente

5.1.1 Descrizione

La progettazione di un setup LARP con configurazione ottica in riflessione rispetto ai fosfori remoti si è basata sulle osservazioni acquisite durante la realizzazione della configurazione in trasmissione. Per ottimizzare le prestazioni del setup in riflessione si è cercato, in particolare, di massimizzare la parte di luce emessa dai fosfori remoti e raccolta dai componenti ottici. Il primo passo verso questo obbiettivo consisteva nella selezione dello specchio più adatto ad essere impiegato come supporto sul quale depositare i fosfori YAG:Ce^{3+}.

Tra gli specchi disponibili presso il fornitore Thorlabs è stato selezionato il modello di specchio dielettrico a banda larga BB05-E02, il quale presenta la migliore riflettività nell'intervallo di lunghezze d'onda del visibile di interesse (Fig. 5.1). Uno specchio dielettrico è realizzato depositando una serie di strati sottili di diversi materiali dielettrici sul substrato; ottimizzando gli spessori e i materiali degli strati dielettrici è possibile ottenere una specifica riflettività in un determinato intervallo di lunghezze d'onda. Il materiale del substrato, silice fusa, è invece lo stesso per tutti gli specchi offerti da Thorlabs, quindi non è stato possibile selezionare uno specchio con una conducibilità termica migliore di altri.

È stato osservato che il metodo di deposizione dei fosfori sullo specchio BB05-E02 con alcol benzilico a basso regime di rotazione dello spin-coater, descritto nel capitolo precedente, permette di ottenere uno strato di fosfori uniforme, con una buona adesione che si mantiene nel tempo. Infatti, un fosforo remoto con una superficie uniforme è necessario per ottenere un'interazione omogenea con il fascio incidente

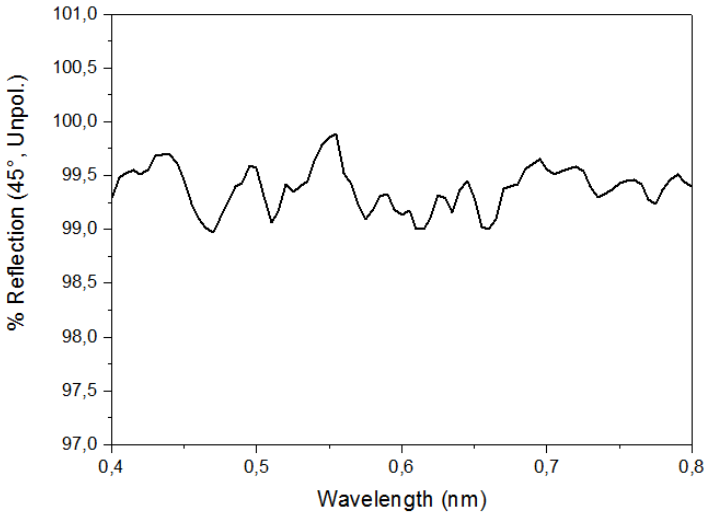


Figura 5.1: Riflettività dello specchio dielettrico a banda larga BB05-E02 di Thorlabs nell'intervallo di lunghezze d'onda del visibile [39].

ed evitare riflessioni in direzioni sfavorevoli, ossia lontano dagli elementi ottici di raccolta di luce, causate da scattering di eventuali agglomerati di particelle fosforo.

Montando il fosforo remoto così realizzato su una cage standard CP11/M di Thorlabs e osservando la luce emessa in seguito all'eccitazione con il fascio laser è stato subito notato un comportamento problematico molto rilevante e limitante per la progettazione successiva del setup in trasmissione: la luce prodotta dai fosfori depositati sullo specchio è altamente divergente, con un'intensa emissione in tutto l'angolo solido sotteso dalla superficie dello specchio, indipendentemente dall'angolo di incidenza del fascio laser. Questo fenomeno comporta in particolare un'elevata difficoltà nel massimizzare la luce emessa che viene raccolta dagli elementi ottici del setup. Si è osservato che il migliore approccio per mitigare questo problema consiste nel posizionare il primo elemento ottico di raccolta di luce ad una distanza molto piccola dal fosforo remoto. Per minimizzare questa distanza conviene orientare il fosforo remoto in modo che il fascio laser di eccitazione incida in modo radente sulla superficie, in quanto solo in questo modo diventa possibile avvicinare l'elemento ottico in prossimità del fosforo remoto senza occultare il cammino del fascio laser (l'elemento ottico o il suo supporto, infatti, hanno tipicamente una larghezza molto maggiore dello spot di eccitazione sui fosfori).

L'eccitazione con incidenza radente del fascio laser è attuabile in quanto, come osservato, la luce prodotta dal fosforo remoto non dipende dall'angolo di incidenza

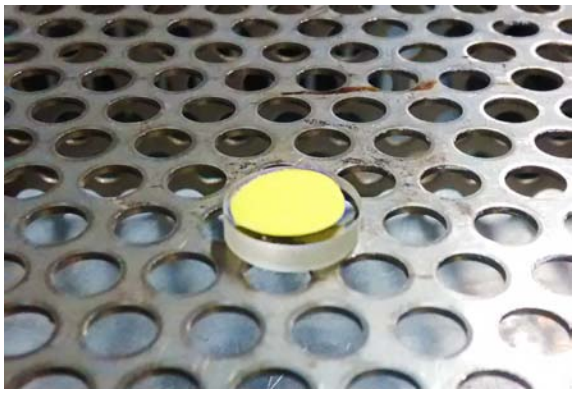


Figura 5.2: Foto dello specchio BB05-E02 su cui è stata effettuata la deposizione del materiale fosforescente tramite alcool benzilico.

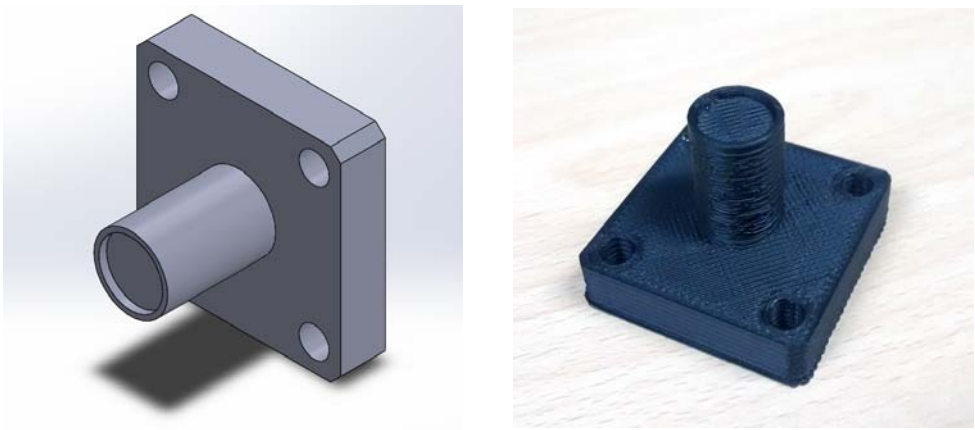
del fascio di eccitazione. Inoltre, la larghezza del fascio, di circa 1 mm, richiede pochissimo spazio tra il fosforo remoto e l'elemento ottico posizionato frontalmente ad esso; di conseguenza è possibile ottenere un angolo di incidenza molto basso congiuntamente ad una piccola distanza dell'ottica di raccolta di luce dal fosforo remoto in modo che la fessura d'ingresso del fascio laser sia sufficiente a farlo passare interamente.

La necessità di ottenere un'incidenza molto radente ha tuttavia introdotto un problema relativo al supporto dello specchio con i fosfori. Infatti, la cage di fissaggio dello specchio utilizza due anelli di ritenzione che devono essere avvitati da entrambi lati dello specchio all'interno della cage per mantenerlo posizionato all'interno del foro di alloggiamento. Questo rende impossibile il posizionamento della superficie del fosforo remoto all'esterno del foro: nel caso migliore la superficie si trova a circa 2 mm all'interno del foro (per via dello spessore dell'anello di ritenzione e dei passi di filettatura richiesti per avvitarlo) e questa distanza è sufficiente ad impedire un'incidenza radente. A titolo di esempio, una stima del minimo angolo di incidenza rispetto alla superficie nel caso di uno spot incidente al centro dello specchio di diametro di mezzo pollice (12,7 mm) con la superficie posizionata a 2 mm dal bordo esterno della cage vale

$$\theta = \arctan\left(\frac{2}{12,7 \div 2}\right) \approx 17,5^\circ$$

Per permettere il posizionamento del fosforo remoto con angoli di incidenza del fascio più bassi, è stato realizzato un supporto apposito tramite una stampante 3D. Il supporto è stato disegnato con il programma Solidworks e consiste in una base

delle dimensioni della cage CP11/M con realizzati fori di fissaggio analoghi, e un cilindro estruso verso l'esterno con un diametro di 2 mm maggiore rispetto a quello dello specchio. Sull'estremità del cilindro è stato realizzato un bordo di 1,5 mm di altezza per il posizionamento dello specchio. In questo modo, lo specchio (alto 6 mm) può essere fissato sull'estremità del cilindro con un materiale adesivo, ottenendo l'esposizione non occultata verso l'esterno della superficie del fosforo remoto.



(a) **(b)**

Figura 5.3: Supporto per il fosforo remoto del setup in riflessione: a) modello disegnato in Solidworks; b) risultato prodotto da una stampante 3D.

Il fosforo remoto così creato, formato dallo specchio con i fosfori depositati e il supporto appositamente realizzato, ha reso possibile la sperimentazione di diverse configurazioni degli elementi ottici nel setup in riflessione, mantenendo invariato il montaggio e la tecnica di collimazione del diodo laser descritti nel capitolo precedente. La combinazione di elementi ottici definitiva adottata nel setup in riflessione è rappresentata in Figura 5.4. La scelta della specifica configurazione ottica si è basata su alcune problematiche emerse da ciascuna iterazione costruttiva del setup, illustrate nel seguito.

In primo luogo, l'incidenza radente del fascio di eccitazione comporta una significativa deformazione dello spot di eccitazione, il quale, invece di essere localizzato su un'area quasi puntuale di pochi millimetri quadrati, tende ad allungarsi per via dell'inclinazione della superficie del supporto. Per diminuire questo effetto, è necessario utilizzare una lente di focalizzazione per diminuire la larghezza dello spot di eccitazione, che per l'appunto risulta essere eccessivamente grande nel caso di fascio incidente semplicemente collimato.

Inoltre, uno spot di eccitazione allungato e stretto produce inevitabilmente delle aberrazioni in uscita dalle ottiche di collimazione poste davanti al fosforo remoto

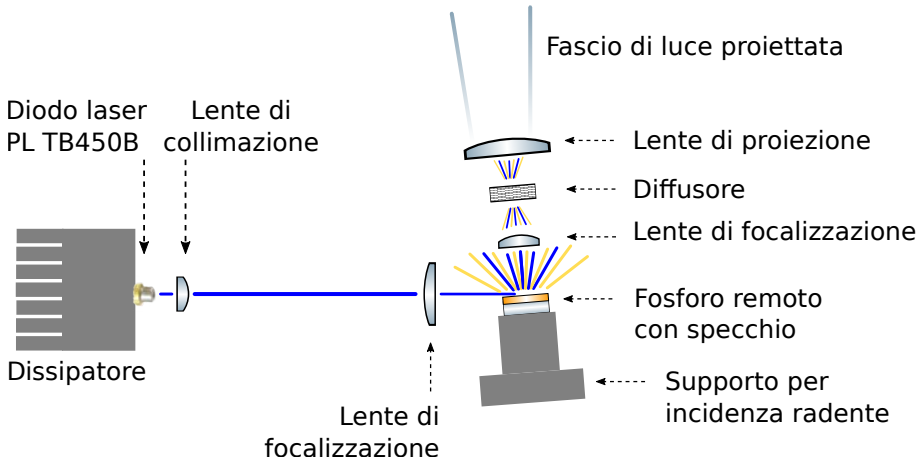


Figura 5.4: Schema del setup ottico in riflessione realizzato in laboratorio.

per proiettare la luce emessa. In effetti, pur posizionando con precisione queste ottiche in modo parallelo e allineato per una corretta propagazione dei raggi ottici, la non-uniformità del profilo del fascio proiettato risulta comunque evidente. La soluzione adottata per risolvere questo problema consiste nell'utilizzo di un diffusore Engineered Diffuser ED1-C20 di Thorlabs, che fornisce in uscita un fascio circolare miscelato in modo uniforme grazie al pattern di micro-lenti presente sulla sua superficie di incidenza. Tuttavia, per via delle considerazioni ottiche descritte nel capitolo precedente, l'elevata divergenza di 20° della luce prodotta da questo diffusore pone delle limitazioni sulla divergenza e la dimensione del fascio proiettato dalla lente di collimazione che segue il diffusore. In pratica, è necessario che il fascio di luce incidente sul diffusore sia sufficientemente piccolo per ottenere alla fine un fascio poco divergente. Visto che lo spot di emissione dei fosfori è notevolmente largo, è necessaria una lente di focalizzazione per proiettare la luce emessa dai fosfori su uno spot di dimensioni ridotte sul diffusore. Considerando questo requisito, assieme all'esigenza di posizionare la lente vicino alla superficie dei fosfori per minimizzare le perdite di luce non raccolta, la lente impiegata deve avere una lunghezza focale corta, come la lente C240TME-A utilizzata.

Infine, un'ulteriore lente è necessaria per proiettare tutta la luce in uscita dal diffusore in un fascio poco divergente e uniforme. A tale scopo è stata utilizzata la medesima lente di proiezione del setup in trasmissione descritto nel capitolo precedente.

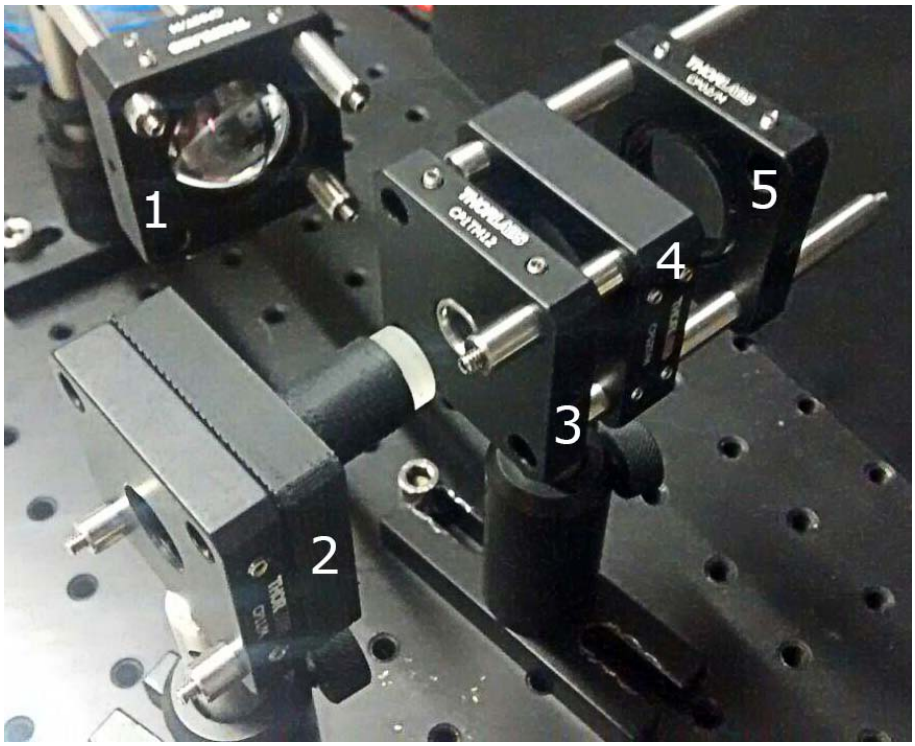


Figura 5.5: Foto di una porzione del setup realizzato in laboratorio: 1) lente di focalizzazione; 2) supporto per il fosforo remoto stampato in 3D; 3) lente di collimazione; 4) diffusore con superficie ingegnerizzata; 5) lente di proiezione.

5.1.2 Caratterizzazione

La metodologia impiegata per l'analisi delle prestazioni del setup ottico in riflessione segue, per quanto riguarda l'analisi colorimetrica del fascio proiettato dal sistema, quella adottata per la caratterizzazione del setup in trasmissione . La caratterizzazione è stata quindi realizzata acquisendo tramite il microscopio DinoLite le immagini del fascio proiettato su un foglio bianco con una griglia di punti di riferimento, per diverse livelli di polarizzazione del diodo laser (250 mA, 300 mA, 350 mA, 400 mA, 450 mA e 500 mA). Sono state quindi eseguite le seguenti operazioni di analisi delle immagini:

- si sono ricavate le direzioni degli assi principali della sezione del fascio proiettato, utili per ricavare le dimensioni della sezione;
- lungo entrambi gli assi sono stati acquisiti i profili delle componenti R, G, B delle immagini, previa loro elaborazione con algoritmo *smoothing* di Perona-Malik;
- i profili relativi ad ogni livello di polarizzazione del diodo laser sono stati integrati per confrontare l'incremento relativo delle componenti di colore all'aumentare dell'intensità di eccitazione del fosforo remoto; analogamente, sono stati calcolati gli integrali delle immagini totali per ottenere una stima del comportamento L-I.

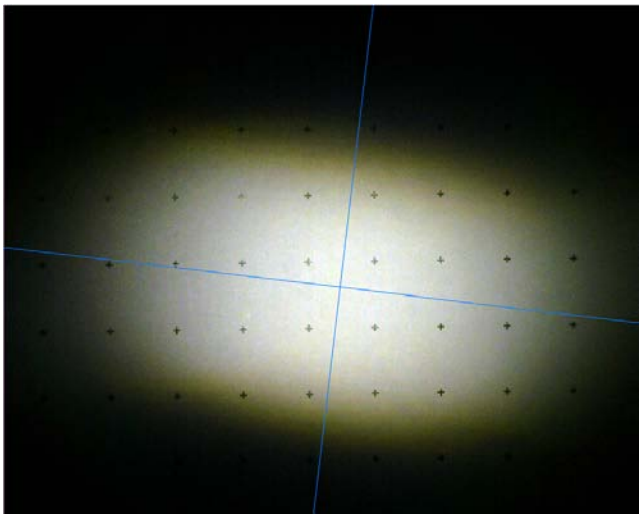


Figura 5.6: Spot d'illuminazione generato sul foglio di riferimento dal sistema in riflessione con diodo laser pilotato a 500 mA, con gli assi principali dello spot.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche del fascio, dalla Figura 5.6 si può osservare che la sezione del fascio ha una forma ellittica corrispondente alla forma allungata dello spot di eccitazione sul fosforo remoto, causata per lo più dall'inclinazione radente di quest'ultimo rispetto al fascio laser. Al fine di individuare l'area del fascio sono stati applicati degli *threshold* di intensità all'immagine del fascio convertita in scala di grigi (relativa alla corrente di 500 mA), corrispondenti al 50% e al 10% dell'intensità massima dell'immagine. A partire da queste immagini elaborate, sono state ricavate le direzioni degli assi principali, illustrate in figura, e le relative dimensioni del fascio. Le dimensioni ottenute, così come la divergenza totale del fascio, sono indicate in tabella 5.1 per due diversi valori di *threshold* dell'immagine, rispettivamente del 50% (FWHM) e 10% dell'intensità massima.

	Soglia di intensità	
	50%	10%
Lunghezza asse maggiore	5.73 cm	9.70 cm
Lunghezza asse minore	5.32 cm	8.63 cm
Divergenza media	5.94°	9.88°

Tabella 5.1: Caratteristiche geometriche del fascio per diverse soglie di intensità

I profili normalizzati delle componenti R, G, B delle immagini del fascio ricavati per diverse correnti del diodo laser sono illustrati in Figura 5.7. Si può osservare che i profili di tutte le componenti sono sostanzialmente simmetrici rispetto al proprio centro, sia per l'asse maggiore che per quello minore. Inoltre, si nota che la forma dei profili R, G, e B tende ad allargarsi all'aumentare della corrente del diodo laser, e questo comportamento è più evidente lungo l'asse maggiore.

Osservando i profili R, G, B sovrapposti dell'immagine relativa alla corrente di 500 mA (Fig. 5.8) è possibile effettuare un confronto sulle caratteristiche del colore del fascio rispetto al setup in trasmissione (Figura 4.11 a pagina 135). Infatti, nel caso del setup in riflessione, l'intensità del profilo blu è inferiore a quella dei profili rosso e verde, mentre nel setup in trasmissione la componente blu era particolarmente dominante, a causa dell'elevata componente di segnale relativa al diodo laser. In effetti, la luce del fascio ottenuto con il setup in riflessione appare molto più calda rispetto al setup precedente.

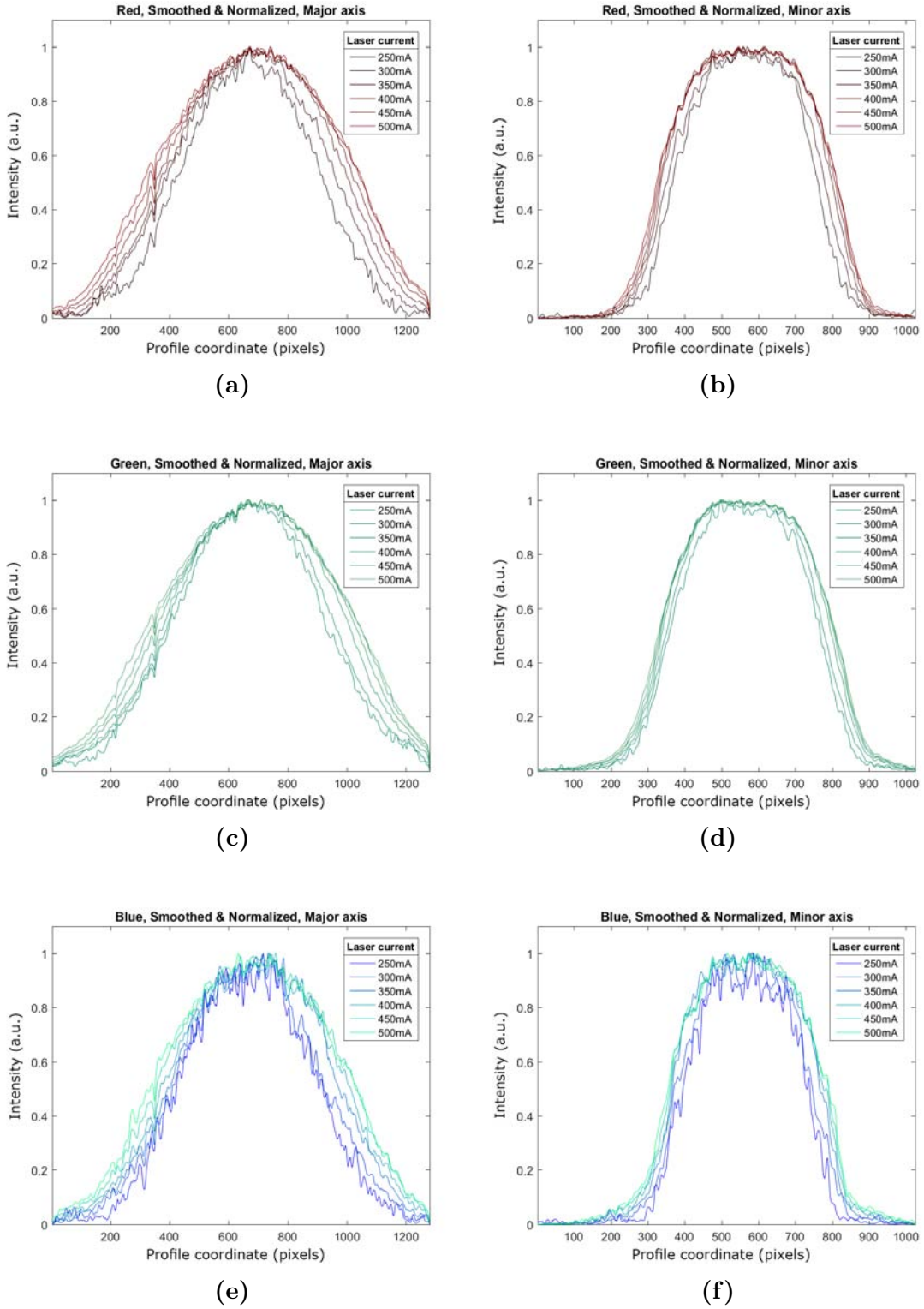
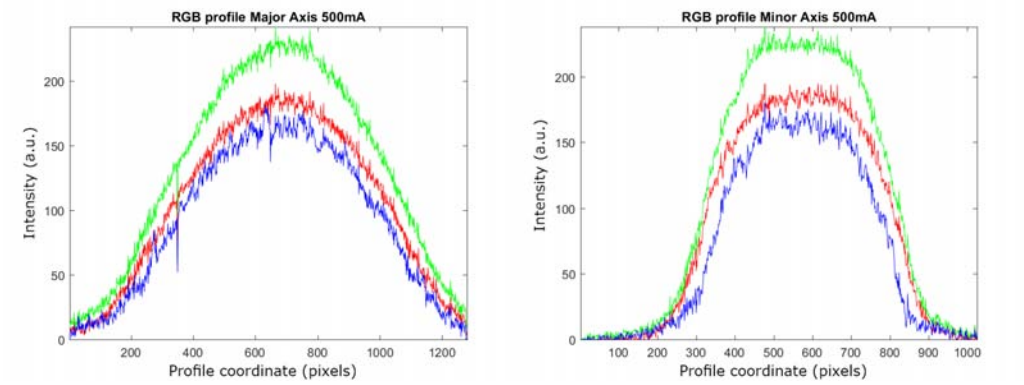
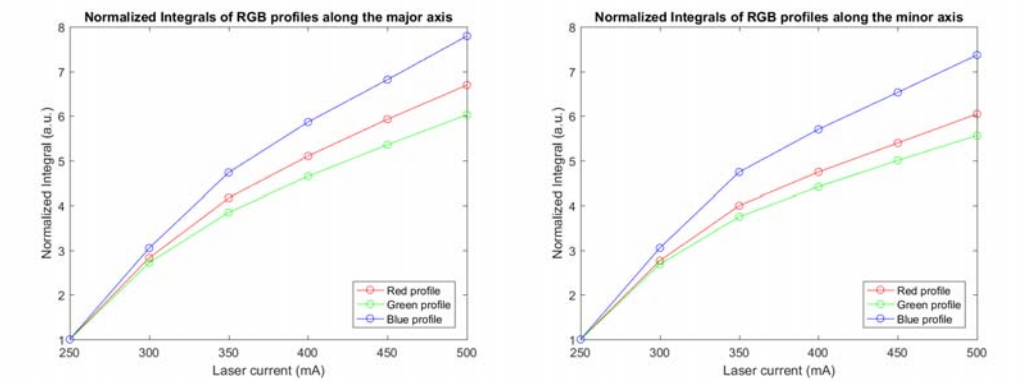


Figura 5.7: Profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio emesso dal prototipo in riflessione.



(a) **(b)**

Figura 5.8: Profili RGB lungo i due assi principali per una polarizzazione pari a 500mA.



(a) **(b)**

Figura 5.9: Integrali normalizzati dei profili RGB lungo i due assi principali.

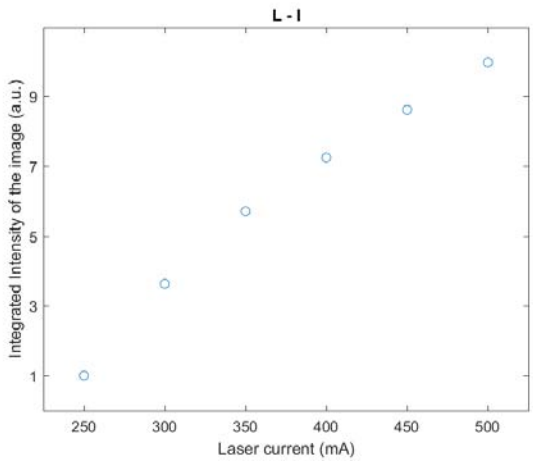


Figura 5.10: Stima della relazione L-I.

Per valutare la temperatura di colore del fascio di questo setup è stato utilizzato un approccio diverso da quello impiegato per il setup in trasmissione. In questo caso non è stata effettuata la misura in sfera integratrice LMS-650; a causa della difficoltà di racchiudere questo setup in un involucro che non permettesse la fuoriuscita di luce non raccolta dagli elementi ottici e di posizionarlo all'interno della sfera. Di conseguenza, il fascio è stato analizzato tramite una sfera integratrice OceanOptics FOIS-1 [25] collegata ad uno spettrometro USB4000 tramite una fibra ottica. Lo spettrometro USB4000 permette di acquisire ed analizzare spettri nell'intervallo 300-800 nm con un'elevata ampiezza del segnale (saturazione a circa 60000 conteggi). Il sistema di misura così ottenuto è stato calibrato con una lampada di calibrazione di OceanOptics in modo da poter acquisire ed elaborare gli spettri di irradianza assoluta tramite il programma SpectraSuite. La sfera è stata posizionata lungo diversi punti della sezione del fascio proiettato con una corrente del diodo laser di 500 mA. I valori di CCT e delle coordinate x, y del diagramma di cromaticità relativi ai vari punti misurati sono riportati in Figura 5.11. Si può quindi confermare che la luce proiettata dal sistema in riflessione ha delle caratteristiche cromatiche adeguate a scopi di illuminazione, in quanto il valore CCT del fascio si aggira intorno a 4200-4600 K. Tuttavia, va notata una non irrilevante deviazione cromatica tra il centro del fascio ed i suoi bordi, in particolare lungo gli assi principali.

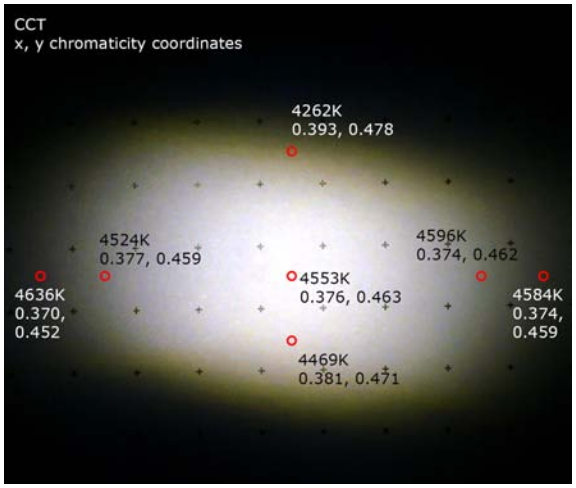


Figura 5.11: Grandezze colorimetriche CCT e coordinate x,y misurate tramite una sfera integratrice in alcuni punti dello spot del fascio proiettato su un foglio di riferimento, sovrapposte ad un'immagine dello spot ad una corrente di 500 mA.

5.1.3 Considerazioni

Le analisi del setup ottico realizzato indicano che la configurazione in riflessione per un sistema LARP permette di ottenere un buon punto di bianco del fascio proiettato, migliorando notevolmente il risultato rispetto al setup in trasmissione, pur utilizzando il medesimo metodo di deposizione dei fosfori su substrato. Tuttavia, anche in questo caso la miscelazione del colore tra la luce laser e la luminescenza dei fosfori dipende dallo spessore dei fosfori depositati. Di conseguenza, l'ottimizzazione del colore proiettato è legata al processo di realizzazione del fosforo remoto, con le relative limitazioni del metodo adottato.

Alcuni aspetti critici della configurazione del setup realizzato possono essere evidenziati. Innanzitutto, questo setup possiede una notevole complessità, in quanto utilizza numerosi elementi ottici che, per via dell'incidenza radente del laser sul fosforo remoto, devono essere posizionati in modo accurato al fine di ottenere un fascio proiettato uniforme.

Inoltre, un problema fondamentale è dato dall'emissione della luce di luminescenza dei fosfori in tutto l'angolo solido sotteso. Con le ottiche impiegate in questo setup, risulta difficile raccogliere un'elevata quantità di luce emessa dal fosforo remoto, con una conseguente perdita di efficienza totale del sistema. Riguardo questo aspetto, un possibile studio ulteriore potrebbe riguardare il profilo di emissione di luce nello spazio da parte del fosforo remoto realizzato, al variare dell'angolo di incidenza del fascio laser di eccitazione, allo scopo di valutare la migliore direzione per il posizionamento delle ottiche di proiezione.

In alternativa, una configurazione simile potrebbe diventare più efficiente e compatta se venisse realizzata una lente di proiezione personalizzata, che raccolga una maggiore porzione di luce dal fosforo remoto e che allo stesso tempo imprima una forma corretta al fascio. In effetti, tale soluzione è adottata in alcuni sistemi LARP di alto livello citati nello stato d'arte.

La soluzione alternativa per massimizzare l'efficienza del sistema in riflessione consiste invece nell'utilizzo di un riflettore parabolico per la proiezione della luce, posizionando il fosforo remoto nel fuoco della parabola. Questa soluzione è stata studiata e descritta nella sezione seguente.

5.2 Setup con riflettore parabolico

5.2.1 Descrizione

Come discusso nella sezione precedente, un grande problema della configurazione in riflessione di un sistema LARP consiste nell'emissione di luce su tutto l'angolo solido da parte del fosforo remoto. Una soluzione a questo problema consiste nel posizionare il fosforo remoto realizzato con substrato riflettente nel punto focale di un riflettore parabolico, il quale può così proiettare la grande maggioranza della luce emessa e riflessa in un fascio uniforme.

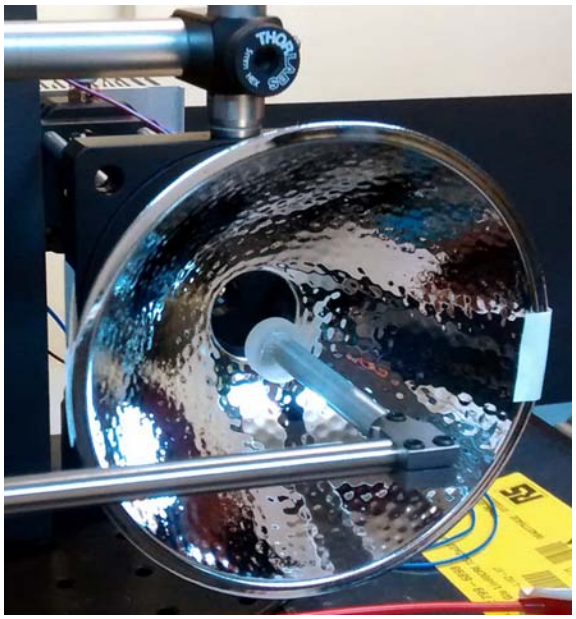


Figura 5.12: Dettaglio del setup con riflettore parabolico, con il fosforo remoto montato su un sistema di pali di supporto.

Per studiare questa soluzione, è stato realizzato un setup ottico utilizzando un riflettore parabolico disponibile in commercio (Fig. 5.12). Questo riflettore ha un diametro esterno di 90 mm e un'altezza di 40 mm ed una distanza focale (stimata, data l'assenza di un vero e proprio datasheet) di 12.66 mm. Il riflettore presenta un foro di ingresso del diametro di circa 20 mm, attraverso il quale viene fatto passare il fascio laser per poi andare ad incidere perpendicolarmente sulla superficie del fosforo remoto. Quest'ultimo è lo stesso fosforo remoto impiegato nel setup in riflessione descritto all'inizio di questo capitolo. Lo specchio di supporto del fosforo remoto è stato fissato tramite biadesivo su un sistema di pali di diametro di 4 mm (v. Fig. 5.12) che consentono di posizionare il fosforo remoto lungo l'asse del riflettore,

con la superficie luminescente alla distanza focale della parabola. Si noti che lo specchio di supporto che costituisce il fosforo remoto ha un diametro di 12.7 mm, minore del foro di ingresso del riflettore parabolico. Allo stesso tempo, il fascio laser che attraversa il foro è collimato e non focalizzato, con delle dimensioni di circa 1 x 3 mm alla superficie del fosforo remoto. Di conseguenza, il foro d'ingresso del riflettore parabolico è eccessivamente grande rispetto alla dimensione del fascio laser, ma anche rispetto all'area del fosforo remoto. Questo causa una notevole perdita di luce di luminescenza attraverso il foro di ingresso, a dimostrazione della necessità di utilizzare un riflettore più adeguato, che verrà discusso in seguito.

5.2.2 Caratterizzazione

La luce proiettata dal setup realizzato è stata analizzata con lo stesso metodo impiegato per i setup precedenti.

L'analisi della sezione del fascio proiettato su un foglio di riferimento (Fig. 5.13) posto ad una distanza di 33 cm dall'estremità del riflettore parabolico ha fornito le stime delle dimensioni del fascio riportate in Tabella 5.2. Si osservi che in questo caso il concetto di divergenza perde il suo significato, in quanto la forma del fascio proiettato è legata alla forma del riflettore parabolico, e quindi non originata da una sorgente approssimabile ad una puntiforme.

	Soglia di intensità	
	50%	90%
Lunghezza asse maggiore	6.7 cm	11.1 cm
Lunghezza asse minore	5.4 cm	8.8 cm

Tabella 5.2: Caratteristiche geometriche del fascio per diverse soglie di intensità

La forma del fascio ottenuto non è perfettamente circolare: ciò è dovuto alla forma allungata dello spot del fascio laser incidente sui fosfori. Tuttavia, il fascio proiettato è molto uniforme e simmetrico. Inoltre, alla distanza a cui è stato posto il foglio di riferimento, nel fascio proiettato non risultata visibile alcuna ombra dei pali di supporto del fosforo remoto, nonostante lo spessore non trascurabile. Questo fenomeno è probabilmente dovuto al grande diametro esterno e alla profondità del riflettore parabolico, che permettono a numerosi raggi, provenienti da direzioni diverse, di compensare l'occultazione creata dai pali di sostegno.

Le figure 5.13 e 5.14 riportano le misure colorimetriche di alcuni punti della sezione del fascio proiettato dal setup in corrispondenza di una corrente del diodo laser di 500 mA. Questi dati sono stati acquisiti dal sistema con sfera integratrice FOIS-1,

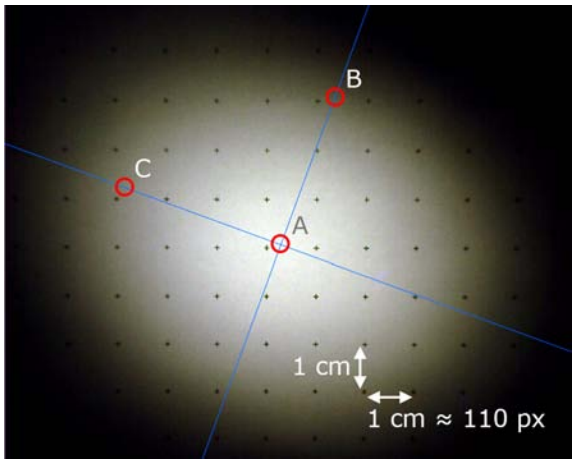
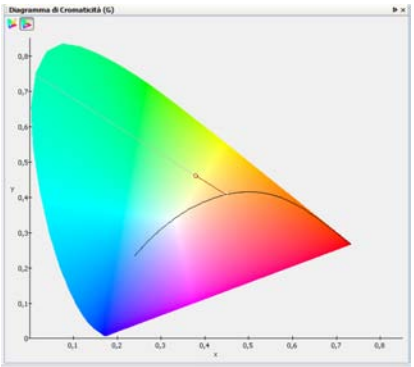


Figura 5.13: Spot d'illuminazione generato sul foglio di riferimento dal sistema con riflettore parabolico con diodo laser pilotato a 500 mA. In figura sono evidenziati gli assi principali dello spot.

	A	B	C
CCT	4495K	4382K	4476K
x	0,3791	0,3895	0,3831
y	0,4657	0,4897	0,4825

(a)



(b)

Figura 5.14: A sinistra, grandezze colorimetriche CCT, x, y dei punti del fascio A, B, C (in Fig. 5.13) ricavata con il software SpectraSuite dalle misure con sfera integratrice; a destra, rappresentazione delle coordinate relative al centro del fascio (punto A) nel diagramma x, y, assieme all'indicazione del locus planckiano.

con apertura d'ingresso ridotta a un diametro di circa 2 mm, collegata allo spettrometro USB4000 tramite una fibra ottica, ed elaborate dal software SpectraSuite. Da queste misure emergono valori CCT vicini a 4500 K, mentre i bordi estremi del fascio sono risultati essere leggermente più gialli, come indicato dai valori y relativi ai punti B e C, rispetto al centro (A).

Le figure successive illustrano le analisi svolte sulle immagini del fascio proiettato sul foglio di riferimento, al variare della corrente del diodo laser. In particolare, i profili normalizzati delle componenti R, G, B lungo i due assi principali (Fig. 5.15) confermano la simmetria del fascio e un aumento e allargamento simili per le tre componenti all'aumentare dell'intensità di eccitazione, analogamente a quanto os-

servato nel precedente setup in riflessione. Si può notare come la componente blu per basse intensità di corrente del diodo laser sia più rumorosa e meno uniforme rispetto alle componenti R e G. Inoltre, come si osserva dalla Figura 5.18, gli integrali del profilo blu del fascio lungo i due assi, subiscono un aumento molto maggiore di quanto avviene per i profili del rosso e verde, all'aumentare della corrente del diodo laser. Questo comportamento potrebbe essere dato dal fatto che, per intensità di eccitazione minori, la luce del laser è principalmente riflessa perpendicolarmente alla superficie del fosforo remoto, attraverso il foro di ingresso e, di conseguenza, il riflettore parabolico raccoglie solamente una piccola parte di radiazione. Invece, si può supporre che, all'aumentare dell'intensità del laser, la luce laser non assorbita venga diffusa in modo più uniforme dalle particelle del materiale luminescente, facendo in modo che essa si rifletta su tutta la superficie utile del riflettore parabolico, offrendo un maggiore contributo relativo nel fascio proiettato per correnti del laser piu elevate.

La stima della relazione tra la luminosità del fascio proiettato e la corrente del laser (Fig. 5.18) risulta essere più lineare rispetto al caso del setup descritto all'inizio di questo capitolo (v. Fig. 5.18). La spiegazione di tale comportamento richiede ulteriori investigazioni con misure più precise, ad esempio con un'apposita sfera integratrice. Tuttavia, come nelle analisi precedenti, è possibile ipotizzare che la deviazione dal comportamento lineare sia dovuta all'auto riscaldamento del diodo laser o del fosforo remoto ad alte intensità di eccitazione.

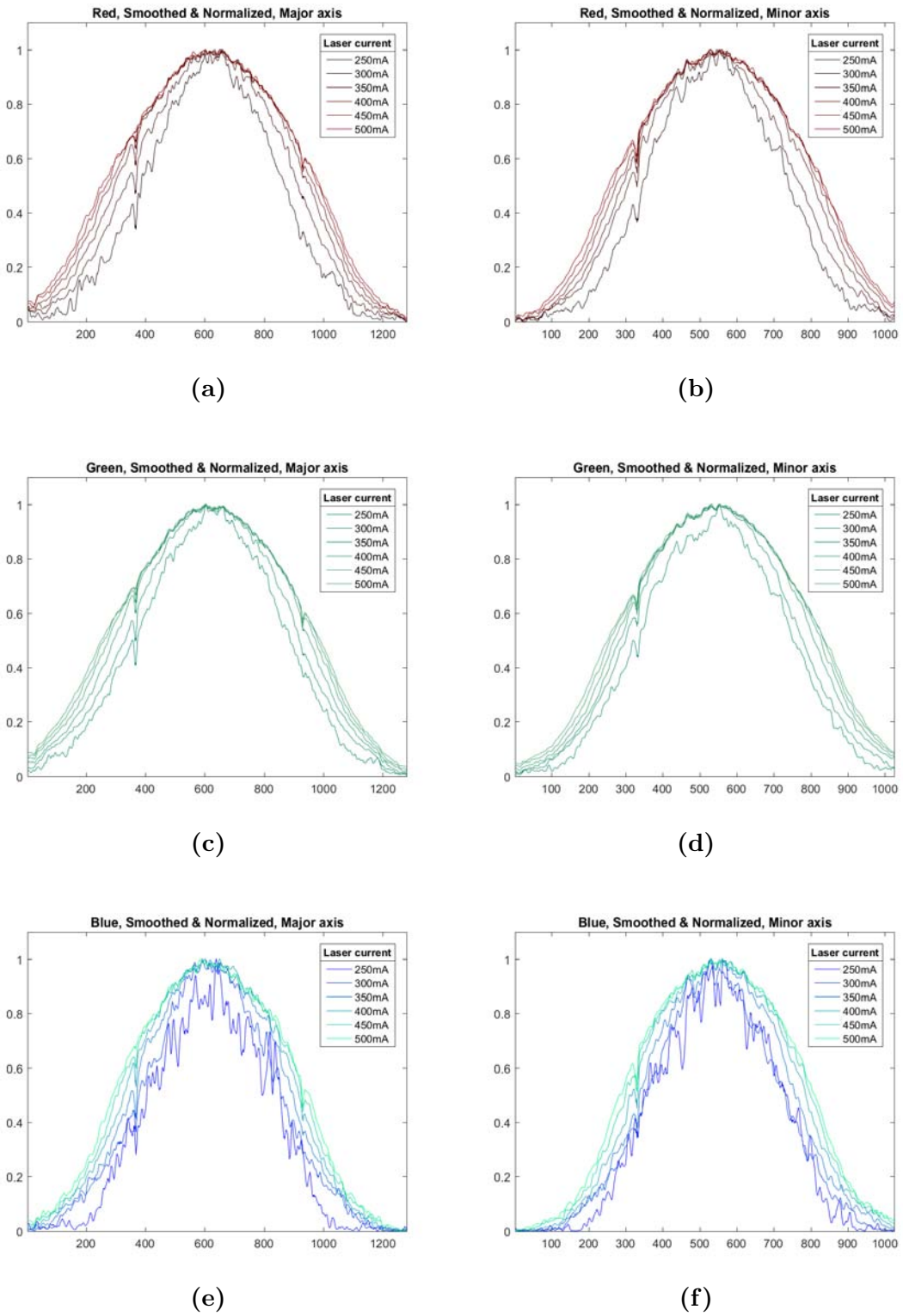
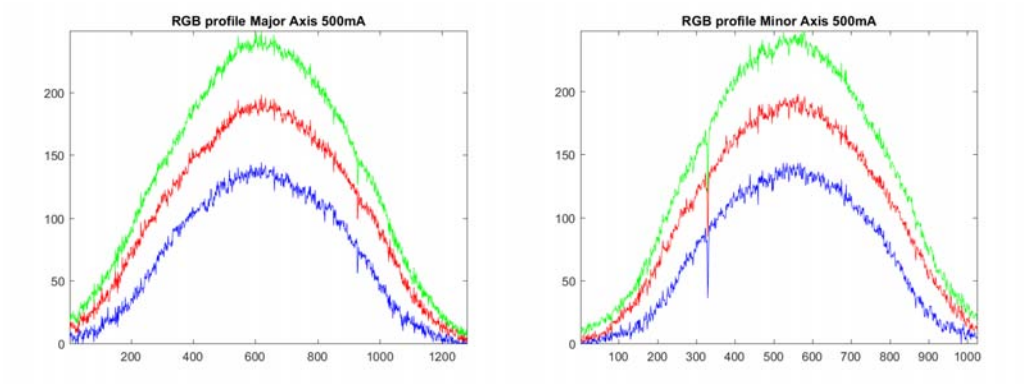
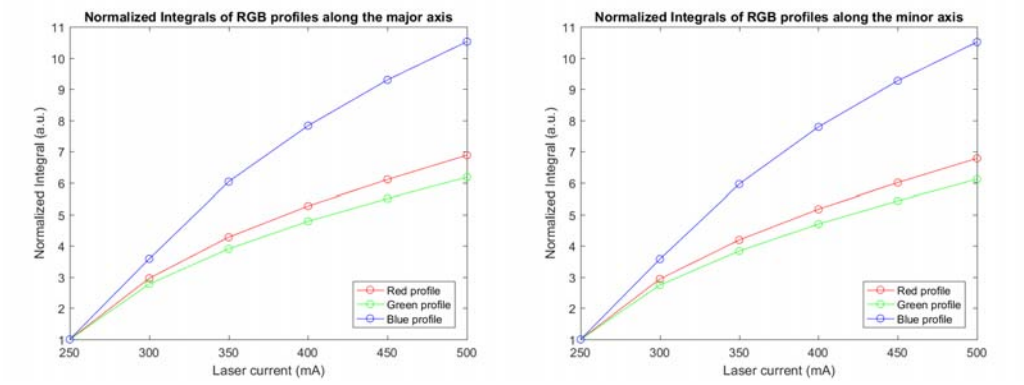


Figura 5.15: Profili dei colori R, G, B lungo gli assi maggiore e minore del fascio emesso da setup in trasmissione.



(a) **(b)**

Figura 5.16: Profili RGB lungo i due assi principali in condizioni di corrente del diodo laser di 500mA.



(a) **(b)**

Figura 5.17: Integrali normalizzati dei profili RGB lungo i due assi principali.

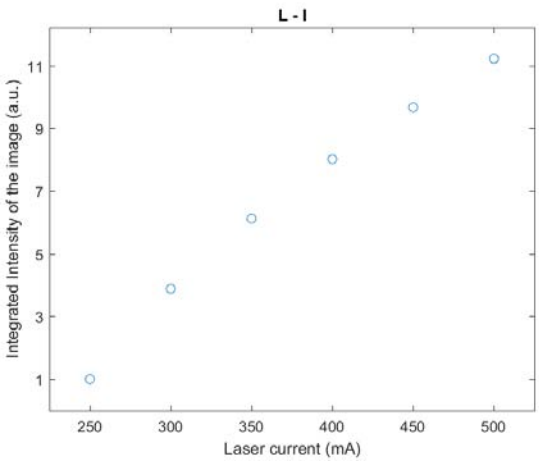


Figura 5.18: Stima della relazione L-I.

5.2.3 Considerazioni

La realizzazione del setup in riflessione con l'integrazione di un riflettore parabolico commerciale ha permesso di confermare il migliore color-mixing della luce proiettata da questo tipologia di sistema LARP rispetto ad una configurazione in trasmissione. Il vantaggio aggiuntivo del riflettore parabolico consiste in una maggiore uniformità del fascio proiettato e nell'utilizzo di un minore numero di elementi ottici per la manipolazione del fascio laser incidente sul fosforo remoto.

Un ulteriore vantaggio di questo sistema è stato ipotizzato, ossia quello di una maggiore efficienza ottenuta raccogliendo con il riflettore parabolico la luce originata dal fosforo remoto (idealmente in tutto l'angolo solido). Tuttavia, alcune problematiche di questo sistema hanno impedito di valutare questa ipotesi in modo quantitativo. In effetti, il fascio proiettato da questo setup non è sufficientemente stretto perché la sua potenza ottica possa essere misurata in modo corretto da una sfera integratrice. Dato che la dimensione del fascio è legata al diametro esterno del riflettore parabolico, una soluzione sarebbe quella di utilizzare un riflettore parabolico di diametro minore. Tuttavia, effettuando delle prove con un riflettore più piccolo, è stato osservato che esiste un problema di compatibilità con il fosforo remoto: i riflettori disponibili in commercio con diametro di pochi centimetri hanno tipicamente una forma stretta, con una distanza focale molto corta; il fosforo remoto utilizzato, del diametro di 12.7 mm, non può essere posizionato nel fuoco della parabola, per via dell'inferiore diametro della parabola nel punto di interesse. In alternativa, se posizionato in prossimità del fuoco, il fosforo remoto occupa una percentuale elevata della sezione del riflettore, occultando così la proiezione della luce verso l'esterno. Per questo motivo, il fosforo remoto dovrebbe essere realizzato con un substrato riflettente più piccolo.

Le problematiche legate alla dimensione del riflettore parabolico impongono la realizzazione di un riflettore parabolico personalizzato, con caratteristiche adeguate alle necessità di un sistema LARP. Questo riflettore deve avere una distanza focale tale per cui la relativa parabola abbiaun corpo sufficientemente allargato, capace di contenere il fosforo remoto. In particolare, è possibile dimensionare la distanza focale in funzione della sezione della parabola all'altezza del fuoco, in modo da ottenere una determinata percentuale di occultazione del fascio proiettato da parte del fosforo remoto. Inoltre, il riflettore parabolico può avere un'altezza pari, o poco superiore, alla distanza focale, in quanto l'emissione della luce dalla superficie del fosforo remoto avviene solo in un semipiano. Grazie all'allargamento della parabola,

un tale riflettore risulterebbe molto compatto, riducendo le dimensioni dell'intero sistema. Infine, un riflettore personalizzato permetterebbe di dimensionare il foro di ingresso del fascio laser di eccitazione. Realizzando un foro sufficientemente piccolo, si potrebbe minimizzare la quantità di luce di luminescenza persa attraverso tale fenditura.

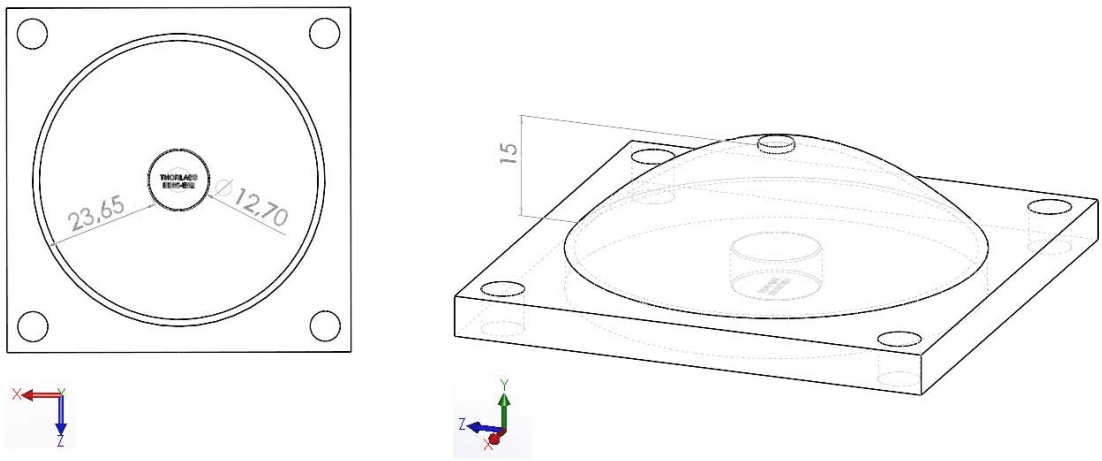


Figura 5.19: Modello Solidworks di un riflettore parabolico personalizzato, con la rappresentazione dello specchio Thorlabs BB05-E02 nell'eventuale collocazione del fosforo remoto. A sinistra, vista frontale; a destra, vista prospettica.

La Figura 5.19 illustra un modello CAD impiegabile per la realizzazione di un riflettore parabolico personalizzato, dotato delle caratteristiche discusse sopra, e di un'estrusione aggiuntiva corrispondente al foro d'ingresso. Tale modello può essere stampato con una stampante 3D, al fine di realizzare il corpo del riflettore tramite termoformatura di un materiale plastico sulla superficie esterna della parabola. Lo stampo ottenuto può infine essere rivestito internamente con una vernice metallica al fine di rendere la superficie parabolica riflettente. Il modello in figura rappresenta un paraboloide con una distanza focale di 15 mm, alla quale è possibile collocare la superficie del fosforo remoto. Poiché l'altezza del paraboloide in questo caso coincide con la sua distanza focale, il diametro esterno del riflettore risulta essere di 60 mm. Considerando che il diametro dello specchio di substrato del fosforo remoto è pari a 12.7 mm, ne risulta che la percentuale di area di proiezione del fascio occultata dallo

specchio vale circa 4,5 %. Un valore di occultazione del 10% si verificherebbe nel caso di un riflettore con un diametro esterno di 40 mm, ossia avente distanza focale di 10 mm. In conclusione, è possibile progettare riflettori personalizzati più piccoli pur mantenendo limitata l'occultazione del fascio proiettato da parte del fosforo remoto. Infine, ricordiamo che la realizzazione di un riflettore apposito permetterebbe di creare uno stretto foro d'ingresso per il fascio laser d'eccitazione, minimizzando così le perdite della luce di luminescenza attraverso questo foro.

Un problema pratico ulteriore consiste nella modalità di posizionamento del fosforo remoto alla distanza focale del riflettore. Infatti, un prototipo reale richiede la progettazione di un supporto per il fosforo remoto capace di essere fissato sul riflettore, in modo simile allo *spider* di un telescopio. Un requisito importante di questo sistema meccanico è che i suoi bracci di sostegno abbiano una lunghezza tale da poter posizionare il fosforo remoto esattamente nel punto focale, minimizzando al contempo l'oscuramento.

Infine, uno studio più approfondito va fatto in merito alla dipendenza tra la miscelazione del colore del fascio proiettato e il processo di realizzazione del fosforo. In effetti, lo spessore della polvere di materiale luminescente depositata sullo specchio influisce in maniera pensante sull'assorbimento e sulla diffusione del fascio laser incidente. Di conseguenza, per ottenere uno specifico punto di bianco del fascio, è necessario utilizzare un metodo di realizzazione del fosforo remoto che permetta di ottenere uno strato di luminescenza omogeneo e preciso.

Capitolo 6

Conclusioni finali

Il lavoro di questa tesi concerne la realizzazione di sistemi LARP basati su diodi laser e fosfori remoti finalizzati all'impiego in applicazioni d'illuminazione ad alta efficienza. L'obbiettivo principe dell'attività svolta prevede la validazione, in termini di affidabilità e realizzabilità pratica, di questa recente tecnologia di illuminazione. I vantaggi teorici dell'approccio LARP rispetto alle tecnologie di illuminazione attuali (in particolare quelle basate su LED) sono infatti fortemente promettenti, sia in termini di prestazioni e risparmio energetico, sia per quanto riguarda l'utilità e la flessibilità delle possibili implementazioni. Tuttavia, perché tale tecnologia penetri nel mercato è richiesta un'indagine approfondita delle nuove problematiche che essa pone, problematiche presenti sia a livello di singolo componente (diodo laser, materiale fosforescente, ottiche di proiezione della luce) che a livello di sistema (color-mixing, riscaldamento indotto, integrazione in un sistema pratico). L'attività svolta durante questa tesi ha permesso di affrontare in modo globale tali importanti aspetti, e, infine, di trovare delle soluzioni concretamente attuabili in risposta alle criticità riscontrate.

La prima parte dell'attività di tesi è stata incentrata sullo studio del materiale fosforescente, necessario ai fini della generazione di luce bianca a partire da una sorgente di radiazione monocromatica con emissione nel blu. Attraverso la realizzazione di appositi setup di caratterizzazione ottica, è stato indagato come il materiale luminescente YAG:Ce^{3+}, comunemente impiegato nei sistemi d'illuminazione a stato solido basati su conversione fosforica, modifichi le proprie caratteristiche di fotoemissione in seguito all'esposizione ad elevate temperature di esercizio. Tale comportamento è stato innanzitutto quantificato sottoponendo il materiale a prolungati stress puramente termici in appositi forni a muffola ad elevata temperatura, con lo scopo

di osservare il degrado permanente indotto in esso a lungo termine. Successivamente, la stabilità della luminescenza è stata verificata in diverse condizioni operative tramite l'eccitazione con fascio laser ad elevata intensità. Complessivamente, i dati raccolti hanno mostrato come il fosforo YAG:Ce^{3+} non subisca danni significativi per temperature inferiori a 550°C. Tuttavia, esso presenta un evidente comportamento di quenching della luminescenza in presenza di un intenso fascio di eccitazione o di temperature di esercizio superiori a 550°C. Di conseguenza, gli esperimenti svolti sottolineano l'importanza del garantire un'adeguata dissipazione alle particelle di fosfori attraverso l'impiego di materiali adeguati per il substrato di supporto e di metodi di realizzazione del fosforo remoto che tengano conto di questo aspetto. In assenza di questi accorgimenti un sistema LARP non è in grado di operare in modo affidabile con i parametri di potenza ottica ed efficienza ad esso richiesti.

L'attività di studio è poi proseguita con la progettazione e realizzazione del sistema di alimentazione e controllo del diodo laser. Poiché durante il normale funzionamento tale dispositivo subisce un autoriscaldamento che può inficiare sia l'efficienza complessiva dell'illuminatore sia la stabilità delle proprietà colorimetriche della luce proiettata, è stato deciso di implementare un controllo in feedback relativo alla temperatura del dispositivo che agisse in maniera congrua al metodo di dissipazione scelto. Il funzionamento dell'illuminatore richiede inoltre un sistema elettronico di alimentazione del diodo laser che includa la possibilità di variare in modo lineare l'intensità del fascio emesso. Questi aspetti sono stati considerati per la progettazione e la realizzazione di una PCB con un sistema elettronico basato su un microprocessore PIC programmato per comandare, tramite protocollo I2C, un circuito buck di controllo di corrente del diodo laser opportunamente dimensionato per operare con una tensione di ingresso pari a 12 V.

Lo studio dei sistemi LARP è successivamente proseguito con l'integrazione dei diversi componenti precedentemente caratterizzati in un prototipo d'illuminatore con configurazione in trasmissione. Durante questa fase, sono state analizzate le configurazioni ottimali degli elementi ottici del sistema, in particolare delle lenti per la collimazione e la focalizzazione del fascio laser di eccitazione e del fascio proiettato. Le misure delle prestazioni e delle caratteristiche luminose del setup realizzato hanno messo in evidenza in particolare le problematiche legate all'efficienza di raccolta della luce prodotta dal fosforo remoto e al color-mixing (tra il fascio laser e la luminescenza dei fosfori). Nello specifico, avendo evidenziato come quest'ultimo fenomeno dipenda strettamente dal metodo di realizzazione del fosforo remoto stesso, allo scopo di ottimizzare il colore prodotto dall'illuminatore nella configurazione in trasmissione,

è stata valutata la possibilità di realizzare il fosforo remoto tramite creazione di pellet composti da un'apposita mistura, opportunamente dosata e pressata, di polveri KBr e YAG:Ce^{3+}. Lo studio relativo ai pellet creati mostra che l'impiego del sale KBr non fornisce una sufficiente uniformità spaziale necessaria all'utilizzo in sistemi LARP. Tale soluzione rimane tuttavia fruibile nel caso in cui venisse impiegato un sale sostitutivo più adatto, quale ad esempio CaF_2.

Infine, è stata eseguita l'analisi di un sistema LARP basato su una configurazione in riflessione in due diverse varianti: una prima che impiega delle lenti per la proiezione del fascio, ed una seconda che ricorre invece ad un riflettore parabolico. Quest'ultima configurazione si è dimostrata capace di fornire buoni risultati per quanto riguarda il punto di bianco del fascio proiettato, permettendo allo stesso tempo, grazie al riflettore, di raccogliere e re-indirizzare una maggiore porzione di luce emessa dal fosforo remoto. Allo scopo di migliorare le prestazioni di questa soluzione, è stato infine proposto il modello di riflettore parabolico custom, il quale, una volta realizzato, dovrebbe sopperire alle incompatibilità dimensionali tra il fosforo remoto ed i riflettori commercialmente disponibili utilizzati in fase di studio.

In conclusione, l'analisi svolta in questa sede sulla tecnologia LARP ne ha dimostrato le potenzialità grazie a prototipi funzionali, pur evidenziando numerose problematiche inerenti alla realizzazione pratica di un sistema di illuminazione. Tale lavoro porge un vasto insieme di conoscenze riguardanti la necessità di ottimizzazione ottica e termica delle singole componenti del sistema, la cui soluzione può permettere alla tecnologia LARP di raggiungere elevate prestazioni per potenze in ingresso elevate, offrendo una migliore alternativa ad altre tecnologie di illuminazione nelle relative applicazioni.

Bibliografia

[1] Aníbal De Almeida, Bruno Santos, Bertoldi Paolo, and Michel Quicheron. "solid state lighting review – potential and challenges in europe". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34:30 – 48, 2014.

[2] Volker Bachmann, Cees Ronda, and Andries Meijerink. Temperature Quenching of Yellow Ce3+ Luminescence in YAG:Ce. *Chemistry of Materials*, 21(10):2077–2084, 2009.

[3] Barco. *DP4K-60L - Ultra-bright 6P laser cinema projector for premium large screens*. `https://www.barco.com/en/Products/Projectors/Digital-cinema-projectors/Ultra-bright-6P-laser-cinema-projector-for-premium-large-screens.aspx#!` Visitato il 20/07/2016.

[4] C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, and B. Roth. Lighting with laser diodes. *Advanced Optical Technologies*, 2:313–321, August 2013.

[5] S. Bhushan and M. V. Chukichev. "temperature dependent studies of cathodoluminescence of green band of zno crystals". *Journal of Materials Science Letters*, 7(4):319–321, 1988.

[6] G. Blasse and B.C. Grabmaier. *Luminescent Materials*. Springer, 1994.

[7] Jian Chen, Yangai Liu, Lefu Mei, Haikun Liu, Minghao Fang, and Zhaohui Huang. Crystal structure and Temperature-Dependent Luminescence Characteristics of KMg4(PO4)3:Eu2+ phosphor for White Light-emitting diodes. *Scientific Reports*, 5(9673), 2015.

[8] Reuven Chen and Stephen W. S. McKeever. *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific Press, 1997.

[9] Christie. *Laser phosphor projection*. https://www.christiedigital.com/emea/display-technology/laser-projection/laser-phosphor-projection. Visitato il 20/07/2016.

[10] Larry A. Coldren, Scott W. Corzine, and Milan L. Mashanovitch. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. Wiley, 2nd edition, 2012.

[11] Kristin A. Denault, Michael Cantore, Shuji Nakamura, Steven P. DenBaars, and Ram Seshadri. Efficient and stable laser-driven white lighting. *AIP Advances*, 3(7), 2013.

[12] Steven P. DenBaars, Daniel Feezell, Shuji Nakamura, et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays. *Acta Materialia*, 61(3):945 – 951, 2013.

[13] Zhou Guo-Hua, Bao Bo-Cheng, Xu Jian-Ping, and Jin Yan-Yan. Dynamical analysis and experimental verification of valley current controlled buck converter. *Chinese Physics B*, 19(5):050509, 2010.

[14] Brian Henderson and George Francis Imbusch. *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids*. Oxford University Press, 2006.

[15] Intematix. *Intematix - Phosphor Materials*. http://www.intematix.com/products/led-phosphors. Visitato il 26/07/2016.

[16] Jason Torchinsky. *How BMW's New Laser Headlights Will Work And Not Kill You*. http://jalopnik.com/how-bmws-new-laser-headlights-will-work-and-not-kill-y-1521586271. Visitato il 14/07/2016.

[17] John Kenkel. *Analytical Chemistry for Technicians*. CRC Press, 3rd edition, 2003.

[18] Jong Kyu Kim and E. Fred Schubert. Transcending the replacement paradigm of solid-state lighting. *Opt. Express*, 16(26):21835–21842, Dec 2008.

[19] Microchip. *MCP47FEB21 Datasheet*. http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP47FEB21. Visitato il 31/08/2016.

[20] Microchip. *MCP9808 Datasheet*. http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP9808. Visitato il 31/08/2016.

[21] Microchip. *PIC12F1822 Datasheet*. http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC12F1822. Visitato il 31/08/2016.

[22] Shuji Nakamura and Gerhard Fasol. *The Blue Laser Diode*. Springer, 1997.

[23] Newport. *Newport Technical Note: Focusing and Collimating*. https://www.newport.com/n/focusing-and-collimatings. Visitato il 12/08/2016.

[24] NXP Semiconductors. *UM10204 - I 2C-bus specification and user manual*. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. Visitato il 31/08/2016.

[25] Ocean Optics. *FOIS-1 Integrating Sphere*. http://oceanoptics.com/product/fois-1-integrating-sphere/. Visitato il 10/10/2016.

[26] Osram. *PL TB450B Datasheet*. http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/blue-laser/index.jsp. Visitato il 31/08/2016.

[27] Panasonic. *PT-RZ470 product description - Long-Lasting Reliability and High Picture Quality*. http://panasonic.net/avc/projector/products/rz470/features1.html. Visitato il 19/07/2016.

[28] Han-Youl Ryu and Dae-Hwan Kim. High-brightness phosphor-conversion white light source using ingan blue laser diode. *J. Opt. Soc. Korea*, 14(4):415–419, Dec 2010.

[29] A. Salimian, G. R. Fern, H. Upadhyaya, and J. Silver. Laser Diode Induced Lighting Modules. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 5, 2016.

[30] Schäfter + Kirchhoff GmbH. *Optics, Metrology and Photonics*. http://www.sukhamburg.com/products/collimation.html. Visitato il 12/08/2016.

[31] E. F. Schubert. *Light-Emitting Diodes*, page 353. Cambridge University Press, 2nd edition, 2006.

[32] E. F. Schubert, J. K. Kim, H. Luo, and J.-Q. Xi. Solid-state lighting - a benevolent technology. *Reports on Progress in Physics*, 69:3069–3099, December 2006.

[33] E. Fred Schubert and Jong Kyu Kim. Solid-State Light Sources Getting Smart. *Science*, 308(5726):1274–1278, 2005.

[34] Sony. *Why Sony's 3LCD Laser Light Source Projector?* http://pro.sony.com/bbsc/ssr/show-projectors/resource.solutions.bbsccms-assets-show-projectors-laserprojectorslandingpage.shtml. Visitato il 20/07/2016.

[35] Sparkfun. *I2C Tutorial*. https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c. Visitato il 31/08/2016.

[36] Setsuhisa Tanabe, Shunsuke Fujita, Satoru Yoshihara, Akihiko Sakamoto, and Shigeru Yamamoto. *YAG glass-ceramic phosphor for white LED (II): luminescence characteristics*, volume 5941, pages 594112–594112–6. 2005.

[37] Texas Instruments. *Synchronous Buck Controllers for Precision Dimming LED Drive Evaluation Module Board*. http://www.ti.com/tool/tps92641evm. Visitato il 31/08/2016.

[38] Texas Instruments. *TPS9264x Synchronous Buck Controllers for Precision Dimming LED Drivers*. http://www.ti.com/product/TPS92640. Visitato il 31/08/2016.

[39] Thorlabs. *Sito Thorlabs*. https://www.thorlabs.de. Visitato il 20/07/2016.

[40] Jeffrey Y. Tsao, Mary H. Crawford, Michael E. Coltrin, Arthur J. Fischer, Daniel D. Koleske, Ganapathi S. Subramania, G. T. Wang, Jonathan J. Wierer, and Robert F. Karlicek. Toward smart and ultra-efficient solid-state lighting. *Advanced Optical Materials*, 2(9):809–836, 2014.

[41] Tydex Optics. *Materials for Transmission Optics*. http://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/. Visitato il 10/10/2016.

[42] Jumpei Ueda, Pieter Dorenbos, Adrie J. J. Bos, Andries Meijerink, and Setsuhisa Tanabe. Insight into the Thermal Quenching Mechanism for Y3Al5O12:Ce3+ through Thermoluminescence Excitation Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(44):25003–25008, 2015.

[43] Jonathan J. Wierer, Jeffrey Y. Tsao, and Dmitry S. Sizov. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting. *Laser & Photonics Reviews*, 7(6):963–993, 2013.

[44] Jonathan J. Wierer, Jeffrey Y. Tsao, and Dmitry S. Sizov. The potential of III-nitride laser diodes for solid-state lighting. *physica status solidi (c)*, 11(3-4):674–677, 2014.

[45] Rong-Jun Xie et al. *Nitride Phosphors and Solid-State Lighting.* CRC Press, 2011.

[46] Y. Xu, H. Hu, W. Zhuang, G. Song, Y. Li, and L. Chen. "white light emission from ultraviolet laser diode". *Laser Physics*, 19(3):403–406, 2009.

[47] Yun Xu, Lianghui Chen, Yuzhang Li, Guofeng Song, Yuping Wang, Weidong Zhuang, and Zhen Long. "phosphor-conversion white light using ingan ultraviolet laser diode". *Applied Physics Letters*, 92(2), 2008.

[48] S. Ye, F. Xiao, Y.X. Pan, Y.Y. Ma, and Q.Y. Zhang. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 71(1):1 – 34, 2010.

[49] William M. Yen, Shigeo Shionoya, and Hajime Yamamoto. *Phosphor Handbook.* CRC Press, 2nd edition, 2006.

[50] A. Zukauskas et al. *Introduction to Solid-State Lighting.* Wiley, 2002.