

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**SISTEMA AD ELEVATA
IRRADIANZA BASATO SU
TECNOLOGIA SOLID STATE
LIGHTING: STUDIO E
SVILUPPO**

RELATORE: dott. Nicola Trivellin (Dipartimento di Ingegneria Industriale)

CORRELATORE: prof. Matteo Meneghini

LAUREANDO: Alberto Pizzolato 1178634

A.A. 2018-2019



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**SISTEMA AD ELEVATA
IRRADIANZA BASATO SU
TECNOLOGIA SOLID STATE
LIGHTING: STUDIO E
SVILUPPO**

RELATORE: dott. Nicola Trivellin (Dipartimento di Ingegneria Industriale)

CORRELATORE: prof. Matteo Meneghini

LAUREANDO: Alberto Pizzolato 1178634

A.A. 2018-2019

A chi mi ha supportato durante questo percorso.

Indice

1	Introduzione	1
2	La tecnologia LED: proprietà e struttura	3
2.1	Ricombinazione radiativa	3
2.2	Ricombinazione non radiativa	5
2.2.1	Ricombinazione attraverso livelli profondi	6
2.2.2	Ricombinazione Auger	7
2.3	Efficienza della sorgente	7
2.3.1	Efficienza quantica interna	7
2.3.2	Efficienza di iniezione	8
2.3.3	Efficienza di estrazione	8
2.3.4	Efficienza totale della sorgente	12
2.4	Caratteristica luce-corrente	12
2.5	Modello ABC	13
2.6	Calo di efficienza alle alte correnti (efficiency droop)	14
2.7	Spettro di emissione	16
2.8	Principali materiali	18
2.8.1	AlGaInP	19
2.8.2	InGaN	19
3	Ottiche	23
3.1	Confronto ottica TIR e riflettore	23
3.2	Legge di Snell	25
3.3	Ottica TIR	26
3.3.1	Funzionamento dell'ottica e cenni di progettazione	26
3.4	Costruzioni di Huygens	28
4	Descrizione setup di misura principali	31
4.1	Caratterizzazione ottica	31
4.1.1	La sfera integratrice	31
4.1.2	Lo spettrometro OceanOptics USB2000	32
4.2	Irradianza planare	33
4.2.1	La tavola xy	33

5	Caratterizzazione delle sorgenti e ottiche	35
5.1	Individuazione dei componenti principali	35
5.1.1	Scelta delle sorgenti	35
5.2	Scelta delle ottiche	35
5.3	Caratterizzazione in sfera integratrice	37
5.3.1	Sorgenti in banda royal blue	39
5.3.2	Sorgenti in banda rosso/IR	40
5.3.3	Discussione dei risultati ottenuti	41
5.4	Misura dell'efficienza con ottica montata	42
5.5	Considerazioni conclusive	43
6	Caratterizzazione con tavola xy	45
6.1	Procedura di misura	45
6.2	Risultati con l'ottica CRYSTAL MINE	45
6.2.1	Irradianza	45
6.2.2	Potenza ottica	47
6.2.3	Efficienza complessiva	48
6.2.4	Densità di potenza	49
6.3	Risultati con l'ottica LEIA-S	50
6.3.1	Irradianza	50
6.3.2	Potenza ottica	52
6.3.3	Efficienza complessiva	53
6.3.4	Densità di potenza	53
6.4	Conclusioni	54
7	Realizzazione prototipo	57
7.1	Modello ottica CRYSTAL MINE	57
7.1.1	Costruzione del modello	57
7.1.2	Confronto dati di misura e simulatore	58
7.2	Costruzione Prototipo	59
7.2.1	Definizione specifiche e scelte di progetto	59
7.2.2	Progetto prototipo	60
7.2.3	Simulazione prototipo	63
7.2.4	Progettazione PCB	63
7.2.5	Realizzazione prototipo	64
7.3	Misure di irradianza con tavola xy	65
7.3.1	Sorgenti royal blue XPGDRY-L1-601	65
7.3.2	Sorgenti Infrarosse L1I0-0940150	69
7.4	Commenti sui dati presentati	72
8	Prove di riscaldamento	75
8.1	Campione 1: cubo di PMMA	75
8.1.1	Riscaldamento con prototipo IR	76
8.1.2	Riscaldamento con prototipo royal blue	76
8.1.3	Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza	77
8.1.4	Confronto tra prova con prototipo royal blue e IR	77
8.2	Campione 2: fetta di pane bianco	78

8.2.1	Riscaldamento con prototipo IR	79
8.2.2	Riscaldamento con prototipo royal blue	79
8.2.3	Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza	80
8.3	Campione 3: fetta di pane integrale	81
8.3.1	Riscaldamento con prototipo IR	81
8.3.2	Riscaldamento con prototipo royal blue	81
8.3.3	Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza	81
8.4	Campione 4: cioccolato fondente	83
8.4.1	Riscaldamento con prototipo IR	83
8.4.2	Riscaldamento con prototipo royal blue	83
8.4.3	Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza	84
8.5	Prova di cottura uovo	85
8.6	Commento e confronto sulle prove fatte	86
8.7	Grafici completi del cubo di PMMA	88
9	Conclusioni	89
	Bibliografia e Sitografia	91

Capitolo 1

Introduzione

Questa tesi illustra le nozioni teoriche e le fasi concrete che hanno portato alla progettazione e alla realizzazione di un sistema di irraggiamento ad alta intensità. L'obiettivo principale è quello di utilizzare delle sorgenti irradianti ad alta efficienza e alta potenza e ottiche di collimazione secondarie già disponibili sul mercato per ottenere un valore di elevata irradianza in un'area ristretta, in modo che ci sia la possibilità di ottenere un vantaggio anche in termini di riscaldamento.

Un fattore che ha reso possibile lo sviluppo di questo progetto è sicuramente la crescente diffusione di dispositivi ad alta potenza e il loro notevole miglioramento in efficienza e affidabilità. Con il rapido sviluppo negli ultimi vent'anni della produzione di chip LED, package e dei processi di sviluppo è stata migliorata significativamente la performance dei moduli, la loro efficienza luminosa, la stabilità termica, le loro dimensioni sono state ridotte. Con riferimento alla figura 1.1, si nota come nel 2006 un modulo LED ad alta potenza emettente 1 W presentava un rivestimento esterno di lato fino a 10 mm mentre ora sono disponibili chip di dimensioni pari a 1.6 mm di lato emettenti fino a 6 W. Parallelamente allo sviluppo



Figura 1.1: Trend di sviluppo della tecnologia Solid State Lighting [21]

della tecnologia si è sentita l'esigenza di controllare e indirizzare l'emissione della luce (altrimenti isotropa) in modo da migliorare ulteriormente l'efficienza luminosa. Si sono sviluppate e commercializzate quindi un numero sempre crescente di ottiche secondarie (ad esempio mostrate in figura 1.2) in modo da venire incontro alle prin-

cipali esigenze di collimazione della potenza irradiata. Lo sviluppo in parallelo di



Figura 1.2: Esempio di ottiche commerciali [28]

moduli LED e di ottiche secondarie ha reso questa tecnologia estremamente versatile e adattabile a nuovi campi. L'uso di moduli basati su SSL dà inoltre la possibilità di avere un controllo estremamente preciso e rapido della potenza uscente agendo sulla corrente di polarizzazione. In questa applicazione specifica, è possibile realizzare un controllo efficiente della potenza uscente se, acquisendo in maniera just-in-time la temperatura (ad esempio tramite un termometro a infrarossi o una termocamera) si sviluppa un anello di retroazione.

Il lavoro di tesi è dunque articolato in due parti: la prima, teorica, analizza i principi ottici alla base della tecnologia SSL e illustra l'interazione tra sorgente luminosa e ottica secondaria allo scopo di creare un sistema che coniughi l'efficienza alla massima potenza ottica disponibile; la seconda illustra invece le fasi che hanno portato alla definizione e alla realizzazione di un primo prototipo, nonché i dati raccolti delle misure effettuate e alcune prove di riscaldamento per testarne le potenzialità.

Capitolo 2

La tecnologia LED: proprietà e struttura

Il meccanismo alla base del funzionamento del LED è l'emissione spontanea. Il processo prevede che un elettrone, a seguito di un passaggio da un livello energetico superiore ad uno inferiore (decadimento), possa emettere la differenza di energia sotto forma di quanto di energia elettromagnetica (fotone). Poichè il processo è casuale, è necessario confinare in una zona relativamente piccola una grande quantità di elettroni: per questo motivo risulta conveniente utilizzare una struttura "a diodo". A differenza però di un comune diodo, un LED presenta la caratteristica di trasformare elettroni iniettati in fotoni emessi nello spazio libero, pertanto risulta fondamentale tenere in considerazione non solo i meccanismi che generano i fotoni ma anche l'estrazione della luce generata verso l'esterno del dispositivo.

2.1 Ricombinazione radiativa

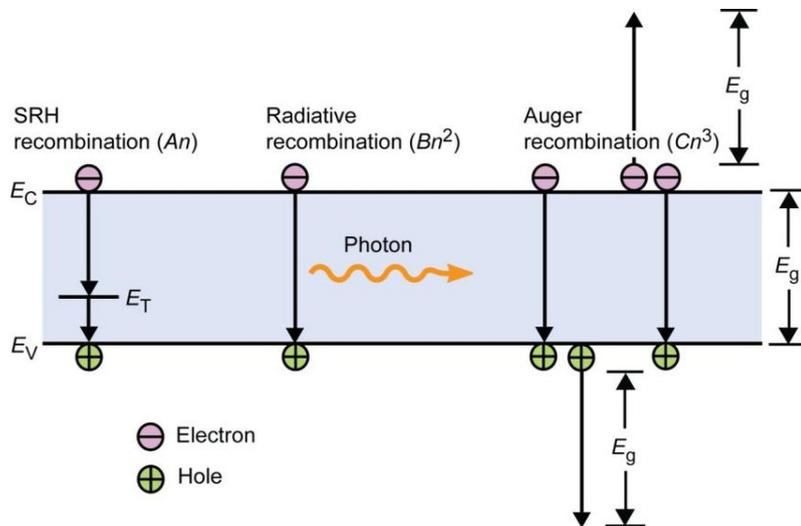


Figura 2.1: Ricombinazione di tipo SHR, radiativa e Auger [1]

La ricombinazione di tipo radiativo è il processo che avviene quando un fotone è emesso a seguito della perdita di energia dovuta alla ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna.

Considerato quindi un semiconduttore in equilibrio termodinamico le concentrazioni dei portatori sono dettate dalla legge dell'azione di massa per cui

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.1)$$

dove n_i è la concentrazione intrinseca dei portatori mentre n_0 e p_0 sono le concentrazioni specifiche all'equilibrio di elettroni e lacune. Pertanto il tasso di ricombinazione dei portatori R è proporzionale alla concentrazione dei portatori stessi e quindi

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} = Bnp \quad (2.2)$$

con B chiamato coefficiente di ricombinazione bimolecolare, che, per semiconduttori a gap diretto del III e IV gruppo assume valori tipici di $10^{-11} - 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$. Considerando ora dei portatori ulteriori iniettati nella regione di ricombinazione è possibile considerare le nuove concentrazioni di portatori come

$$p = p_0 + \Delta p \quad n = n_0 + \Delta n \quad (2.3)$$

e quindi sostituendo nella 2.2 si ricava che

$$R = B(p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n) \quad (2.4)$$

Poichè i portatori sono generati e ricombinati in coppia allora si considera $\Delta p = \Delta n$. Se si considera un piccolo squilibrio dei portatori (ipotesi di bassa eccitazione), quindi $\Delta n \ll n_0 + p_0$, l'equazione 2.4 diventa

$$R = Bn_i^2 + B(n_0 + p_0)\Delta n(t) = R_0 + R_{ecc} \quad (2.5)$$

Pertanto l'andamento della concentrazione di elettroni rispetto al tempo diventa

$$\frac{dn(t)}{dt} = G - R = (G_0 + G_{ecc}) - (R_0 + R_{ecc}) \quad (2.6)$$

Se si considera che il tasso di generazione e ricombinazione all'equilibrio siano uguali ($G_0 = R_0$) e che il tasso di generazione delle coppie elettrone-lacuna in eccesso (G_{ecc}) sia nullo, si ottiene

$$\frac{d}{dt}\Delta n(t) = -R_{ecc} = B(n_0 + p_0)\Delta n(t) \quad (2.7)$$

e quindi la soluzione dell'equazione differenziale diventa

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau_{RAD}}} \quad (2.8)$$

e in questa il tempo di vita dei portatori è definito come

$$\tau_{RAD} = \frac{1}{B(n_0 + p_0)} \quad (2.9)$$

Considerando ora una grande quantità di cariche iniettate nel semiconduttore (ipotesi di alta eccitazione) e quindi $\Delta n \gg n_0 + p_0$ l'equazione 2.4 diventa

$$-R_{ecc} = \frac{d\Delta n(t)}{dt} = -B\Delta n^2 \quad (2.10)$$

Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene la soluzione e la costante di tempo

$$\Delta n(t) = \frac{1}{Bt + \Delta n_0^{-1}} \quad \tau(t) = \frac{-\Delta n(t)}{\frac{d\Delta n(t)}{dt}} = t + B\Delta n_0 \quad (2.11)$$

Ciò significa che il decadimento della concentrazione dei portatori in seguito a squilibrio non è esponenziale ma lineare e quindi la costante di tempo τ , che dipende a sua volta dal tempo, in realtà è una pseudo costante.

Dalla figura 2.2(b) in particolare si nota che al passare del tempo, anche partendo da condizioni di alta eccitazione, vengono raggiunti livelli di bassa eccitazione e quindi, in condizione di funzionamento continuo, è lecito assumere τ_{RAD} come tempo di vita medio dei portatori.

Inoltre si nota come il tasso di ricombinazione R dei portatori τ sia legato alla

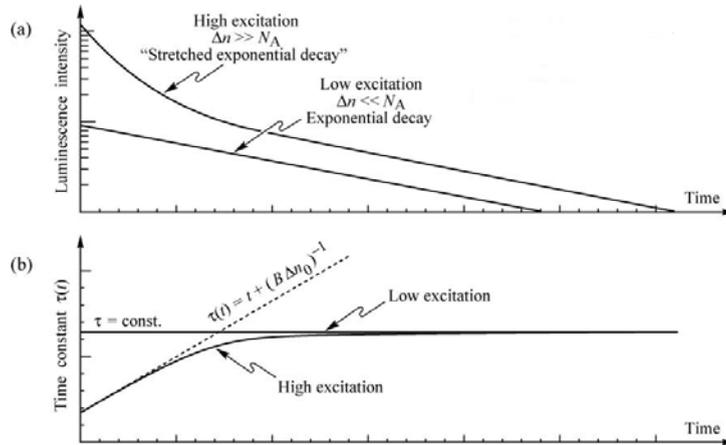


Figura 2.2: (a) Andamento nel tempo della luminescenza per bassa e alta eccitazione. (b) Andamento delle costanti di tempo per bassa e alta eccitazione [1]

disponibilità di elettroni in banda di conduzione (e lacune in banda di valenza). In condizione di equilibrio il tasso di ricombinazione è nullo.

2.2 Ricombinazione non radiativa

La ricombinazione non radiativa avviene quando l'energia rilasciata dalla ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna viene ceduta al reticolo cristallino e convertita in un quanto vibrazionale del reticolo (fonone) e di conseguenza in calore (come indicato in figura 2.3). Pertanto questi processi sono considerati non voluti nei dispositivi LED. Principalmente questi meccanismi sono causati da difetti del reticolo cristallino quali atomi di specie diversa, difetti nativi, dislocazioni o, nel caso di semiconduttori compositi, difetti interstiziali, vacanze, difetti di antisito.

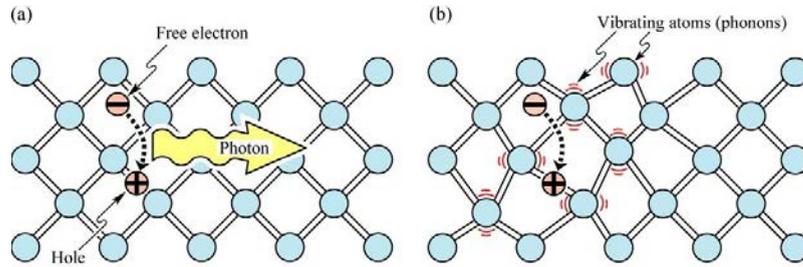


Figura 2.3: Ricombinazione radiativa con emissione di fotone(a); ricombinazione non radiativa con cedimento di energia tramite fonone (b) [1]

2.2.1 Ricombinazione attraverso livelli profondi

Generalmente i difetti reticolari danno origine a livelli energetici all'interno della banda proibita del semiconduttore e, se questi sono in prossimità del centro di banda, danno origine a dei centri di ricombinazioni efficienti, chiamati livelli profondi. Questo fenomeno è stato studiato per la prima volta da Shockley, Read e Hall e per questo la teoria è anche chiamata SHR (cfr [2]). Pertanto il tasso di ricombinazione è dato dalla formula 2.12

$$R_{SHR} = \frac{p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta n \Delta p}{(N_t \nu_p \sigma_p)^{-1} (n_0 + n_1 + \Delta n) + (N_t \nu_n \sigma_n)^{-1} (p_0 + p_1 + \Delta p)} \quad (2.12)$$

dove $\Delta n = \Delta p$, ν_n e ν_p sono le velocità termiche di elettroni e lacune, σ_p e σ_n le sezioni di cattura delle trappole. Inoltre i parametri p_1 e n_1 sono le concentrazioni di elettroni e lacune come se il livello delle trappole E_T fosse posizionato al livello di Fermi E_{Fi} . Pertanto

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_T - E_{Fi}}{kT}\right) \quad p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_T}{kT}\right) \quad (2.13)$$

Il tempo di vita medio degli elettroni in eccesso è dato dall'equazione $R_{SHR} = \Delta n / \tau$ e quindi si ricava che

$$\frac{1}{\tau_{SHR}} = \frac{p_0 + n_0 + \Delta n}{(N_t \nu_p \sigma_p)^{-1} (n_0 + n_1 + \Delta n) + (N_t \nu_n \sigma_n)^{-1} (p_0 + p_1 + \Delta p)} \quad (2.14)$$

Se si considera un semiconduttore di tipo p è possibile considerare $p_0 \gg (n_0, p_1)$ e se si considera anche una piccola variazione dall'equilibrio ($\Delta n \ll p_0$) l'equazione 2.14 può essere riscritta come

$$\tau = \tau_{n0} = \frac{1}{N_T \nu_n \sigma_n} \quad (2.15)$$

mentre nel caso di un semiconduttore drogato n si ottiene

$$\tau = \tau_{p0} = \frac{1}{N_T \nu_p \sigma_p} \quad (2.16)$$

Assumendo inoltre che il tasso di cattura degli elettroni e lacune sia lo stesso, quindi $\nu_n \sigma_n = \nu_p \sigma_p$, ne consegue che $\tau_{n0} = \tau_{p0}$ e pertanto, sostituendo nell'equazione 2.12

la 2.13, è possibile ottenere

$$\tau = \tau_{n0} \left(1 + \frac{p_1 + n_1}{2n_i} \right) = \tau_{n0} \left[1 + \cosh \left(1 + \frac{E_T - E_{Fi}}{kT} \right) \right] \quad (2.17)$$

L'equazione 2.17 pone quindi in evidenza come il valore del tempo di vita medio dei minoritari (τ) sia legato al livello di E_T e alla temperatura T . In particolare, poichè la funzione \cosh presenta un minimo quando il suo argomento è zero, il tempo di vita non radiativo è minimizzato quando E_T assume lo stesso valore di E_{Fi} e assume il valore di $\tau = 2\tau_{n0}$. Pertanto i livelli profondi sono centri di ricombinazione efficiente quando si trovano a metà dell'energy gap del semiconduttore. Per quanto riguarda la temperatura, un aumento di quest'ultima porta ad una diminuzione ulteriore di τ e pertanto è possibile ottenere l'efficienza massima ponendo il dispositivo a temperature criogeniche.

2.2.2 Ricombinazione Auger

Un altro importante meccanismo di ricombinazione non radiativa è la ricombinazione Auger. In questo caso l'energia disponibile dalla ricombinazione elettrone-lacuna viene dissipata dall'eccitazione di un elettrone in banda di conduzione o di una lacuna in banda di valenza. Questi perdono la loro energia successivamente tramite l'emissione di fononi fino al raggiungimento del bordo della banda foto 2.1.

La velocità quindi di ricombinazione complessiva è data dalla formula 2.18

$$R_{Auger} = (C_p + C_n)n^3 = Cn^3 \quad (2.18)$$

dove C è chiamato coefficiente Auger. Tipici valori per i semiconduttori del III e IV gruppo sono $[10^{-28}, 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}]$. R_{Auger} è da considerarsi complessivamente come un valore relativamente piccolo, ma non trascurabile sotto l'ipotesi di alta iniezione di cariche (dipendenza cubica dalla densità). Pertanto questo termine di ricombinazione non radiativa è uno dei principali elementi responsabili del calo di efficienza dei LED polarizzati alle alte correnti.

2.3 Efficienza della sorgente

Considerato che il fine ultimo di un LED è quello di emettere fotoni nello spazio, e quindi luce, è importante considerare non solo il modo in cui favorire la generazione di questi all'interno del semiconduttore, ma anche il modo in cui vengono poi emessi nello spazio al di fuori della sorgente. Diventa quindi importante porre attenzione anche al rivestimento esterno della sorgente in modo tale che questo possa favorire una bassa riflessione della luce verso la sorgente stessa.

2.3.1 Efficienza quantica interna

Sono stati presentati in precedenza dei meccanismi di ricombinazione sia di tipo radiativo che di tipo non radiativo e in competizione tra loro. Considerato che la ricombinazione non radiativa non può essere totalmente eliminata in quanto ogni

semiconduttore presenta dei difetti nativi, è bene tenere presente che tali difetti possono essere limitati grazie al miglioramento della tecnologia di fabbricazione e che quindi sono presenti in concentrazione sempre minore. Per capire meglio questa competizione, si introduce la probabilità di ricombinazione radiativa, anche nota come efficienza quantica interna. Se si considera il tempo di vita medio radiativo come τ_r e il tempo di vita medio non radiativo come τ_{nr} la probabilità di ricombinazione totale è data da

$$\tau^{-1} = \tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1} \quad (2.19)$$

e quindi l'efficienza interna quantica è data da

$$\eta_{IQE} = \frac{\tau_r^{-1}}{\tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}} \quad (2.20)$$

Questo è quindi uno dei fattori che limitano l'efficienza complessiva di una sorgente, ma non l'unico.

2.3.2 Efficienza di iniezione

Per poter ottenere la ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna è necessario iniettare i portatori nella regione attiva del dispositivo. L'efficienza di iniezione (η_{inj}) è pertanto il rapporto tra gli elettroni iniettati nella regione attiva e gli elettroni che attraversano il dispositivo. Sono quindi state individuate diverse cause che portano ad una riduzione di questo parametro (cfr[3]), in particolare:

- Traboccamento dei portatori (spill over carrier) (cfr [4]): questo effetto si verifica in modo particolare quando il dispositivo funziona ad alta intensità di corrente. I portatori iniettati escono dalla regione attiva senza avere la possibilità di ricombinarsi; sono più sensibili a questo fenomeno gli elettroni, a causa della loro massa ridotta. Un metodo usato per limitare questo fenomeno è quello di creare una barriera bloccante realizzata con uno strato sottile di semiconduttore come mostrato in figura 2.4.
- Conduzione di superficie: è favorita dalla presenza di legami pendenti sui bordi del dispositivo, che offrono così un percorso alternativo agli elettroni rispetto al passaggio nella regione attiva. Ciò può essere limitato attraverso l'introduzione di uno strato di passivazione che ricopre la superficie esterna del dispositivo (cfr[5]).
- Percorsi di shunt: la presenza di difetti (sia nativi che dovuti al degrado del dispositivo) del reticolo cristallino può dare origine a un percorso alternativo per gli elettroni rispetto al passaggio nella zona attiva (cfr[6]).

2.3.3 Efficienza di estrazione

I fotoni emessi nella zona attiva del semiconduttore devono uscire dalla superficie di quest'ultimo per essere irradiati nello spazio libero. Poichè la luce viene emessa in maniera isotropa, può accadere che una parte di questa rimanga intrappolata all'interno del dispositivo stesso a causa della differenza tra l'indice di rifrazione del

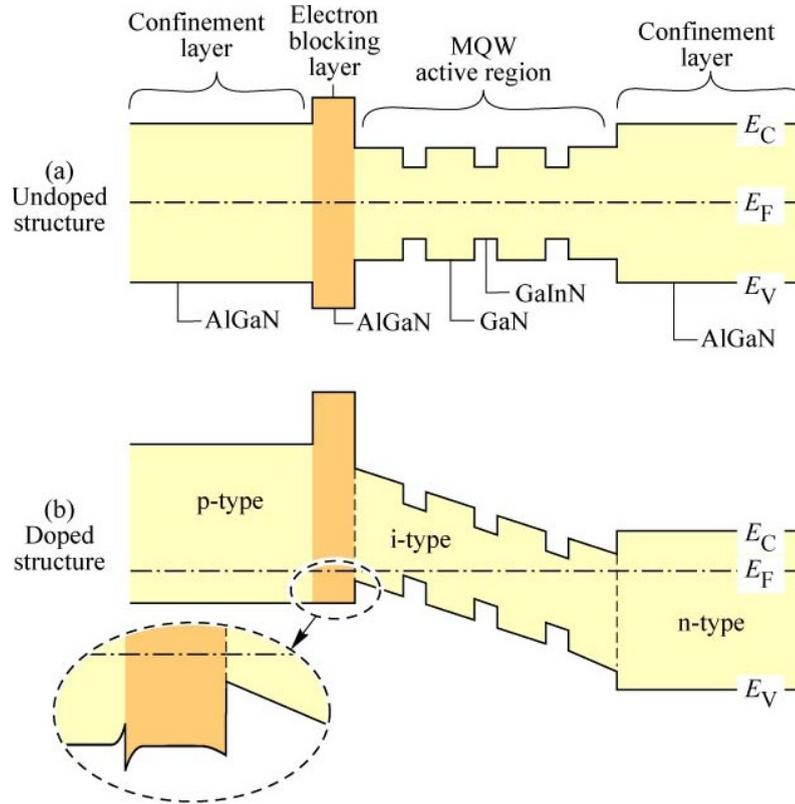


Figura 2.4: Struttura di un LED in cui è presente la barriera bloccante sia nel caso di semiconduttore intrinseco (a) che drogato (b)[1]

materiale attivo e dell'aria o, più in generale, del materiale che circonda il semiconduttore stesso. È possibile quindi calcolare l'angolo critico oltre il quale si innesca tale fenomeno come

$$\phi_C = \arcsen \frac{n_{ext}}{n_s} \quad (2.21)$$

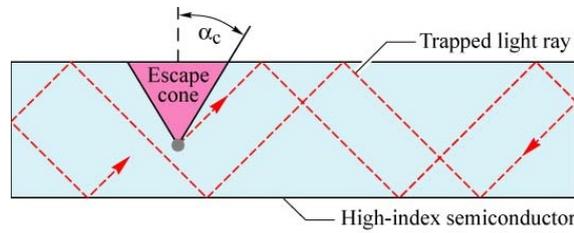
dove n_s e n_{ext} sono gli indici di riflessione caratteristici del semiconduttore e del materiale esterno. Tramite l'angolo critico ϕ_C è possibile individuare una forma conica, chiamata cono di fuga, entro la quale la luce emessa può effettivamente uscire dal semiconduttore (figura 2.5a). Ciò significa che la luce emessa con un'angolazione superiore a ϕ_C sarà soggetta a riflessione verso il semiconduttore stesso (figura 2.5b).

Si può calcolare quindi, con la formula 2.22, la superficie sferica coperta dal cono di fuga in modo da stimare la frazione di potenza ottica interna che viene effettivamente trasmessa all'esterno del semiconduttore.

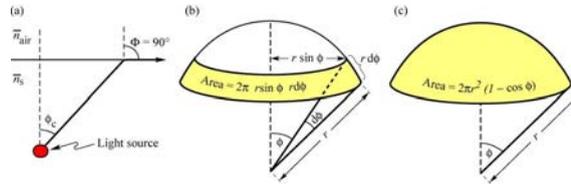
$$P_{ext} = P_{int} \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \phi_C)}{4\pi r^2} \quad (2.22)$$

Pertanto è immediato ricavare l'efficienza di estrazione della luce dal dispositivo tramite la formula 2.23 ricavata dalla 2.22

$$\eta_{extr} = \frac{P_{ext}}{P_{int}} = \frac{1 - \cos \phi_C}{2} \quad (2.23)$$



(a) Luce intrappolata perchè incidente con angolo superiore a ϕ_C [1]



(b) Cono di fuga e superficie sferica relativa [1]

Figura 2.5

Come individuato dalla figura 2.5b e dall'equazione finale 2.23, l'efficienza di estrazione di un LED planare è abbastanza ridotta, ma è possibile aumentarla principalmente attraverso la modifica della geometria del semiconduttore stesso e del package esterno.

- Modifica della geometria del semiconduttore: adottando forme diverse da quella rettangolare come ad esempio quella “a piedistallo” o “a piramide inversa” come rappresentato in figura 2.6(a, b) è possibile aumentare l'efficienza fino a un fattore 2 rispetto alla struttura rettangolare. Un'altra tecnica usata è rappresentata dalla texturizzazione della superficie (figura 2.7) con la quale è possibile rendere la superficie del materiale estremamente diffusiva.
- Forma del package esterno: è possibile aumentare l'efficienza di estrazione anche attraverso l'utilizzo di uno strato incapsulante (generalmente siliconico) con alto indice di rifrazione per limitare le perdite per riflessione all'interfaccia semiconduttore-esterno. Come rappresentato in figura 2.8, generalmente presenta una forma a cupola emisferica o parabolica e, allo stesso tempo, può far variare il pattern di emissione della luce.

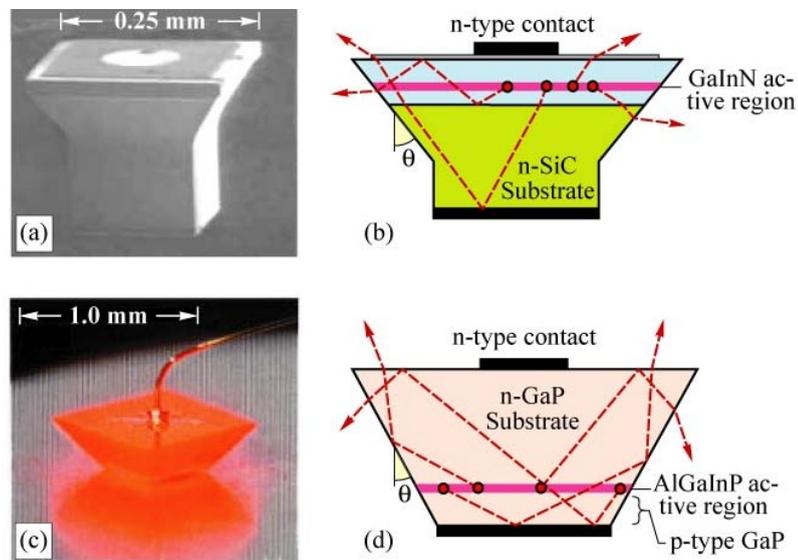


Figura 2.6: Geometria del semiconduttore “a piedistallo” e “a piramide inversa” [1]

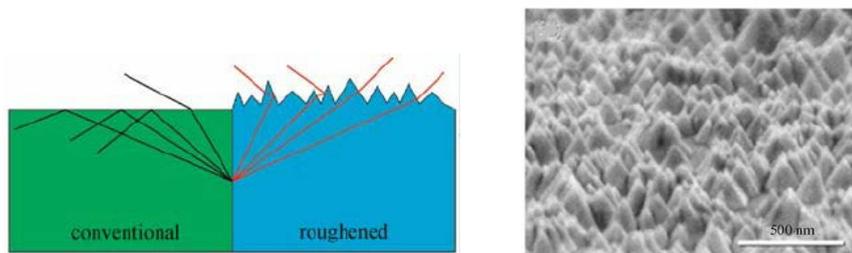


Figura 2.7: Esempio di texturizzazione della superficie del materiale con conseguente riduzione della riflessione [18]

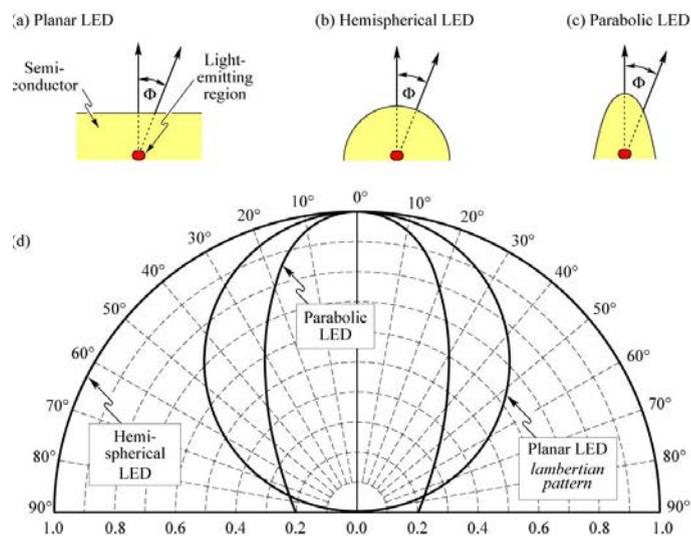


Figura 2.8: Forme del package esterno e conseguente pattern di emissione [1]

2.3.4 Efficienza totale della sorgente

Unendo tutti i risultati precedenti è possibile calcolare l'efficienza totale (detta anche efficienza quantica esterna) della sorgente moltiplicando tra loro i termini delle varie efficienze definiti in precedenza. In particolare si ottiene che l'efficienza totale è pari a

$$\eta_{EQE} = \eta_{inj}\eta_{IQE}\eta_{extr} \quad (2.24)$$

È possibile notare come la η_{EQE} sia indice del rendimento complessivo di un LED e che quindi sia possibile riscriverla come

$$\eta_{EQE} = \frac{P_{opt}}{P_{in}}$$

dove P_{opt} e P_{in} sono rispettivamente la potenza ottica emessa dal dispositivo e la potenza elettrica assorbita, grandezze che possono essere misurate in maniera agevole.

2.4 Caratteristica luce-corrente

Considerando l'efficienza di iniezione η_{inj} , è possibile calcolare la densità di corrente J , che effettivamente contribuisce all'iniezione dei portatori nella regione attiva del dispositivo, come

$$J = \eta_{inj} \frac{I}{A} \quad (2.25)$$

dove I è la corrente totale che attraversa il dispositivo e A l'area della sua regione attiva. È possibile quindi scrivere la potenza ottica in funzione della corrente complessiva del dispositivo I attraverso la formula 2.26

$$P_{opt} = \eta_{EQE} \frac{h\nu}{q} I \quad (2.26)$$

la quale suggerisce che la potenza ottica abbia una dipendenza lineare dalla corrente di polarizzazione I . In realtà dalla figura 2.9 si nota che la caratteristica non è completamente lineare in tutto il range di funzionamento. In particolare si nota che agli estremi, a causa principalmente dei fenomeni di ricombinazione non radiativa, si ha una riduzione della potenza irradiata.

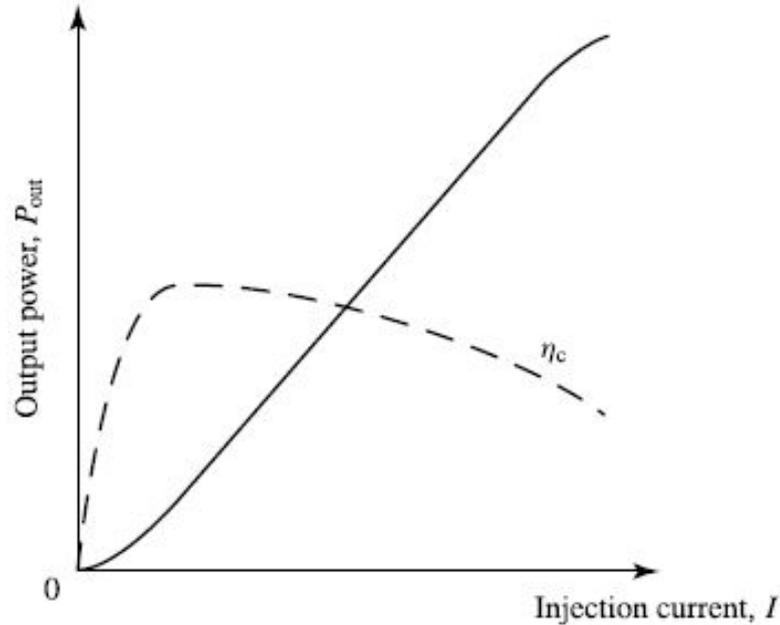


Figura 2.9: Caratteristica L-I tipica di un LED. La curva continua rappresenta la potenza ottica emessa, mentre la tratteggiata rappresenta la η_{EQE} [9]

2.5 Modello ABC

Il modello ABC, grazie alla sua semplicità, è diventato molto popolare, permettendo di approssimare in modo eccellente il comportamento dell'efficienza quantica interna e dell'efficienza esterna in relazione alla corrente di polarizzazione. Un altro vantaggio è che le informazioni sperimentali sui processi di ricombinazione vengono esplicitate nei termini A, B e C. Di contro però il modello più semplice è derivato da ipotesi stringenti: in primo luogo si presume che le concentrazioni di non equilibrio dei portatori siano uguali tra loro nella regione attiva del LED; inoltre, che le costanti A, B e C siano indipendenti dalla concentrazione dei portatori. Quindi, definite le costanti A come $A = 1/\tau_{n0} = N_T v_{th} \sigma_n$, ovvero corrispondente alla ricombinazione SHR, B come costante di ricombinazione radiativa e C associata alla ricombinazione Auger è possibile scrivere

$$\eta_{inj} I = q V_R (A n + B n^2 + C n^3) \quad (2.27)$$

dove η_{inj} rappresenta l'efficienza di iniezione, ovvero la frazione di elettroni che arriva nella regione attiva, V_R indica il volume della regione attiva e q la carica dell'elettrone. Pertanto è possibile scrivere

$$\eta_{IQE} = \frac{B n^2}{A n + B n^2 + C n^3} \quad (2.28)$$

. Il risultato di questo modello è riportato per un caso concreto in figura 2.10, in cui si può individuare un calo di efficienza (*droop*) alle alte correnti (cfr [23])

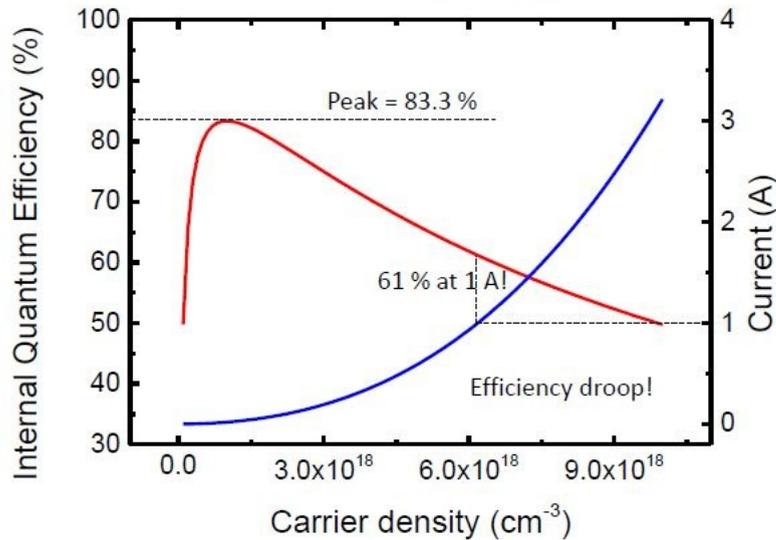


Figura 2.10: Grafico di η_{IQE} secondo il modello ABC con $A = 10^6 \text{ s}^{-1}$, $B = 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$, $C = 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$

2.6 Calo di efficienza alle alte correnti (efficiency droop)

I diodi LED (in particolare InGaN) sono affetti da calo di efficienza alle alte correnti. I meccanismi che portano a ciò sono stati discussi a lungo senza arrivare, ad ora, ad una individuazione univoca del processo per cui avviene il calo. La spiegazione più plausibile è data dal fatto che questa caduta è indotta da una combinazione di meccanismi, e quindi si spiegano anche le difficoltà incontrate per la sua eliminazione, come il fatto che alcuni accorgimenti dimostrati, che portano ad una mitigazione del fenomeno, sono in contrasto tra loro. Sono stati individuati diversi meccanismi responsabili del droop, ma non è stata raggiunta una valutazione conclusiva dell'origine fisica del fenomeno. Sono stati pertanto individuati solo alcuni meccanismi che portano ad un calo dell'efficienza alle alte correnti, riportati in figura 2.11. Questi si dividono in due gruppi principali, ovvero perdite interne non radiative e perdite di elettroni. Con riferimento alle perdite interne si possono quindi individuare:

- ricombinazione Auger, già discussa in precedenza
- volume effettivo ridotto: ovvero si è notato un calo di efficienza molto superiore al fattore C individuato dalla ricombinazione Auger. L'ipotesi condivisa è che il volume efficace otticamente sia ridotto rispetto a quello nominale a causa della forte non uniformità delle densità dei portatori. Di conseguenza risulta che le densità dei portatori (nelle regioni attive) siano molto superiori a quelle previste (calcolate in base alla corrente di polarizzazione)
- delocalizzazione dei portatori: generalmente alle basse correnti la maggiore densità di portatori si trova nelle regioni attive, dove è presente una quantità

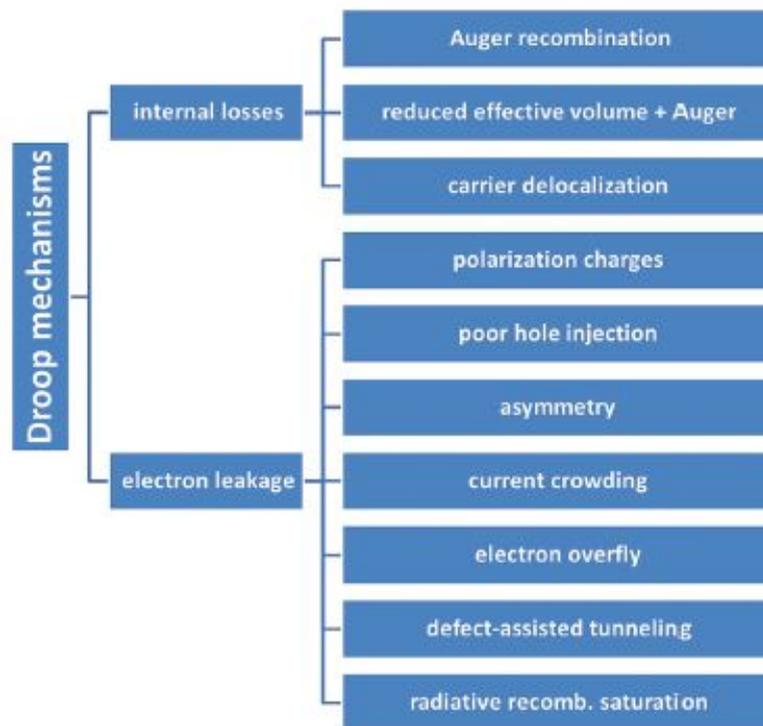


Figura 2.11: Classificazione dei principali meccanismi di droop investigati [22]

di difetti limitata. Il termine di ricombinazione SRH è quindi basso e il tasso di ricombinazione può essere assunto proporzionale alla densità dei portatori. Alle alte correnti i portatori possono essere spostati da queste regioni verso altre con una densità di difetti maggiore, e qui ricombinarsi tramite meccanismi SHR.

Per quanto riguarda le perdite di iniezione dei portatori (electron leakage,) si riconosce una famiglia di cause di droop più che un singolo meccanismo, in associazione a diversi fattori favorevoli:

- cariche di polarizzazione: le cariche di polarizzazione alle interfacce tra il distanziatore e il layer di bloccaggio (EBL) e ai lati delle regioni attive (QB/QW) tendono ad attirare gli elettroni dalla regione attiva verso la regione p del LED. Associandolo al piegamento delle bande diventa energeticamente più conveniente per gli elettroni uscire dalla regione attiva piuttosto che in assenza di cariche
- bassa iniezione di lacune: ciò è dovuto ad una combinazione di fattori che dipendono principalmente dal materiale e dal drogaggio di quest'ultimo, dalle cariche di polarizzazione alle interfacce EBL/distanziatore che ne ostacolano la diffusione
- asimmetria: nelle regioni attive può verificarsi un'asimmetria nelle concentrazioni di droganti e nei parametri di trasporto dei portatori (mobilità e

diffusività relative). Diminuendo la temperatura infatti, il calo di efficienza inizia a densità di corrente minore

- affollamento di corrente (*currentcrowding*): la maggior densità di corrente presente lateralmente al dispositivo è stata considerata come un fattore favorevole per le perdite di iniezione (nonostante la principale ricombinazione in questa regione sia data dal meccanismo Auger)
- sorvolamento di elettroni: secondo questo fenomeno, i portatori possono sorvolare le regioni attive senza essere catturati da queste. Il fenomeno può essere favorito da energia cinetica extra guadagnata da alcuni elettroni nel passaggio dal GaN al InGaN a causa della discontinuità della banda. Questi sono chiamati “*hotelectrons*”
- tunnel assistito dai difetti: difetti del reticolo cristallino possono favorire l’uscita degli elettroni dalla regione attiva per effetto tunnel
- saturazione della ricombinazione radiativa: a partire dall’analisi della dipendenza dell’efficienza quantica interna e dello spettro luminoso emesso si può concludere che il calo osservato dalle basse temperature è dato dalla saturazione della ricombinazione. In particolare è causato dalla riduzione di volume attivo effettivo. Cfr [22]

2.7 Spettro di emissione

Una sorgente luminosa LED si basa sul meccanismo dell’emissione spontanea, ovvero sulla ricombinazione tra un elettrone in banda di conduzione e una lacuna in banda di valenza, nel caso in cui venga conservata la quantità di moto, come mostrato in figura 2.12a, da cui si può intuire la forma dello spettro di emissione. I portatori, infatti, sono distribuiti nelle rispettive bande secondo le relazioni di dispersione 2.29, le quali sono per gli elettroni e le lacune

$$E_e = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad E_h = E_V - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.29)$$

Poichè la quantità di moto del fotone emesso, pari a $p = \hbar k \approx E_g/c$, è molto minore di quella di un elettrone o lacuna soggetti a ricombinazione (pari a $\sqrt{2m^*kT}$), le regole di transizione quanto-meccanica di un LED a semiconduttore a gap diretto favoriscono la transizione di tipo verticale, conservando quindi la quantità di moto della particella come mostrato in figura 2.12a. L’energia del fotone emesso, scritta come relazione di dispersione congiunta, diventa

$$E_{ph} = h\nu = E_e - E_h = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r^*} \quad (2.30)$$

dove m_r^* è la massa efficace ridotta, definita come $(m_r^*)^{-1} = (m_e^*)^{-1} + (m_h^*)^{-1}$. Dalla relazione di dispersione congiunta si può quindi calcolare la densità di stati congiunta

per un semiconduttore che è pari a

$$\rho(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_g} \quad (2.31)$$

La distribuzione dei portatori nelle bande di conduzione e valenza, invece, è data dalla distribuzione di Boltzmann

$$f_B(E) = e^{-E/(kT)} \quad (2.32)$$

Dunque l'intensità di emissione, rispetto all'energia, è proporzionale al prodotto tra la 2.32 e la 2.31 e quindi

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-E/(kT)} \quad (2.33)$$

come indicato in figura 2.12b. Si può quindi notare che l'emissione presenta un

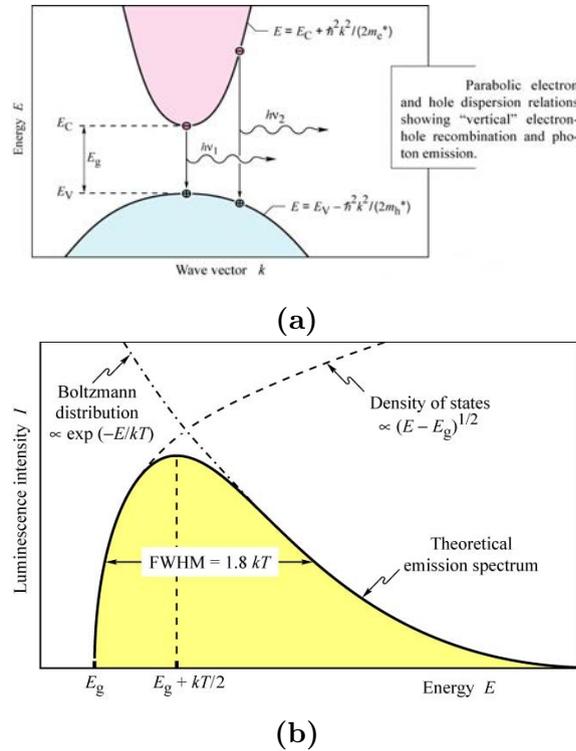


Figura 2.12: Relazione di dispersione per elettroni e lacune in un semiconduttore(a); spettro teorico di emissione di un LED basato di omogiunzione(b) [1]

massimo per fotoni con energia pari a $E_g + kT/2$ e una FWHM pari a $1.8kT$ oppure, considerando la lunghezza l'onda λ , si ottiene la larghezza

$$\Delta\lambda = \frac{1.8 kT\lambda^2}{hc} \quad (2.34)$$

La lunghezza d'onda del picco di emissione di un LED varia con la corrente iniettata e la temperatura. In particolare, poichè il bandgap (E_g) di un semiconduttore del III-V gruppo diminuisce con l'aumentare della temperatura, ciò si traduce in un

aumento della lunghezza d'onda di picco (il valore del discostamento dipende dal materiale). Aumentando invece la corrente iniettata, si verifica il riempimento degli stati inferiori (band-filling effect, cfr [7]) che conduce ad un aumento dell'energia emessa dai fotoni. Ciò si traduce in una riduzione della lunghezza d'onda del picco di emissione. FWHM tipiche per un LED possono variare da circa 20 nm (LED basati su InGaN) fino a circa 100 nm (LED basati su InGaAsP).

È possibile pertanto concludere che un LED presenta una larghezza spettrale (FWHM) limitata rispetto al range dello spettro visibile, ed è anche più stretta rispetto alla larghezza spettrale di un singolo colore. Per questo motivo l'emissione viene percepita dall'occhio umano come monocromatica.

In realtà è bene precisare che un semiconduttore reale presenta delle non idealità nella sua composizione che sperimentalmente si traducono in una forma spettrale tipicamente gaussiana (cfr[8]). In figura 2.13 viene riportato un andamento tipico dello spettro di emissione di LED basati su materiali diversi.

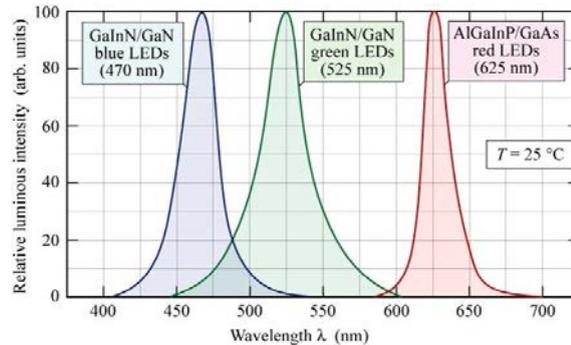


Figura 2.13: Andamento di spettro tipico di emissione di LED basati su GaN/GaAs [1]

2.8 Principali materiali

Per poter ottenere dei LED in grado di emettere luce in modo efficiente sono di fondamentale importanza i semiconduttori a gap diretto, i quali permettono di liberare fotoni con energia proporzionale all'energy gap (E_g). A questo scopo sono stati sviluppati nel tempo dei semiconduttori composti che permettono di ottenere dispositivi che emettono in quasi tutte le lunghezze d'onda principali. Questi sono formati da una miscelazione opportuna di elementi del III e IV gruppo della tavola periodica degli elementi, quali Alluminio, Gallio, Indio, Fosforo, Azoto e Arsenico. A seconda della composizione chimica del materiale e della sua percentuale è possibile ottenere un preciso energy gap e di conseguenza un picco di emissione dello spettro alla lunghezza d'onda voluta. Un altro fattore limitante la scelta della composizione risulta essere il substrato di accrescimento: è innanzitutto difficile ed estremamente costoso ottenere un substrato sufficientemente puro sul quale poter accrescere il cristallo voluto, ma soprattutto è necessario che la differenza tra il substrato e il materiale che compone la regione attiva presenti una differenza di costante reticolare quanto più piccola possibile, in modo da poter depositare un film sufficientemente sottile col minor numero di difetti possibile.

2.8.1 AlGaInP

Aluminium Gallium Indium Phosphide (AlGaInP) è il materiale di scelta per la regione con le maggiori lunghezze d'onda dello spettro visibile, ovvero nei colori rosso, arancione, giallo e giallo-verde. Ponendo l'Indio in composizione molare del 50%, cioè $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$, il materiale presenta la stessa costante reticolare (ovvero *lattice matched*) del GaAs, dunque quest'ultimo diventa un substrato di crescita ideale. Questo materiale composito è stato per la prima volta creato in Giappone, per essere impegnato nel campo dei laser visibili. In particolare si è creata una doppia eterostruttura formata da AlGaInP/GaInP usando $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ come materiale emettente attivo, il quale è *lattice matched* con il GaAs. Poiché l'energy gap è di approssimativamente 1.9 eV è possibile ottenere la lunghezza d'onda di emissione di 650 nm, ovvero in piena banda del rosso. Aggiungendo l'Alluminio in percentuali opportune è possibile ridurre la lunghezza d'onda di emissione fino ad arrivare alla regione dell'arancione e del giallo. In realtà usando concentrazioni di alluminio superiori al 53% l'efficienza radiativa cala drasticamente, per cui il AlGaInP non è indicato per emissione ad alta efficienza per lunghezze d'onda inferiori ai 570 nm. Il AlGaInP ha raggiunto una delle più alte efficienze interne quantiche (vicino al 100% nello spettro del rosso) di tutti i semiconduttori emettenti nello spettro visibile. È stato quindi fondamentale implementare delle strutture LED che permettano di aumentare l'efficienza di estrazione. L'esigenza principale è stata quella di trovare il modo di sostituire il GaAs come materiale di confinamento della regione attiva (in quanto assorbente i fotoni emessi nella regione attiva) con il GaP, in quanto quest'ultimo risulta trasparente in tutte le lunghezze d'onda emesse dalla regione attiva. Un'altra soluzione proposta risulta essere quella di inglobare un riflettore omnidirezionale (ODR) all'interno del LED come indicato in figura 2.14c. È possibile ottenere quindi efficienze complessive (EQE) fino al 55% [10].

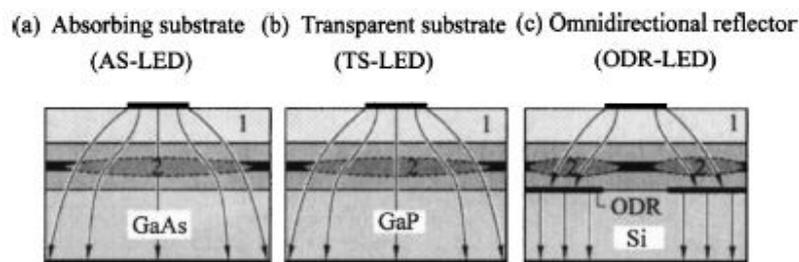


Figura 2.14: Distribuzione di corrente e dimensione della regione di emissione per substrato assorbente (AS), riflettente (TS) e ODR. “1” denota lo strato di diffusione della corrente, “2” denota la regione di emissione della luce. [10]

2.8.2 InGaN

Il materiale InGaN (Indium Gallium Nitride) è fondamentale per realizzare dispositivi che emettano nella banda del blu e del verde, con una lunghezza d'onda minima superiore ai 360 nm. Questi dispositivi sono diventati disponibili in commercio a partire dalla metà degli anni '90 e da quel momento il InGaN è diventato

il principale materiale di realizzazione. Una delle maggiori sorprese è il fatto che il materiale presenta una grande efficienza radiativa nonostante la presenza di una gran quantità di dislocazioni nei film di crescita. Dalla figura 2.15 si evince che il In-

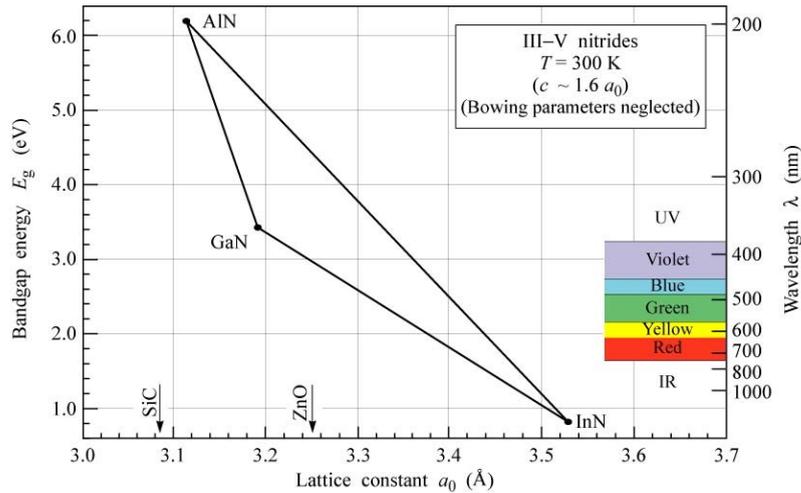


Figura 2.15: energy gap rispetto alla costante di reticolo dei nitridi III-V gruppo [10]

GaN, creato dall'unione del Nitrato di Gallio (GaN) e del Nitrato di Indio (InN) può teoricamente dare origine a dispositivi con energy gap che varia da 3.4 eV fino a 0.65 eV, dunque potenzialmente emettenti in tutta la banda spettrale visibile. Questo risultato è ottenibile variando la percentuale di Gallio e di Indio nel composto. In pratica è difficile realizzare un cristallo di alta qualità con una alta concentrazione di Indio a causa della sua ri-evaporazione. Per questo motivo il InGaN viene utilizzato principalmente per LED UV, blu e verdi. Per quanto riguarda il substrato di crescita, storicamente si è utilizzato lo zaffiro, il quale presenta un lattice mismatch con il GaN del 16% (parzialmente risolto in seguito con una crescita metamorfica su un buffer layer)(cfr. [12]). Un altro limite di questo substrato è il carattere isolante, che obbliga a porre i contatti entrambi elettrici sulla superficie superiore del dispositivo. Un altro substrato usato è rappresentato dal SiC. Questo presenta un mismatch della costante reticolare pari al 3.7% e quindi è uno dei substrati più utilizzati anche grazie alla sua ottima dissipazione termica e alla possibilità di condurre elettricamente, grazie al possibile drogaggio. Di contro, il prezzo dei wafer è decisamente elevato.

Un'alternativa molto più economica è rappresentata dal silicio, grazie alla sua facile reperibilità e soprattutto alla tecnologia maturata in ambito dell'elettronica di consumo. Il vantaggio principale è garantito dall'ottima dissipazione termica del substrato e dalla possibilità di integrare il dispositivo in chip più complessi. Di contro va considerato l'elevato mismatch reticolare e la differenza dei coefficienti di espansione termica tra Si e GaN. Attualmente è possibile ottenere dispositivi LED con substrato di silicio più efficienti di quelli con substrato di zaffiro (cfr [14] [15]). È inoltre possibile ottenere dei substrati nativi di GaN, che, a seconda del processo produttivo, possono avere elevate dimensioni oppure elevata qualità del materiale. In particolare è possibile ottenere substrati di dimensioni ridotte (fino a 15 mm)

ma con densità di dislocazioni pari a 10^2 cm^{-2} utilizzabili solo per dei dispositivi speciali. In alternativa è possibile ottenere dei substrati con densità di dislocazioni inferiore a 10^5 cm^{-2} ma di dimensioni maggiori, adeguate per produzione di massa di dispositivi [16].

In figura 2.16 sono riportati degli esempi di struttura di dispositivi LED basati su InGaN/GaN con alcuni diversi tipi di substrato.

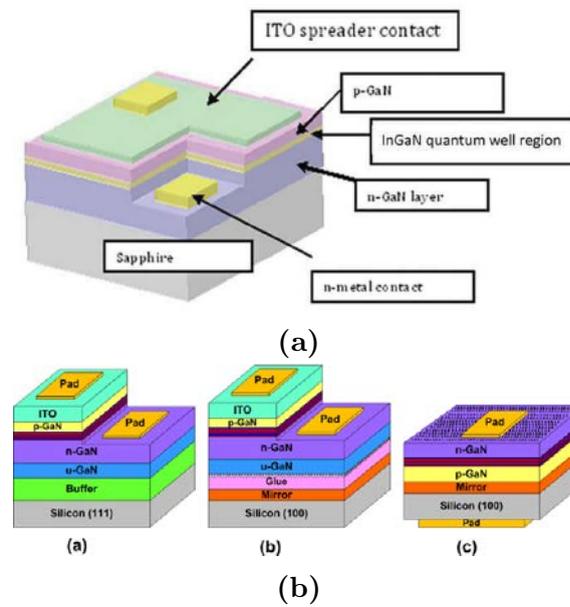


Figura 2.16: Esempi di struttura LED InGaN/GaN basati su substrato di zaffiro (a) e silicio(b) [29][17]

Capitolo 3

Ottiche

LED di alta potenza sono usati come sorgenti luminose in una sempre più vasta gamma di applicazioni. Tuttavia per la maggior parte di queste, come illuminazione spot and down, stradale, architettonica e scenica, gli emettitori non riescono da soli a portare abbastanza intensità verso il target. Questo perchè la sorgente di luce LED emette una luce con distribuzione Lambertiana: la luce è quindi diffusa troppo ampiamente. È necessario pertanto utilizzare un'ottica secondaria che riesca a collimare la luce in un raggio controllato in modo da illuminare l'area interessata. I raggi tendono quindi a propagarsi in parallelo nonostante non sia possibile una collimazione perfetta, a causa della diffrazione e delle dimensioni finite dell'emettitore. Tuttavia, minore è la sorgente luminosa, maggiore sarà l'efficacia dell'ottica secondaria.

Per descrivere l'abilità di un'ottica secondaria di collimare un raggio, generalmente ci si riferisce all'angolo di visione o alla larghezza intera a metà massimo (Full Width Half Maximum o abbreviato FWHM): questa è la larghezza angolare del fascio in cui l'intensità del fascio è la metà dell'intensità massima al centro del raggio (cfr [20])

3.1 Confronto ottica TIR e riflettore

In molte applicazioni di illuminazione, in particolare in ambito industriale, stradale e teatrale, è richiesta un'alta intensità luminosa (misurata in candele); ciò significa riuscire a ottenere un fascio il più possibile collimato a partire da un emettitore ad alta potenza. In un settore con standard così alti è essenziale che ogni emettitore sia abbinato ad un'ottica secondaria appropriata. Spesso la dimensione fisica della sorgente limita le opzioni ottiche: in particolare ciò è vero per le sorgenti Chip-on-board (COB) o matrice di emettitori. Poichè l'area di emissione di questo tipo di sorgenti è molto vasta l'unica soluzione possibile è quella di circondare la sorgente con una superficie riflettente. I riflettori, che sono comuni con le lampade a incandescenza, con i LED presentano uno svantaggio: una frazione rilevante della luce che proviene dal centro della sorgente esce dal sistema senza interagire con il riflettore. Ciò significa che anche in un sistema riflettivo stretto (con FWHM compresa tra 20° e 25°) la maggior parte della luce si allontana dall'obiettivo. È possibile migliorare la forma del raggio emesso e limitare la dispersione luminosa utilizzando

un'ottica TIR, nel caso in cui la sorgente luminosa sia sufficientemente piccola. È possibile ottenere un'ottica economica, non ingombrante ed efficiente solo a partire da un emettitore piccolo e molto luminoso.

In figura 3.1 è possibile notare un confronto attuato tra due sistemi. Uno sfrutta un

	TIR lens with SMD emitter	Reflector with COB array
Number of die	12 die (1 x 1 mm)	24 die (1.5 x 1.5 mm)
Luminous intensity (lm), input power (W), efficacy (lm/W)	985 lm, 17.79W 55.4 lm/W	969 lm, 17.84W 54.3 lm/W
Center-beam illuminance (lux) at 1m	6020	3005
Lux efficacy (lux/W) at 1m	338	168
Glare (percentage of radiated energy outside of 60° cone)	6%	28%

Figura 3.1: Confronto tra un sistema SMD e ottica TIR con un sistema COB e riflettore [20]

emettitore singolo SMD e un'ottica TIR con FWHM di 24° mentre l'altro un LED COB e un riflettore: in entrambi i casi le ottiche secondarie presentano le stesse dimensioni e sono state progettate per avere una stessa FWHM. La misura è stata eseguita fino ad un angolo di 60°. Inoltre si è cercato di avere la stessa potenza (W) ed efficacia (lm/W); da questo si deduce che il sistema con ottica TIR porta il doppio di luce al target e l'80% in meno di abbagliamento. In figura 3.2 si nota

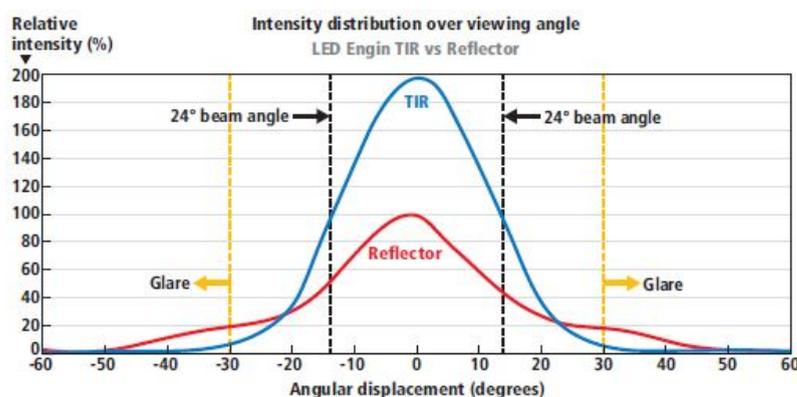


Figura 3.2: Distribuzione di intensità luminosa relativa per un sistema con ottica TIR e con riflettore [20]

la distribuzione di intensità in relazione all'angolo di visione. Immediatamente si percepisce che l'intensità della lente TIR presenta una pendenza molto ben controllata fino al picco, mentre la distribuzione del riflettore si appiattisce nella zona del bagliore.

Di fatto il 28% dell'energia irradiata dal riflettore cade fuori il cono di 60°, contribuendo al bagliore, mentre per l'ottica TIR è solo pari al 6% (cfr[20]).

3.2 Legge di Snell

Se si considera un'onda luminosa che si propaga da un mezzo ad un altro si hanno due fenomeni, ovvero la riflessione e la rifrazione, i quali avvengono in contemporanea.

In particolare per ogni raggio incidente su una superficie si ottiene un raggio riflesso (cioè che rimane nel mezzo originario) e un raggio rifratto (che si propaga nel mezzo successivo). Pertanto, a partire dalla figura 3.3, è possibile notare che l'angolo

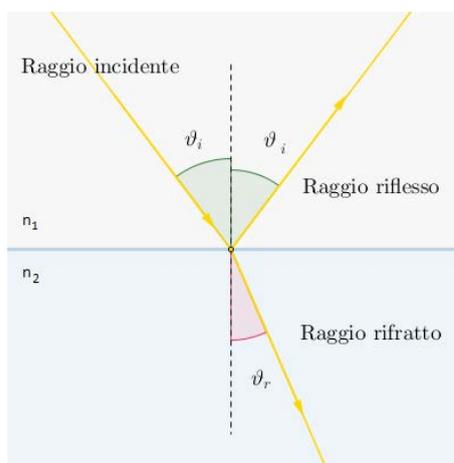


Figura 3.3: Riflessione e rifrazione di un raggio luminoso in due mezzi con indice di rifrazione n_1 e n_2 [25]

di uscita del raggio riflesso ϑ_i è uguale all'angolo del raggio incidente rispetto alla perpendicolare della superficie di riflessione, mentre l'angolo del raggio rifratto presenta un angolo ϑ_r diverso. La relazione che regola ϑ_i e ϑ_r è chiamata legge di Snell, scoperta sperimentalmente attorno al 1621. In particolare afferma che

$$\frac{\text{sen}(\vartheta_i)}{\text{sen}(\vartheta_r)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

È possibile quindi sostenere che se un raggio passa da un mezzo con indice di rifrazione minore a uno con indice di rifrazione maggiore ($n_1 < n_2$) allora si ottiene che $\vartheta_r < \vartheta_i$. Al contrario se un raggio passa da un mezzo con indice di rifrazione maggiore ad uno con indice di rifrazione minore ($n_1 > n_2$) il risultato sarà $\vartheta_r > \vartheta_i$. Dunque, in quest'ultima situazione, è possibile individuare l'angolo critico tramite la formula

$$\theta_{cr} = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.2)$$

oltre il quale il raggio non viene rifratto, ma rimane intrappolato all'interno del materiale, come mostrato in figura 3.4, dando origine al fenomeno della riflessione totale interna (TIR) (cfr [25],[19]).

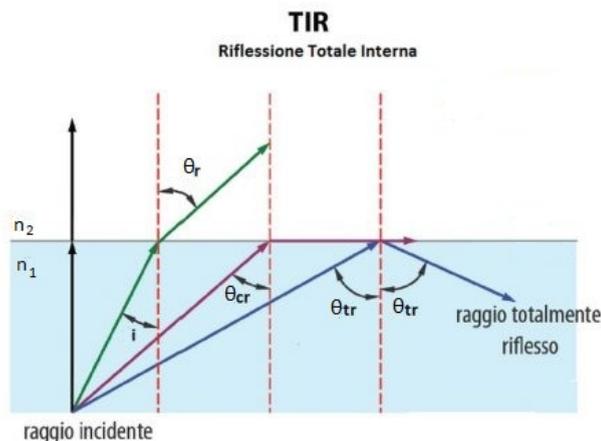


Figura 3.4: Riflessione totale interna in un mezzo con indice di rifrazione più alto di quello esterno [24]

3.3 Ottica TIR

Il collimatore, anche chiamato ottica, è formato da due componenti fusi in uno unico: il bordo esterno è equivalente a uno specchio parabolico, che dirige la luce emessa lateralmente dal LED verso avanti tramite la riflessione interna totale (TIR). La luce che non viene riflessa lateralmente è catturata da una lente convessa posta al centro della struttura stessa. Questo permette all'ottica di collimare quasi la totalità della luce in uscita dalla sorgente (cfr. [26]). In figura 3.5 è mostrata la sezione di un'ottica con la sorgente montata al centro, in verde.

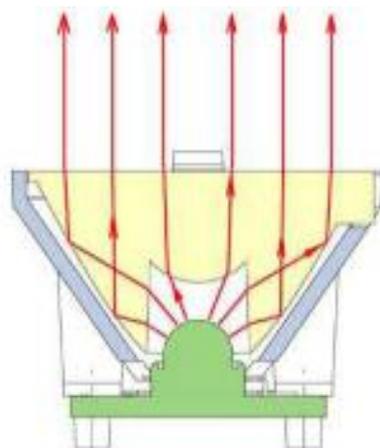


Figura 3.5: Sezione di un'ottica TIR con sorgente montata al centro [26]

3.3.1 Funzionamento dell'ottica e cenni di progettazione

Considerando la figura 3.6, l'ottica TIR è formata dalle superfici 1, 2, 3, 4. I raggi emessi dalla sorgente posta al centro possono essere divisi in due parti. La

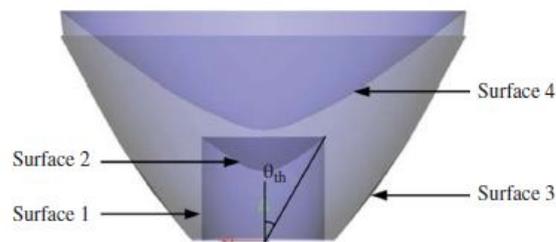


Figura 3.6: Superfici di composizione di un'ottica TIR [21]

prima parte con angolo compreso tra 0° e θ_{th} è incidente alla superficie 2 e i raggi sono rifratti direttamente all'interno della lente ed escono alla fine dalla superficie 4. La seconda parte della luce (angolo che varia tra θ_{th} e 90°) è invece incidente alla superficie 1, rifrange all'interno della lente e in seguito, tramite riflessione interna totale sulla superficie 3, esce verso l'esterno sempre dalla superficie 4.

Pertanto è necessario che le superfici 2 e 3 siano dimensionate in modo che i raggi uscenti da queste siano perpendicolari alla superficie 4. In seguito è possibile ulteriormente ottimizzare la struttura modificando opportunamente la superficie suddetta. Dal punto di vista teorico è possibile ottenere un angolo di emissione compreso tra 0 e 95.68° , quindi si può realizzare un'illuminazione uniforme con un angolo di emissione piccolo.

Per poter progettare la superficie 2 è necessario dividere equamente la sorgente in N angoli di emissione θ_i come indicato nella figura 3.7.

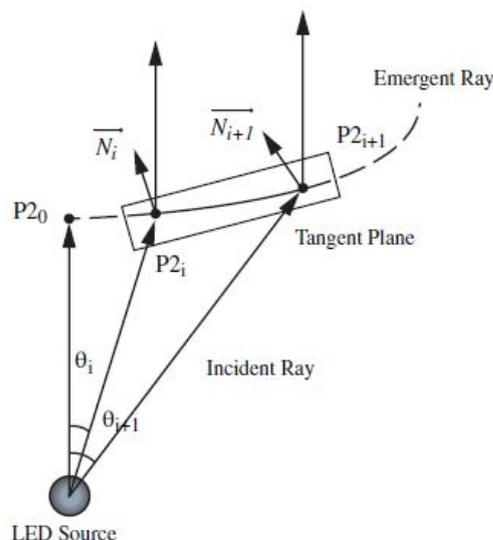


Figura 3.7: Disegno di costruzione della superficie 2 per punti [21]

Una volta scelto il vertice $P2_i$ di partenza, si individua il vettore di uscita della superficie 2 richiesto e, in accordo con la legge di Snell, si individua il vettore N_i perpendicolare alla superficie 2. A questo punto si disegna il piano perpendicolare al vettore N_i (e quindi tangente alla superficie da progettare nel punto $P2_i$). Su questo piano giacerà anche il punto P_{i+1} relativo all'angolo di emissione θ_{i+1} e, con

i passaggi descritti in precedenza, è possibile calcolare il vettore normale N_{i+1} alla superficie 2 e il nuovo piano tangente a quest'ultima. Così facendo si ottengono N vettori tangenti alla superficie incognita, e quindi tramite *spline* e rotazione attorno al vettore $P2_0 - LED\ source$ è possibile ottenere la superficie completa cercata. Per ottenere la superficie 3 si inizia dalla scelta della posizione del vertice $P3_0$ come indicato in figura 3.8. Si nota quindi che il vertice di partenza $P3_0$ è situato sulla

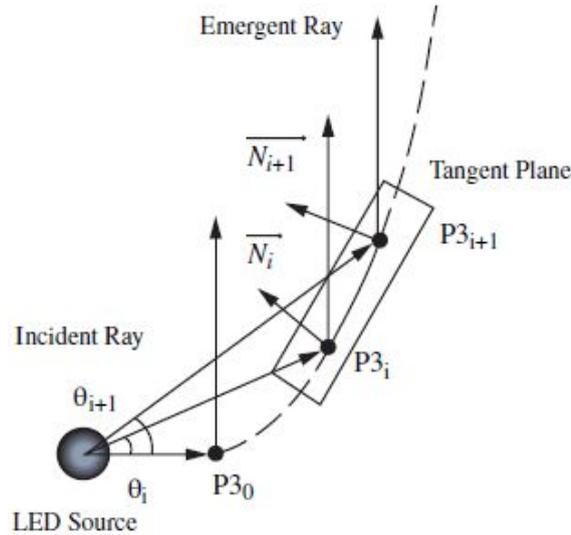


Figura 3.8: Disegno di costruzione della superficie 3 per punti [21]

base della superficie e tutti i punti vengono calcolati con il metodo precedentemente indicato. I raggi di partenza in realtà sono quelli rifratti dalla superficie 1 e incidenti sulla superficie 3, quindi la direzione di partenza può essere calcolata. Inoltre, a differenza della superficie 2, i raggi devono essere totalmente riflessi con i raggi di uscita totalmente verticali. È possibile, sempre usando la legge di Snell, individuare il vettore perpendicolare alla superficie 3. Quindi sempre usando *spline* e rotazione sull'asse verticale è possibile costruire la superficie 3 con i punti individuati.

L'inclinazione della superficie 1 può essere scelta a piacere ma in generale è opportuno che sia più verticale possibile: infatti i raggi provenienti dalla sorgente vengono irradiati sulla superficie 3 con un angolo incidente minore dopo essere rifratti dalla superficie 1, quindi la verticalità di questa porta ad avere un'altezza complessiva dell'ottica minore.

La superficie 4 può infine essere dimensionata secondo i passi utilizzati per la superficie 2 notando che i raggi incidenti sono tutti verticali, mentre è possibile scegliere l'angolo di uscita in base alle specifiche scelte (cfr. [21]).

3.4 Costruzioni di Huygens

Le costruzioni di Huygens, per quanto riguarda la rifrazione, rappresentano un valido metodo geometrico per individuare l'angolo di uscita di un raggio rifratto, facilmente realizzabile anche con un software CAD. Con riferimento alla figura 3.9 si

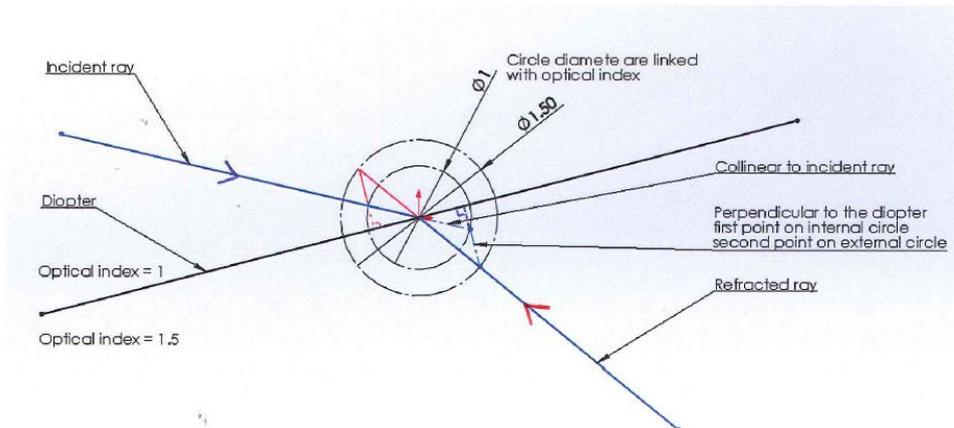


Figura 3.9: Disegno di costruzione di Huygens per individuare l'angolo di rifrazione

disegnano due cerchi di diametro pari all'indice di rifrazione. In seguito si traccia la perpendicolare all'interfaccia tra i due materiali passante per il punto di intersezione tra il cerchio con il diametro corrispondente al materiale del raggio incidente e il prolungamento di quest'ultimo. Il punto di intersezione ottenuto tra la perpendicolare e il secondo cerchio individua, assieme al centro del cerchio stesso, l'angolo di uscita del raggio rifratto.

In questo modo è possibile, conoscendo ad esempio l'angolo di uscita del raggio rifratto e, chiaramente, i due materiali all'interfaccia, calcolare l'angolo di incidenza del raggio incidente o in alternativa l'inclinazione della superficie per ottenere un determinato angolo di uscita.

Capitolo 4

Descrizione setup di misura principali

4.1 Caratterizzazione ottica

Per quanto riguarda la caratterizzazione ottica, il setup di misura utilizzato comprende: una sfera integratrice LabSphere LMS-650, un SourceMeter Keithley 2614b, uno spettrometro OceanOptics USB2000 connesso alla sfera mediante una fibra ottica, un PC che tramite software LabView sincronizzi unità sorgente e acquisizione dati da parte dello spettrometro.

4.1.1 La sfera integratrice

È considerato lo strumento più utilizzato per misurare il flusso radiante totale proveniente da una sorgente luminosa. È costituita da una sfera cava rivestita di un materiale diffondente, il quale deve diffondere la luce emessa da una sorgente luminosa posta al suo interno, in modo uniforme in tutta la superficie; per questo motivo, la luce incidente sulla superficie interna, dopo riflessioni multiple, risulterà uniforme annullando quindi l'informazione spaziale proveniente dalla sorgente. Viene però mantenuta inalterata la distribuzione spettrale di potenza che quindi può essere misurata utilizzando uno spettrometro.

La sfera utilizzata presenta un diametro di 65 pollici e una struttura come quella di figura 4.1b, in cui è possibile anche notare la struttura interna, nella quale sono presenti delle aperture opportunamente coperte da deflettori per evitare che i raggi luminosi possano incidere direttamente su queste. Ciò è utile in quanto devono essere inserite nella sfera, oltre che la fibra ottica per la misura vera e propria, anche delle lampade di calibrazione; nel setup utilizzato durante lo svolgimento della tesi sono state utilizzate delle alogene certificate NIST. Per avere una misura di irradianza assoluta è necessario pertanto calibrare il sistema formato da sorgente, sfera, spettrometro di misura. Una calibrazione viene eseguita sulla sfera vera e propria periodicamente in modo da compensare i cambiamenti strutturali della sfera stessa (degrado della superficie diffusiva e sporco accumulato all'interno). La risposta del sistema viene misurata e confrontata con il valore di riferimento certificato e quindi creato il file di calibrazione utilizzato dal programma per la conversione della misura

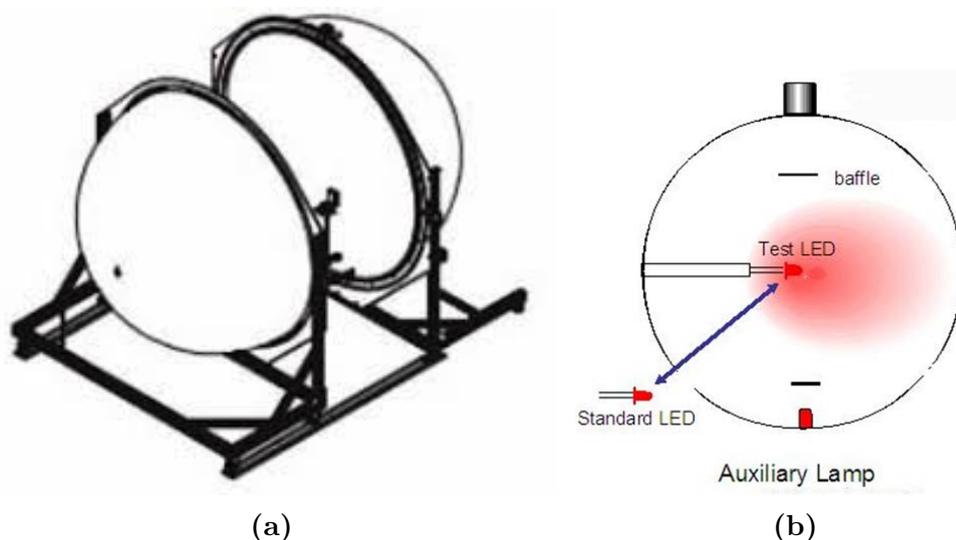


Figura 4.1: (a) schema della struttura esterna della sfera utilizzata (b) schema della struttura interna [27]

effettuata in grandezze assolute. Una seconda misura di calibrazione è necessaria ogni volta che si introduce un nuovo apparato luminante da testare: questa avviene inserendo la struttura da testare nella sfera e illuminandola con una seconda lampada alogena. Dal rapporto fatto tra la misura ottenuta in condizione di calibrazione primaria, quindi con lampada di calibrazione inserita e la misura ottenuta con la sorgente illuminata si ottiene un secondo file di calibrazione detto di assorbimento ausiliario con cui saranno moltiplicate le successive misure di quella data sorgente.

4.1.2 Lo spettrometro OceanOptics USB2000

Lo spettrometro rappresenta lo strumento per poter determinare la densità di potenza spettrale di una sorgente luminosa. Da questa misura è possibile, ad esempio, ricavare grandezze radiometriche come il flusso radiante e fotometriche come il flusso luminoso, coordinate cromatiche e altro. La struttura interna del dispositivo utilizzato è rappresentata in figura 4.2 e si compone di diversi elementi:

1. un connettore per la fibra ottica uscente dalla sfera integratrice
2. una fessura di apertura variabile per controllare la quantità di luce entrante nella camera (e prevenire la saturazione della misura)
3. un filtro ottico per il taglio delle lunghezze d'onda fuori interesse
4. uno specchio collimatore per focalizzare la radiazione in un reticolo collimatore
5. un reticolo per la diffrazione del fascio
6. uno specchio per la focalizzazione del fascio rifratto verso il CCD
7. un array di lenti per focalizzare il fascio difratto sugli elementi del detector

8. un detector a CCD per convertire l'intensità spettrale in un dato digitale

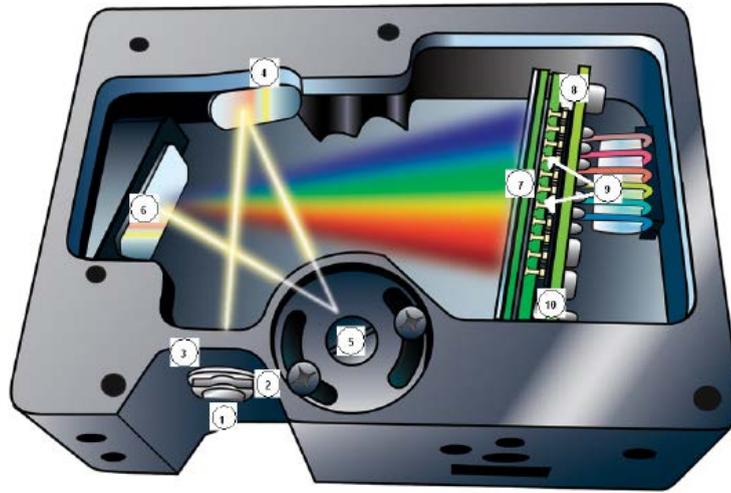


Figura 4.2: Struttura interna dello spettrometro OceanOptics USB2000 (da manuale dello strumento)

L'acquisizione dello spettro, inoltre, è sincronizzata tramite un segnale di trigger esterno proveniente dal Source Meter e la misura gestita autonomamente dal programma LabView. Infatti quest'ultimo regola automaticamente il tempo di integrazione (per prevenire la saturazione dello spettrometro) dimezzandolo se vicino al valore di fondo-scala. Pertanto il programma, partendo dallo spettro acquisito e dalla misura delle grandezze elettriche (acquisite dal SourceMeter) è in grado di elaborare i dati ottenendo in particolare:

- potenza ottica totale (flusso radiante [W])
- potenza elettrica assorbita dal dispositivo
- flusso luminoso [lm]
- efficienza luminosa [lm/W] e altre grandezze fotometriche non approfondite in questa sede

4.2 Irradianza planare

Un'altra caratterizzazione utile è quella che permette di individuare la quantità di flusso radiante che incide una superficie parallela alla sorgente luminosa a una data distanza. Per fare questo è di aiuto un sistema a scorrimento chiamato *tavola xy*.

4.2.1 La tavola xy

La tavola xy, nota anche come tavola lineare, è un sistema, come si nota in funzione in figura 4.3, formato da un telaio metallico esterno sul quale sono fissate

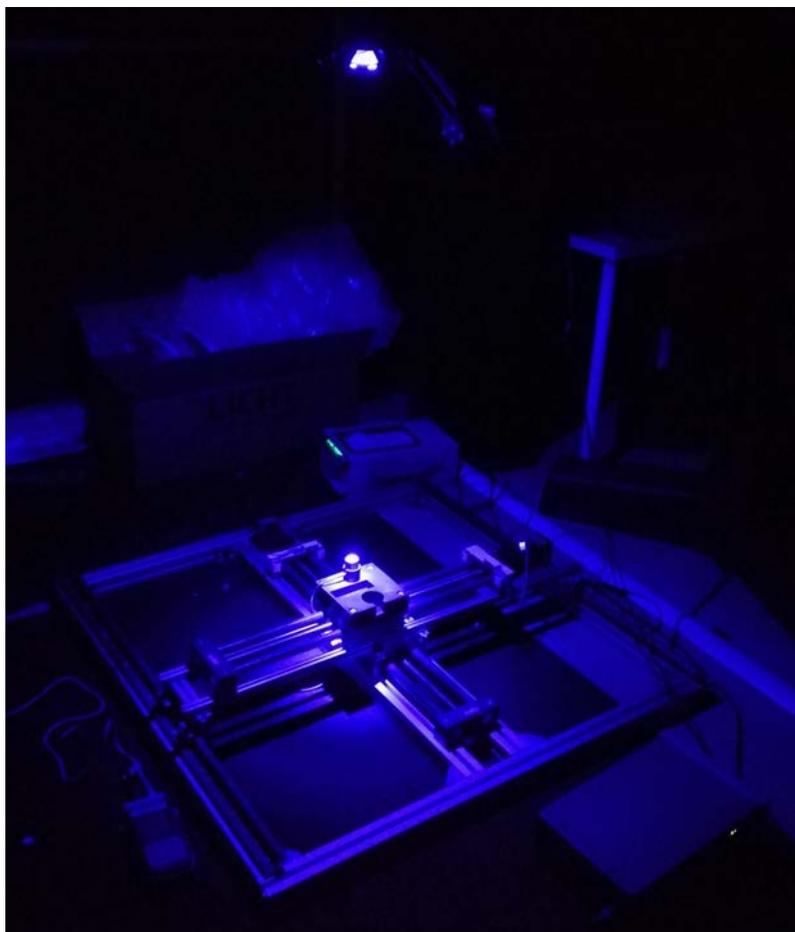


Figura 4.3: Struttura della tavola xy in funzione: si nota in alto la sorgente luminosa e in basso il sensore di irradianza

due guide metalliche. All'interno è presente una base che viene spostata da due motori passo-passo attraverso una vite senza fine. Il risultato è una struttura mobile su due assi (x e y) perpendicolari tra loro in cui al centro è alloggiato un sensore (in questo caso di irradianza) il quale rileva la grandezza misurata punto per punto. Per le misure effettuate è stato posto nell'alloggiamento il sensore di irradianza LP 471 RAD collegato al fotoradiometro DeltaOhm HD2102.2 e successivamente ad un pc per gestire in automatico la misura. Il sistema formato da motori passo-passo e fotoradiometro è gestito completamente da un programma LabView che controlla la posizione del sensore e registra il file di log con tutti i valori misurati. In questo caso è possibile ottenere il valore di potenza ottica incidente alla superficie impostata. Uno degli aspetti su cui porre attenzione riguarda l'allineamento iniziale tra la sorgente e la tavola, che deve essere effettuato manualmente con una certa cura e precisione.

Capitolo 5

Caratterizzazione delle sorgenti e ottiche

5.1 Individuazione dei componenti principali

5.1.1 Scelta delle sorgenti

Sulla scelta delle sorgenti ottiche si sono posti come vincoli di progetto il tipo di dispositivo (led singolo, non COB) e il colore: royal blue e rosso/IR. Tale scelta è stata effettuata per diversi fattori: per primo, le loro lunghezze d'onda sono le migliori in relazione l'efficienza dei semiconduttori; secondo, hanno una lunghezza d'onda sufficientemente differente; terzo, possono avere differente penetrazione nei liquidi; quarto, hanno una risposta diversa su materiali colorati.

Tenendo presente la dimensione del chip (minore possibile) e la massima corrente di polarizzazione, si sono trovati in commercio i seguenti dispositivi e tramite la formula 5.1 e, usando i dati presenti nei datasheet, si è stimata (senza tener presente il calo di efficienza alle alte correnti) la massima potenza ottica (OP) ottenibile dal singolo dispositivo.

$$OP_{max} = \frac{I_{max} OP_{test}}{I_{test}} \quad (5.1)$$

Dunque dalle tabelle 5.1, 5.2 è possibile attuare un confronto tra i dispositivi.

Per quanto riguarda le sorgenti che emettono su banda del rosso/IR sono stati selezionati i dispositivi in tabella 5.3

Pertanto da un confronto tra i vari modelli precedentemente indicati sia in riferimento alla potenza ottica emessa che in riferimento alla dimensione del chip, i modelli indicati in tabella 5.4 sono stati acquistati e caratterizzati.

5.2 Scelta delle ottiche

Per quanto riguarda le ottiche sono state scelte dal sito del produttore *LEDiL*® i modelli che riescono a mantenere una minore FWHM (espressa in gradi) per una data sorgente e l'efficienza più alta per la stessa. Di conseguenza sono state acquistate le ottiche in tabella 5.5.

Tabella 5.1: Modelli selezionati (royal blue)

Produttore	Modello	λ_{pk} (nm)	I_{test} (mA)	OP_{test} (mW)	Pkg (mm)
Lumileds	LXML-PR02-A900	447.5	700	900	4.91x3.17
Cree	XQEROY-Q01	465.0	350	600	1.6x1.6
Cree	XQEROY-P01	465.0	350	575	1.6x1.6
Cree	XPGDRY-L1601	465.0	350	755	3.45x3.45
Osram	GD CSSRM2.14	450.0	350	731	3x3
Cree	XBDROY-N01	458.0	350	563	2.45x2.45
Cree	XTEARY-02-101	465.0	350	500	3.45x3.45
Cree	XBDROY-101	465.0	350	500	2.45x2.45
Osram	GD CSSPM1.14	451.0	350	690	3x3
Lumileds	L1C1-RYL1	450.0	350	532	2x2
Osram	LD CQAR AQAS	445.0	700	1350	3.1x3.1
Cree	XPEBRY-L1-R250-R01	465.0	350	625	3.45x3.45
Cree	XQEROY-H0-P01	465.0	350	575	1.6x1.6

Tabella 5.2: Valori calcolati (royal blue)

Produttore	Modello	I_{max} (mA)	OP_{test}/I_{test}	OP_{max} (mW)
Lumileds	LXML-PR02-A900	1000	1.286	1285.714
Cree	XQEROY-Q01	1000	1.714	1714.286
Cree	XQEROY-P01	1000	1.642	1642.857
Cree	XPGDRY-L1-601	2000	2.157	4314.286
Osram	GD CSSRM2.14	2000	2.088	4177.143
Cree	XBDROY-N01	1000	1.608	1608.571
Cree	XTEARY-02-101	1500	1.428	2142.857
Cree	XBDROY-101	1000	1.428	1428.571
Osram	GD CSSPM1.14	1000	1.971	1971.429
Lumileds	L1C1-RYL1	1000	1.520	1520.000
Osram	LD CQAR AQAS	2000	1.928	3857.143
Cree	XPEBRY-L1-R250-R01	1000	1.786	1785.714
Cree	XQEROY-H0-P01	1000	1.643	1642.857

Tabella 5.3: Modelli selezionati rosso/IR

Produttore	Modello	λ_{pk} (nm)	I_{test} (mA)	OP	Pkg (mm)	I_{max} (mA)
Cree	XPEEPR-L100C01	660	350	438 mW	3.45x3.45	1000
Osram	SYNIOS P2720	632	700	81 lm	2.75x2.00	1000
Osram	KR-CSLNM 1,23	61	1000	140 lm	3.00x3.00	2500
Cree	XPEBFR-L1-901	740	350	350 mW	3.45x3.45	1000
Cree	XQERED-801	630	350	73.9 lm	1.60x1.60	1000
Osram	SFH 4715AS	860	1000	1340 mW	3.85x3.85	1500
Luxeon	L1I0-0940060	940	1000	1200 mW	3.70x3.70	1000
Luxeon	L1I0-0940150	940	1000	1200 mW	3.70x3.70	1000
Luxeon	L1I0-0850060	850	1000	1200 mW	3.70x3.70	1000
Luxeon	L1I0-0850150	850	1000	1200 mW	3.70x3.70	1000

Tabella 5.4: Modelli acquistati

Modelli royal blue	Modelli rossi/IR
XQEROY-Q01	XPEEPR-L1-C01
XQEROY-P01	XQERED-801
XPGDRY-L1-601	L1I0-0940060
GD CSSRM2.14	L1I0-0940150
GD CSSPM1.14	L1I0-0850060
LD CQAR AQAS	L1I0-0850150
XPEBRY-L1-R250-R01	
XQEROY-H0-P01	

Tabella 5.5: Ottiche scelte

Modello	FWHM	Efficienza
HEIDI-RS	6°	94%
LEIA-S	3°	47%
EMILY-RS	4°	94%
IRIS	5°	93%
CRYSTAL-MINE	5°	94%
REGINA	10°	86%

5.3 Caratterizzazione in sfera integratrice

Per poter caratterizzare le sorgenti in sfera integratrice è stato necessario innanzitutto progettare delle PCB in alluminio in modo da poter posizionare i campioni sulla strumentazione e quindi effettuare le misure. Nel progetto di queste si è tenuto conto sia della larghezza delle piste necessaria a far circolare la massima corrente sia della larghezza e dimensione dei fori di alloggiamento per centrare le ottiche scelte. Si è predisposta inoltre una doppia piazzola di contatto sia all'anodo che al catodo per poter eseguire agevolmente una misura a 4 terminali. Quest'ultima si è resa necessaria in quanto la lunghezza dei cavi di collegamento tra il campione e lo strumento di misura non è indifferente.

Esempi di progetto e realizzazione delle basette sono mostrati in figura 5.1 e 5.2.

In seguito i vari campioni sono stati posti all'interno della sfera integratrice come in figura 5.3.

Le misure si sono realizzate tramite gli strumenti SMU Keithley 2614B e lo spettrometro Ocean Optics USB4000 gestiti in automatico tramite un applicativo Labview. Per ogni campione le misure sono state svolte con le seguenti impostazioni iniziali:

- tempo di integrazione: 400 ms
- ripetizione della misura: 5 volte
- punti di media: 3
- step di corrente: 50 mA
- corrente massima: 150 mA in meno della specifica presente nei datasheet

Inoltre si è svolta anche la caratterizzazione I-V delle sorgenti con step di tensione pari a 50 mV.

Per i limiti del SMU è stato necessario limitare le misure alla corrente $I=1.45$ A.

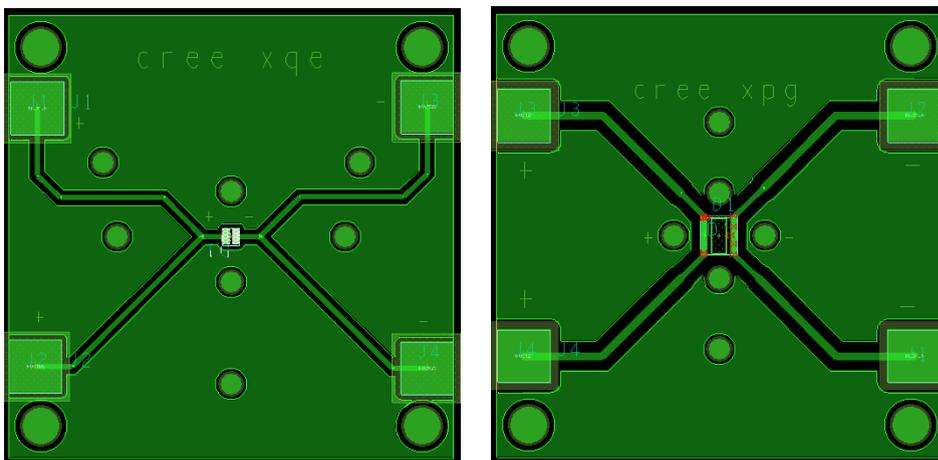


Figura 5.1: Esempi di progetto delle basette

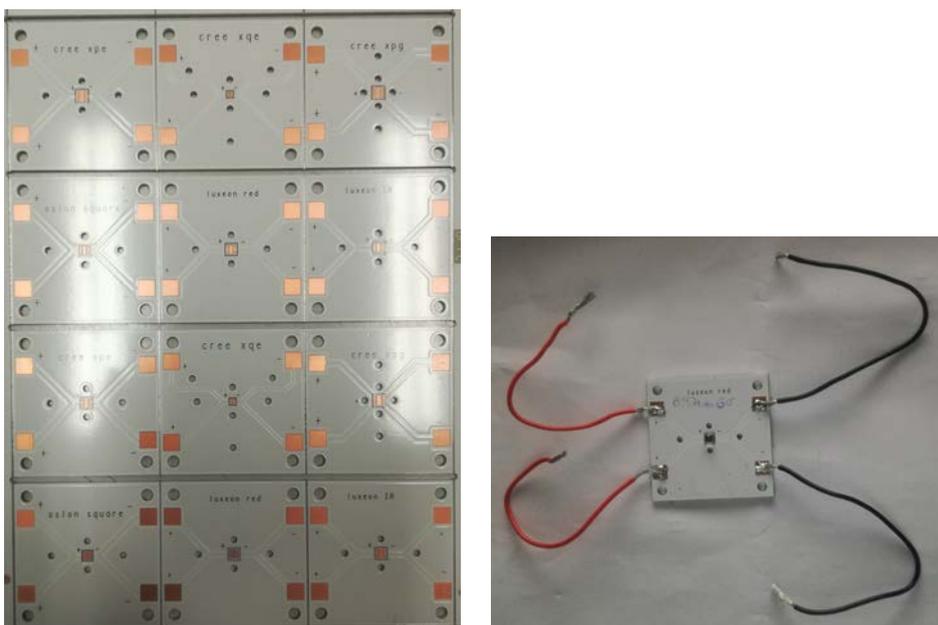
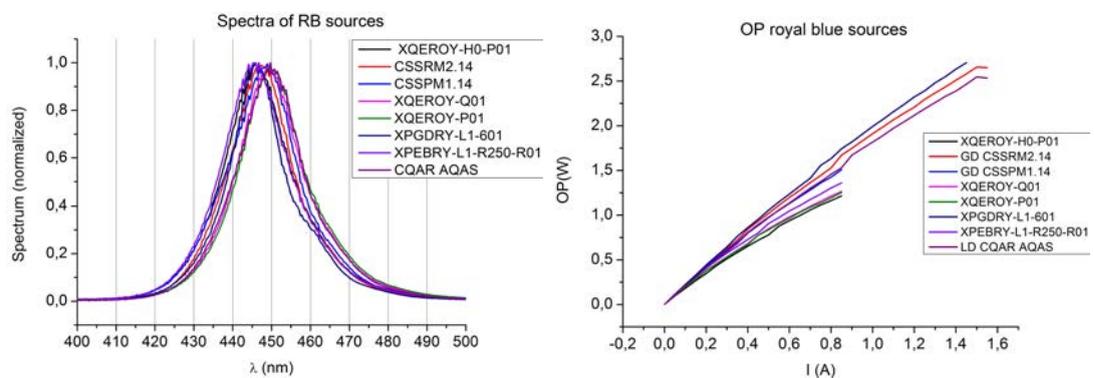


Figura 5.2: Basette progettate ed esempio di sorgente montata



Figura 5.3: Posizionamento all'interno della sfera integratrice (sfera aperta per esigenze fotografiche)

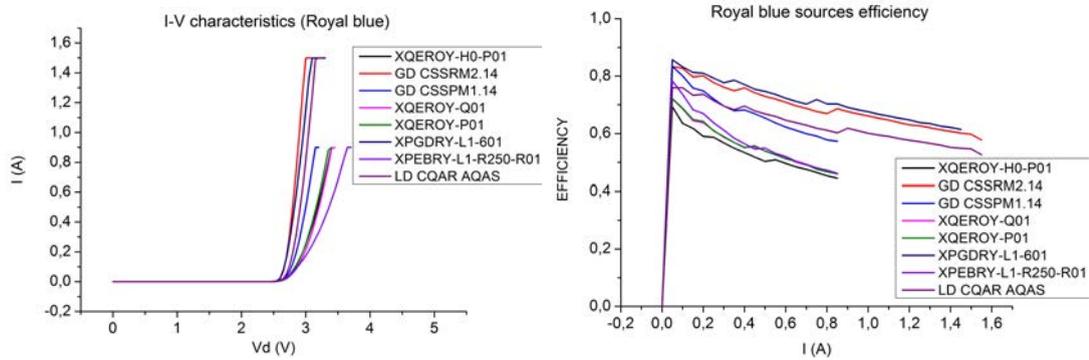
5.3.1 Sorgenti in banda royal blue



(a) Spettro delle sorgenti royal blue misurato a 700mA **(b)** Potenza ottica emessa dalle sorgenti in banda royal blue

Figura 5.4

Dalla caratteristica I-V di figura 5.5a si nota immediatamente come le sorgenti più piccole (e che presentano una corrente massima supportata più bassa) abbiano bisogno di una tensione mediamente superiore a parità di tensione. Ciò in generale è indicativo di un rendimento mediamente più basso. Dalla misura dello spettro



(a) Caratteristica I-V delle sorgenti royal blue (b) Efficienza calcolata delle sorgenti in banda royal blue

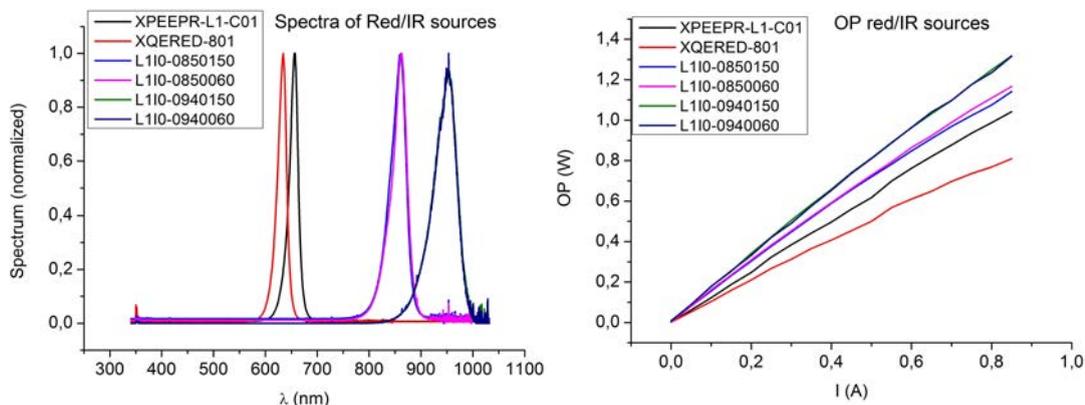
Figura 5.5

(riportata in figura 5.4a) si nota che tutte le sorgenti presentano il picco di emissione compreso tra i 445 e 450 nm circa. Dalla misura della potenza ottica emessa dalle sorgenti (immagine 5.4b) si nota quindi che, a parità di corrente di polarizzazione, le sorgenti CSSRM2.14, XPGDRY-L1-601 e CQAR AQAS le quali emettono una quantità maggiore di potenza. Infine, tramite la formula 5.2, è possibile calcolare l'efficienza delle sorgenti, riportata in figura 5.5b

$$EFF = \frac{OP}{V \times I} \quad (5.2)$$

Pertanto risulta che le sorgenti XPGDRY-L1-601 e CSSRM2.14 siano quelle con maggiore efficienza.

5.3.2 Sorgenti in banda rosso/IR



(a) Spettro delle sorgenti rosso/IR misurato a 700 mA (b) Potenza ottica emessa dalle sorgenti rosso/IR

Figura 5.6

Con riferimento alla figura 5.7a è possibile notare che per le sorgenti IR è necessaria una tensione maggiore per ottenere la stessa polarizzazione in corrente.

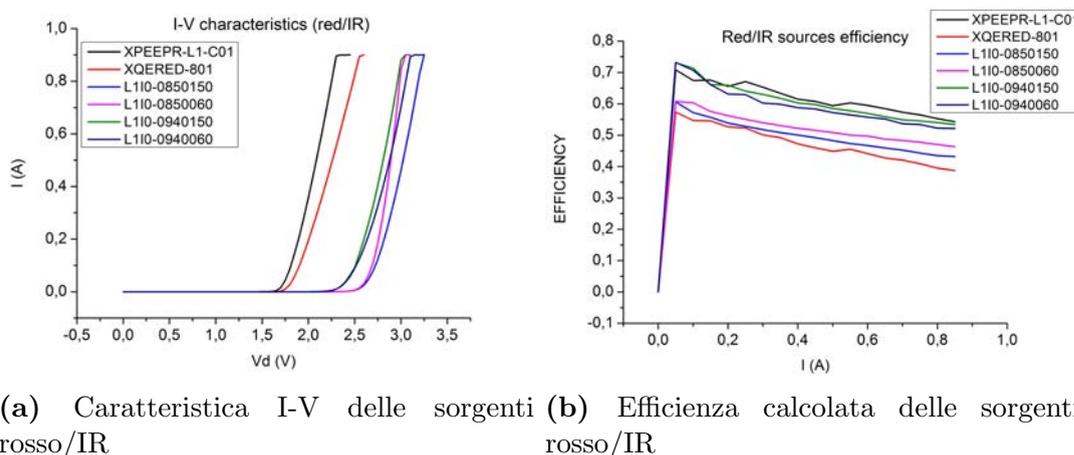


Figura 5.7

Dalla misura dello spettro delle sorgenti rosse/IR di figura 5.6a è possibile quindi notare che due di queste presentano un picco a 630 e 660 nm (spettro visibile, percepito di colore rosso) mentre le altre quattro sorgenti presentano uno spettro sovrapponibile con picco a 850 e 940 nm (spettro infrarosso e pertanto non visibile). Osservando la figura 5.6b è possibile apprezzare come le sorgenti L1I0-0940060 e L1I0-0940150 presentino una maggiore potenza irradiata rispetto alle altre. In seguito è possibile osservare dalla figura 5.7b come le stesse due sorgenti presentino anche l'efficienza maggiore assieme alla XPEEPR-L1-C01.

5.3.3 Discussione dei risultati ottenuti

Da questa prima caratterizzazione di tutte le sorgenti acquistate è possibile quindi considerare le sorgenti più idonee per ogni tipologia di chip: in particolare si è scelto il XPGDRY-L1-601 e XPEBRY-L1-R250-R01 per quanto riguarda la banda royal blue e i L1I0-0940060 e L1I0-0940150 per quanto riguarda la banda rossa/IR. I dati che hanno portato a questa scelta sono illustrati nella tabelle 5.6 e 5.7. Si è voluto inoltre aggiungere alle sorgenti citate anche il modello XQEROY-Q01

Tabella 5.6: Tabella riassuntiva di Potenza ottica ed efficienza per sorgenti royal blue polarizzate a 0.85 A

Sorgenti	OP (W)	Efficienza
XQEROY-Q01	1.264	0.460
XQEROY-P01	1.252	0.460
XPGDRY-L1-601	1.742	0.703
GD CSSRM2.14	1.671	0.686
GD CSSPM1.14	1.509	0.573
LD CQAR AQAS	1.529	0.602
XPEBRY-L1-R250-R01	1.360	0.461
XQEROY-H0-P01	1.215	0.444

che, per le sue piccole dimensioni, dovrebbe risultare facilmente concentrabile in

Tabella 5.7: Tabella riassuntiva di Potenza ottica ed efficienza per sorgenti rosse/IR polarizzate a 0.85 A

Sorgenti	OP (W)	Efficienza
XPEEPR-L1-C01	1.040	0.543
XQERED-801	0.810	0.387
L1I0-0940060	1.316	0.521
L1I0-0940150	1.318	0.534
L1I0-0850150	1.141	0.432
L1I0-0850060	1.166	0.464

un'area ristretta. La sorgente XQEROY-H0-P01, scelta anch'essa, presenta un'ottica primaria piana, la quale, pur riducendo l'efficienza di estrazione, dovrebbe favorire la concentrazione del fascio emesso da parte dell'ottica secondaria. In questo caso infatti, la dimensione effettiva della sorgente sarà inferiore, consentendo una migliore prestazione dell'ottica secondaria.

5.4 Misura dell'efficienza con ottica montata

In questo caso si sono svolte in sfera integratrice le medesime misure descritte in precedenza, con le sorgenti appena selezionate, al fine di individuare le ottiche con efficienza più alta e quindi un confronto con la misura effettuata senza ottica, cioè a vuoto.

Sono state quindi selezionate le ottiche IRIS, LEIA-S, CRYSTAL-MINE e il riflettore REGINA in quanto presentano (da datasheet) la minore FWHM ma allo stesso tempo un'efficienza superiore.

Dall'osservazione delle figure 5.8, 5.9, 5.10 si nota che l'ottica a efficienza maggiore tra quelle prese in considerazione sia il modello CRYSTAL-MINE. Viene inoltre presa in considerazione anche l'ottica LEIA-S in quanto presenta sì un'efficienza pari circa alla metà della CRYSTAL-MINE, ma allo stesso tempo è indicata una FWHM inferiore rispetto a quest'ultima. Pertanto la potenza irradiata rispetto all'area dovrebbe essere confrontabile.

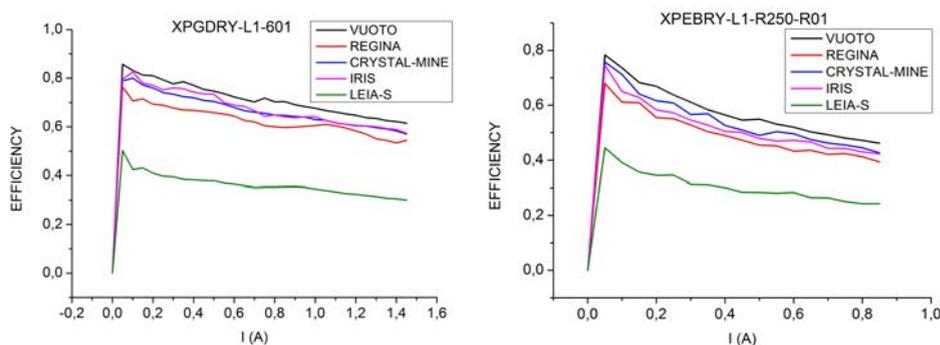


Figura 5.8: Efficienza con ottica montata delle sorgenti royal blue XPGDRY-L1-601 e XPEBRY-L1-R250-R01

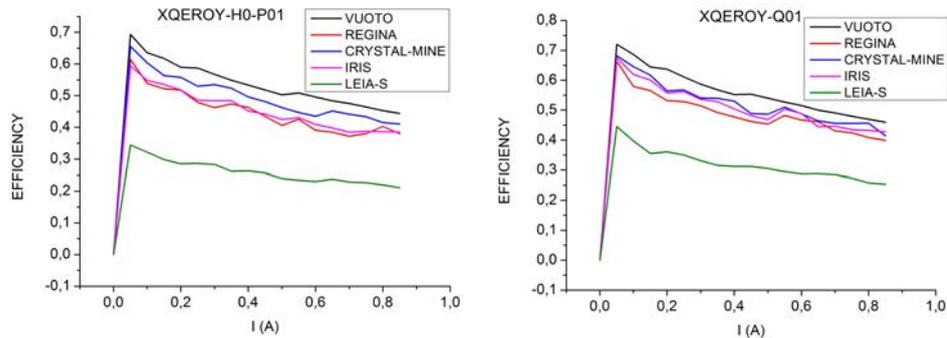


Figura 5.9: Efficienza con ottiche montate delle sorgenti XQE

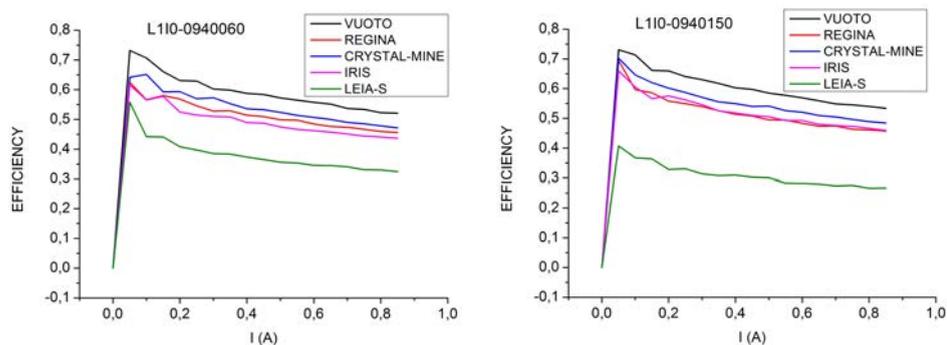


Figura 5.10: Efficienza con ottiche montate delle sorgenti IR

5.5 Considerazioni conclusive

L'obiettivo delle misure svolte è stato quindi quello di ricercare il sistema complessivo formato da sorgente e ottica più efficiente. Il confronto dell'efficienza delle ottiche secondarie montate sulle sorgenti è illustrato in tabella 5.8.

Per quanto indicato precedentemente si è deciso di continuare lo studio scegliendo le ottiche CRYSTAL-MINE e LEIA-S e le sorgenti XPGDRY-L1-601, XPEBRY-L1-R250-R01, XQEROY-Q01, XQEROY-H0-P01, L110-0940060 e L110-0940150.

Lo studio quindi procede con la valutazione dell'irradianza su un piano parallelo alla sorgente per poter individuare la massima concentrazione di potenza ottenibile con queste ottiche e sorgenti.

Tabella 5.8: Valori di efficienza misurata con ottica secondaria montata e sorgenti polarizzati a 0.85 A

Sorgenti	VUOTO	REGINA	CRYSTAL-MINE	IRIS	LEIA-S
XPGDRY-L1-601	0.703	0.597	0.646	0.641	0.354
XPEBRY-L1-R250-R01	0.461	0.393	0.426	0.422	0.243
XQEROY-Q01	0.460	0.399	0.414	0.427	0.254
XQEROY-H0-P01	0.444	0.380	0.411	0.385	0.211
L110-0940060	0.521	0.456	0.472	0.437	0.325
L110-0940150	0.534	0.457	0.484	0.459	0.267

Capitolo 6

Caratterizzazione con tavola xy

In questo capitolo vengono analizzate e confrontate alcune misure di irradianza eseguite con tavola xy: l'obiettivo della caratterizzazione è quello di individuare il sistema sorgente+ottica in grado di collimare in un'area ristretta il maggior valore di potenza ottica possibile.

6.1 Procedura di misura

Poichè è necessario confrontare le singole misure, si è deciso di eseguirle nelle stesse identiche condizioni, per cui i campioni sono stati posti a un metro di distanza tra il bordo superiore dell'ottica e il sensore sottostante. Inoltre si è scelta la corrente di polarizzazione di 200 mA in modo da non scaldare eccessivamente i LED, anche a causa del fatto che in questa fase non sono stati montati dei dissipatori. Per quanto riguarda il sistema di misura è stato impostato in questo modo:

- area di misura pari a $25.5\text{ cm} \times 25.5\text{ cm} = 650.25\text{ cm}^2$
- step di misura è pari a 0.5 cm : di conseguenza ogni valore misurato corrisponde ad una superficie di 0.25 cm^2
- sensore di irradianza: sonda LP 471 RAD collegata al fotoradiometro Deltaohm HD 2102.2

6.2 Risultati con l'ottica CRYSTAL MINE

6.2.1 Irradianza

Nelle figure 6.1, 6.2 e 6.3 sono mostrati i grafici dei valori di irradianza, espressa in $\mu W/cm^2$, rispetto al piano parallelo posto a un metro di distanza. Sono inoltre riassunti in tabella 6.1 i valori di picco di irradianza per ogni sorgente assieme all'ottica CRYSTAL MINE. Si nota subito come effettivamente il LED XQEROY-Q01 presenti una maggiore densità di potenza rispetto agli altri e un'area illuminata di dimensioni inferiori.

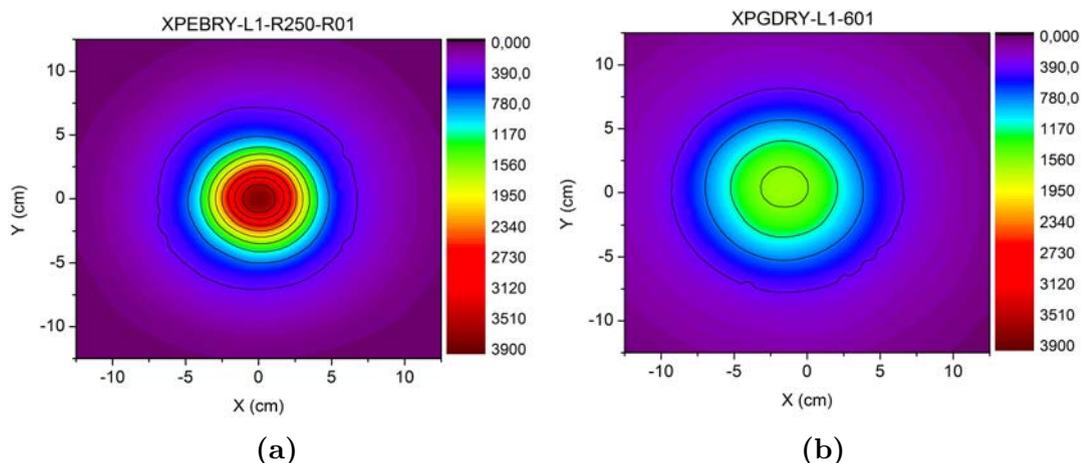


Figura 6.1: Grafico di irradianza su piano delle sorgenti royal blue di dimensioni maggiori XPEBRY-L1-R250-R01 (a) e XPGDRY-L1-601 (b)

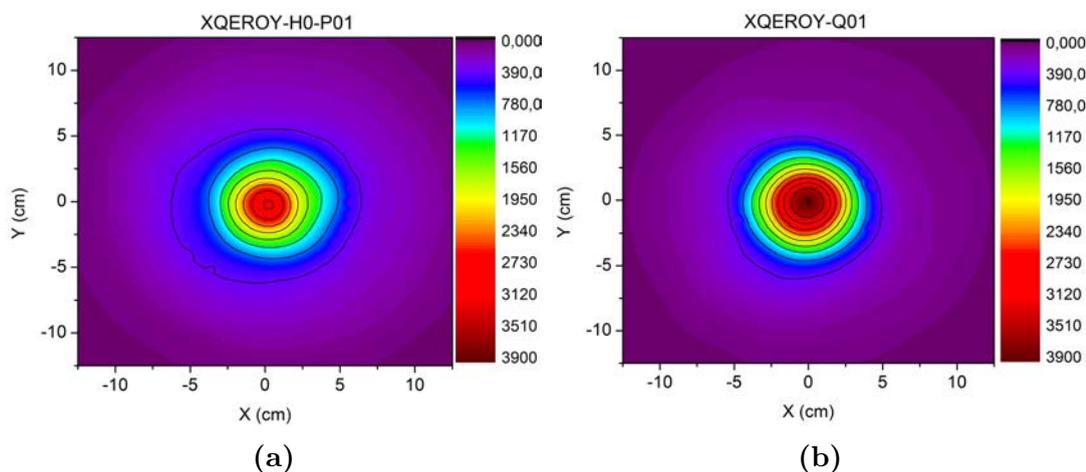


Figura 6.2: Grafico di irradianza su piano delle sorgenti royal blue di dimensioni più piccole XQEROY-H0-P01 (a) e XQEROY-Q01 (b)

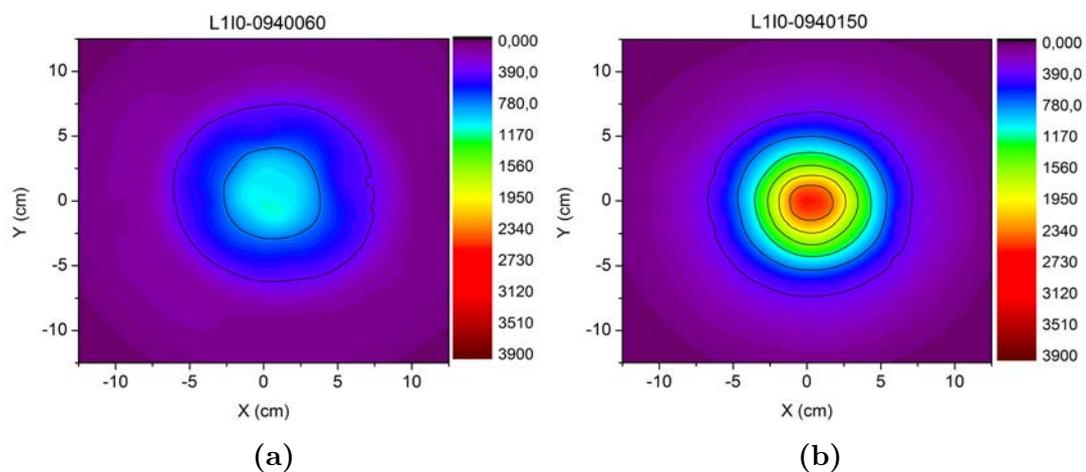


Figura 6.3: Grafico di irradianza su piano delle sorgenti IR L110-0940060 (a) e L110-0940150 (b)

Tabella 6.1: Valori di massima irradianza misurati con corrente di polarizzazione pari a 200 mA

Optical source	Peak value ($\mu W/cm^2$)
XPEBRY-L1-R250-R01	3850
XPGDRY-L1-601	1640
XQEROY-H0-P01	3145
XQEROY-Q01	3926
L110-0940150	2606
L110-0940060	1111

6.2.2 Potenza ottica

Partendo dai dati misurati sull'irradianza e tenendo conto che ogni dato è riferito ad un'area di 0.25 cm^2 è possibile calcolare la potenza ottica in funzione dell'area di misura. L'area è stata calcolata partendo dal punto centrale (a massima irradianza) con shape quadrata e lato crescente a step di 1 cm. Si è deciso inoltre di considerare l'area di misura più piccola pari a $5.5 \times 5.5 \text{ cm}$ in quanto corrispondente al target di specifica da irradiare. In particolare ciò è mostrato nel grafico in figura 6.4a. In tabella 6.2 sono riportati dei valori notevoli della potenza ottica relativi ad alcuni valori di area prefissati.

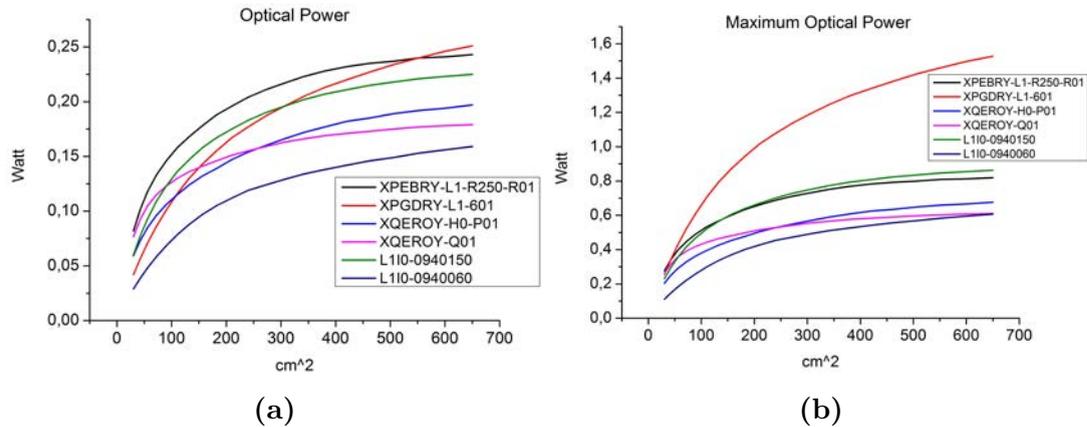


Figura 6.4: Grafico di potenza ottica misurata rispetto all'area ad una corrente di 200 mA (a) e massima potenza ottica alla massima corrente nominale (da caratterizzazione in sfera integratrice) per ciascun LED (b)

È stato inoltre importante cercare di calcolare la massima potenza ottica disponibile per ogni LED, in modo da attuare un confronto più completo. Pertanto, sfruttando la caratterizzazione fatta in sfera integratrice alla massima corrente disponibile, si è proceduto a calcolare la massima potenza ottica tramite la formula

$$OP_{xy,max} = \frac{OP_{xy,200mA}}{OP_{sph,200mA}} OP_{sph,max} \quad (6.1)$$

dove $OP_{xy,200mA}$ è la potenza ottica misurata con la tavola xy e corrente di polarizzazione di 200 mA, $OP_{sph,200mA}$ è la corrispondente potenza ottica misurata in sfera

Tabella 6.2: Valori di potenza ottica notevoli riferiti alla figura 6.4a

Area (cm^2)	30.25	110.25	240.25	420.25	650.25
XPEBRY-L1-R250-R01	0.0819	0.158	0.204	0.232	0.243
XPGDRY-L1-601	0.0420	0.116	0.177	0.220	0.251
XQEROY-H0-P01	0.0593	0.115	0.154	0.182	0.197
XQEROY-Q01	0.0766	0.130	0.155	0.171	0.179
L1I0-0940150	0.0602	0.136	0.183	0.211	0.225
L1I0-0940060	0.0289	0.0784	0.119	0.142	0.159

integratrice della sorgente+ottica montata e infine $OP_{sph,max}$ è la massima potenza ottica misurata in sfera integratrice sempre con ottica montata. Utilizzando i valori di tabella 6.3, il risultato è mostrato nel grafico di figura 6.4b.

Sono riportati inoltre i dati relativi al grafico 6.4b per una lettura più agevole in tabella 6.4.

Tabella 6.3: Valori di massima potenza ottica da caratterizzazione in sfera integratrice

Led model	OP sphere (W)	OP sphere max (W)	I (A)
XPEBRY-L1-R250-R01	0.372	1.256	0.850
XPGDRY-L1-601	0.420	2.558	1.450
XQEROY-H0-P01	0.327	1.123	0.850
XQEROY-Q01	0.334	1.141	0.850
L1I0-0940150	0.313	1.200	0.850
L1I0-0940060	0.317	1.193	0.850

Tabella 6.4: Valori di massima potenza ottica notevoli riferiti alla figura 6.4b

Area (cm^2)	30.25	110.25	240.25	420.25	650.25	OP_{tot} (W)
XPEBRY-L1-R250-R01	0.276	0.533	0.688	0.782	0.820	1.256
XPGDRY-L1-601	0.256	0.706	1.077	1.339	1.528	2.558
XQEROY-H0-P01	0.204	0.395	0.529	0.625	0.676	1.123
XQEROY-Q01	0.261	0.443	0.529	0.583	0.611	1.141
L1I0-0940150	0.231	0.521	0.701	0.809	0.862	1.200
L1I0-0940060	0.110	0.299	0.454	0.542	0.607	1.193

6.2.3 Efficienza complessiva

Per calcolare l'efficienza complessiva rispetto alla potenza ottica incidente su un piano parallelo, è stato necessario considerare la potenza elettrica assorbita dalla sorgente, misurata durante la caratterizzazione in sfera integratrice. In seguito, grazie alla formula 6.2 è possibile valutare l'efficienza totale del sistema in relazione alla superficie irradiata.

$$EFF = \frac{OP_{xy}}{EP_{sph}} \quad (6.2)$$

In questa formula, EP_{sph} è la potenza elettrica assorbita dalla sorgente e OP_{xy} è la potenza ottica misurata con la tavola xy. Vengono quindi riportati in tabella 6.5 i valori di potenza elettrica assorbita in condizione di massima corrente di polarizzazione. Pertanto viene mostrato nel grafico di figura 6.5 l'andamento dell'efficienza (in condizione di massima corrente di polarizzazione caratterizzata) in funzione dell'area irradiata.

Tabella 6.5: Potenza assorbita dai LED

LED model	V_d (V)	I_d (A)	EP_{sph} (W)
XPEBRY-L1-R250-R01	3.469	0.850	2.947
XPGDRY-L1-601	3.037	1.450	4.572
XQEROY-H0-P01	3.002	0.850	2.735
XQEROY-Q01	3.240	0.850	2.752
L1I0-0940150	2.604	0.850	2.477
L1I0-0940060	2.970	0.850	2.530

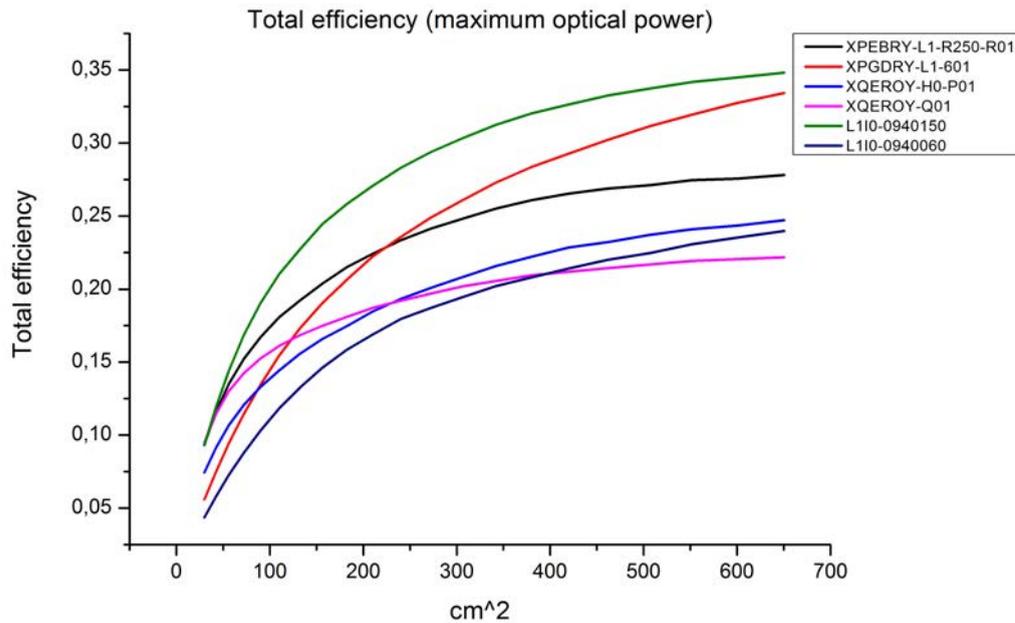


Figura 6.5: Efficienza delle sorgenti in funzione dell'area interessata in condizione di massima potenza assorbita (da caratterizzazione in sfera integratrice)

6.2.4 Densità di potenza

È inoltre stata calcolata la densità di potenza ottica in funzione dell'area (irradianza media) usando la formula seguente.

$$IRR = \frac{OP_{xy}}{Area} \quad (6.3)$$

Il risultato è riportato in figura 6.6.

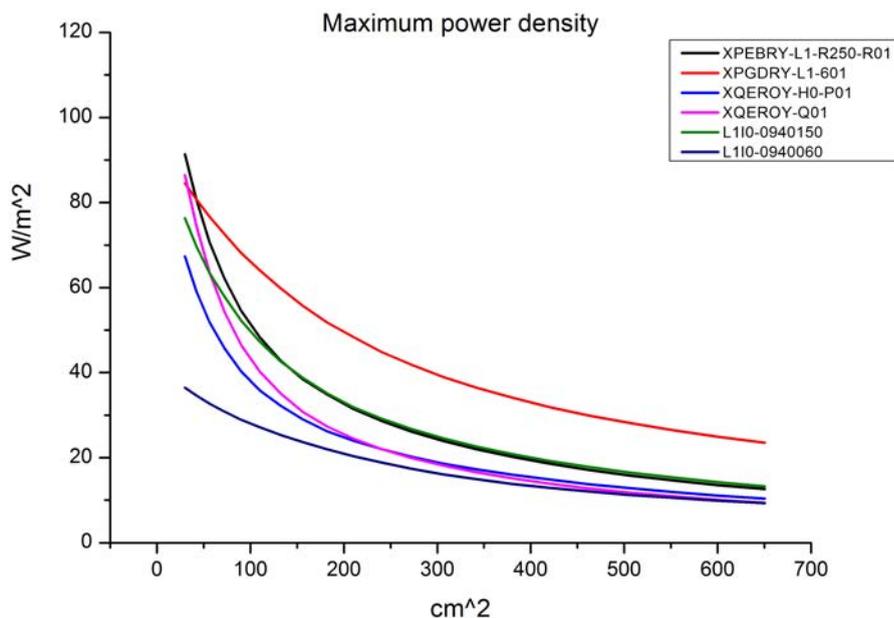


Figura 6.6: Densità media delle sorgenti in funzione dell'area interessata con massima corrente assorbita

6.3 Risultati con l'ottica LEIA-S

6.3.1 Irradianza

Per quanto riguarda le misure di irradianza, queste sono state eseguite nelle stesse condizioni e impostazioni strumentali di quelle con ottica CRYSTAL MINE, pertanto vengono presentati sia i valori di picco di irradianza (in $\mu W/cm^2$) in tabella 6.6 sia la densità planare, sempre con unità di misura $\mu W/cm^2$ nelle figure 6.7, 6.8 e 6.9.

Tabella 6.6: Valori di irradianza di picco delle sorgenti con ottica LEIA-S alla corrente di 200 mA

LED model	Peak value ($\mu W/cm^2$)
XPEBRY-L1-R250-R01	3206
XPGDRY-L1-601	1346
XQEROY-H0-P01	3202
XQEROY-Q01	3976
L1I0-0940150	1870
L1I0-0940060	1927

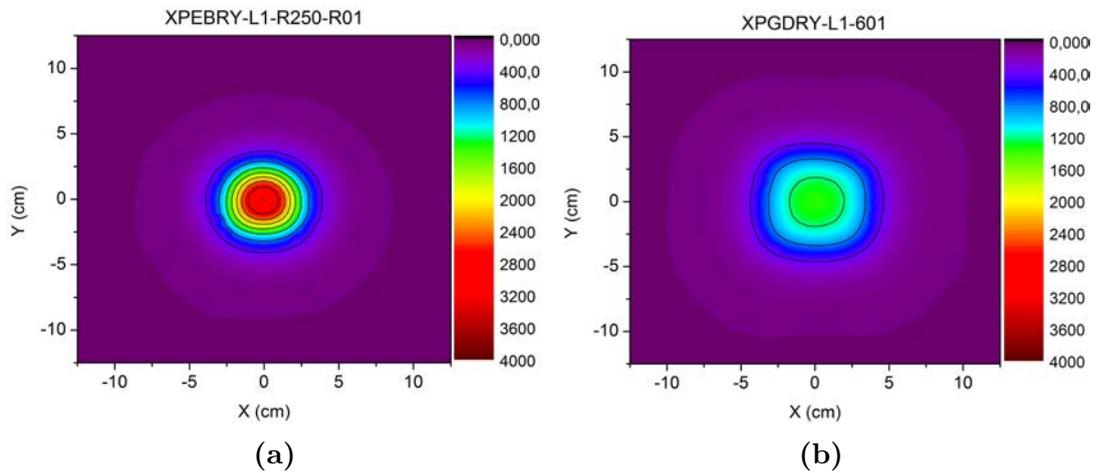


Figura 6.7: Grafico di irradianza misurata su piano delle sorgenti royal blue di dimensioni maggiori XPEBRY-L1-R250-R01 (a) e XPGDRY-L1-601 (b)

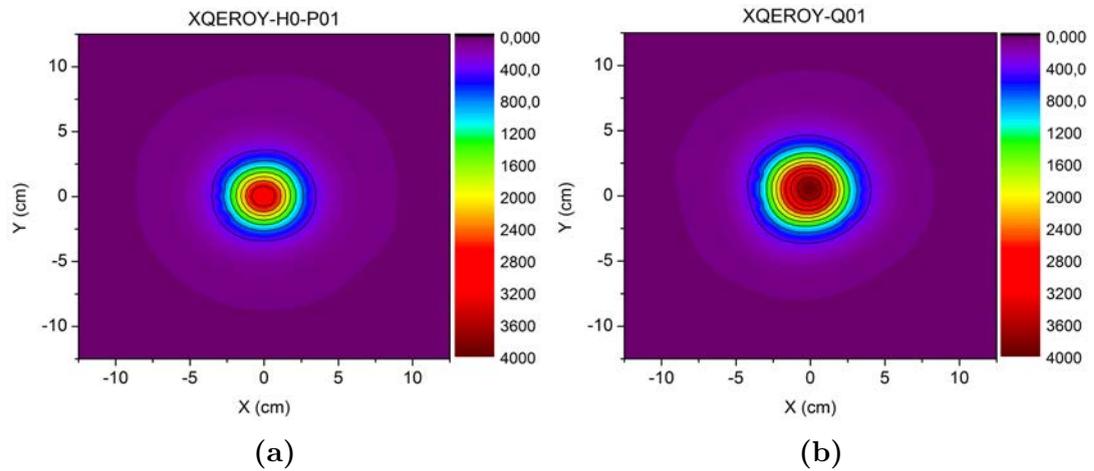


Figura 6.8: Grafico di irradianza misurata su piano delle sorgenti royal blue di dimensioni più piccole XQEROY-H0-P01 (a) e XQEROY-Q01 (b)

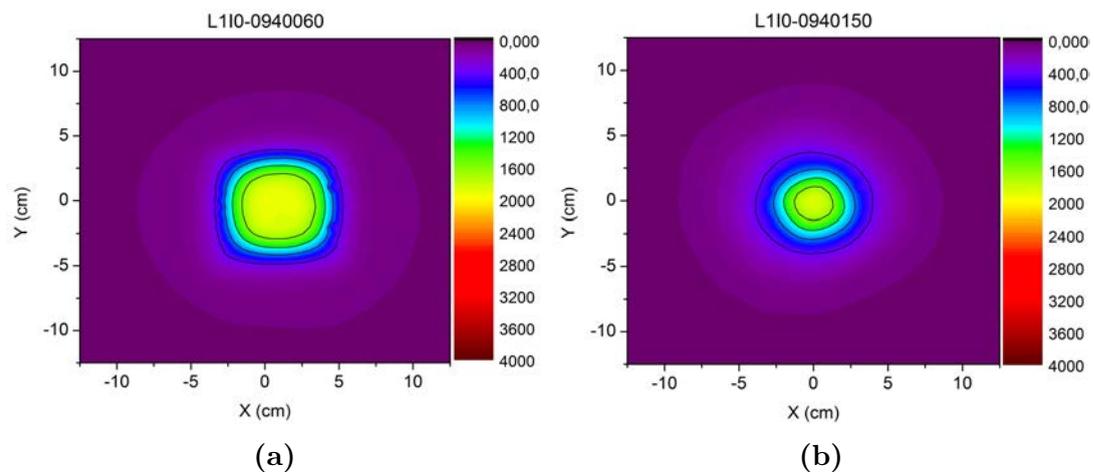


Figura 6.9: Grafico di irradianza misurata su piano delle sorgenti IR L110-0940060 (a) e L110-0940150 (b)

6.3.2 Potenza ottica

Come nel caso dell'ottica CRYSTAL MINE, è stata calcolata la potenza incidente in funzione dell'area irradiata e inoltre, usando le stesse formule proposte nei paragrafi precedenti, è stata illustrata in un grafico la massima potenza disponibile (secondo la caratterizzazione in sfera integratrice). Il risultato è mostrato in figura 6.10a e 6.10b. Per il calcolo della massima potenza disponibile si sono usati i dati relativi alla potenza ottica misurata in sfera integratrice relativamente al sistema sorgente+ottica montata riportati in tabella 6.7. Nelle tabelle 6.8 e 6.9 sono invece riportati dei valori di potenza per alcune aree di dimensioni fissate.

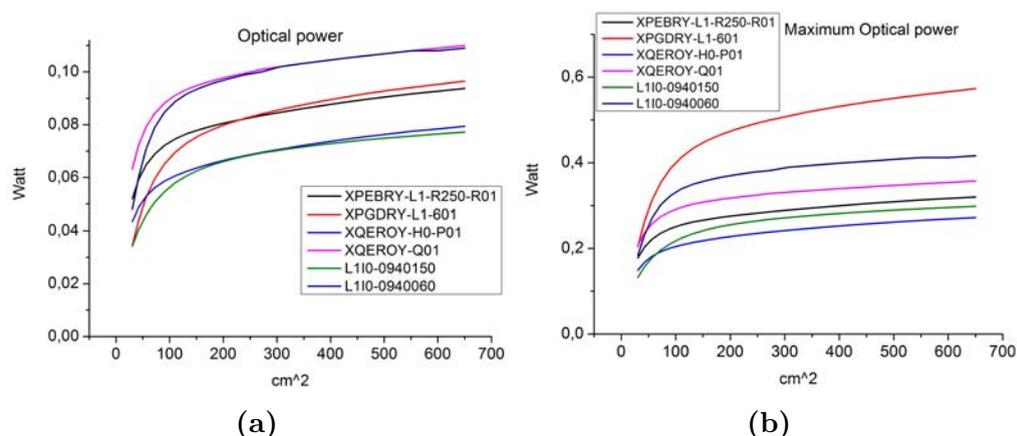


Figura 6.10: Grafico di potenza ottica misurata con tavola xy alla corrente di 200 mA (a) e massima potenza ottica alla massima corrente nominale (caratterizzata in sfera integratrice) per ciascun LED (b)

Tabella 6.7: Valori di massima potenza ottica dalla caratterizzazione in sfera integratrice per l'ottica LEIA-S

Led model	OP sphere (W)	OP sphere max (W)	I (A)
XPEBRY-L1-R250-R01	0.208	0.712	0.85
XPGDRY-L1-601	0.228	1.351	1.450
XQEROY-H0-P01	0.167	0.573	0.850
XQEROY-Q01	0.213	0.694	0.850
L1I0-0940150	0.171	0.660	0.850
L1I0-0940060	0.210	0.821	0.850

Tabella 6.8: Valori di potenza ottica (W) su alcune aree di interesse riportate nel grafico di figura 6.10a

Area (cm^2)	30.25	110.25	240.25	420.25	650.25
XPEBRY-L1-R250-R01	0.0520	0.0746	0.0822	0.0883	0.0937
XPGDRY-L1-601	0.0344	0.0695	0.0824	0.0902	0.0965
XQEROY-H0-P01	0.0435	0.0606	0.0682	0.0743	0.0794
XQEROY-Q01	0.0632	0.0911	0.0995	0.105	0.110
L1I0-0940150	0.0342	0.0580	0.0680	0.0733	0.0772
L1I0-0940060	0.0480	0.0888	0.0989	0.105	0.109

Tabella 6.9: Valori di potenza ottica (W) su alcune aree di interesse riportate nel grafico di figura 6.10b

Area (cm ²)	30.25	110.25	240.25	420.25	650.25	OP_{tot} (W)
XPEBRY-L1-R250-R01	0.178	0.255	0.281	0.302	0.320	0.712
XPGDRY-L1-601	0.204	0.413	0.489	0.536	0.573	1.351
XQEROY-H0-P01	0.149	0.208	0.234	0.254	0.272	0.573
XQEROY-Q01	0.205	0.296	0.323	0.341	0.357	0.694
L110-0940150	0.132	0.224	0.263	0.283	0.298	0.660
L110-0940060	0.183	0.339	0.377	0.401	0.416	0.821

6.3.3 Efficienza complessiva

Il calcolo dell'efficienza complessiva è stato svolto sfruttando i valori della caratterizzazione in sfera integratrice, come nel caso dell'ottica CRYSTAL MINE precedentemente rappresentato. I valori ottenuti sono quindi mostrati in figura 6.11.

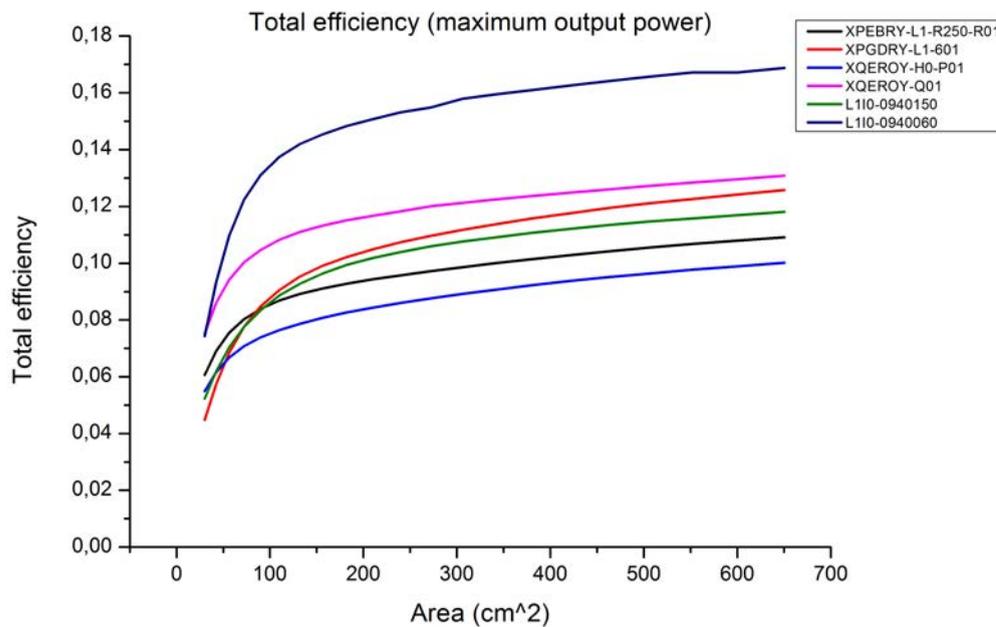


Figura 6.11: Efficienza delle sorgenti in funzione dell'area interessata in condizione di massima corrente assorbita (caratterizzata in sfera integratrice)

6.3.4 Densità di potenza

È inoltre riportata la densità di potenza in funzione dell'area per quanto riguarda l'ottica LEIA-S. Il risultato è mostrato in figura 6.12.

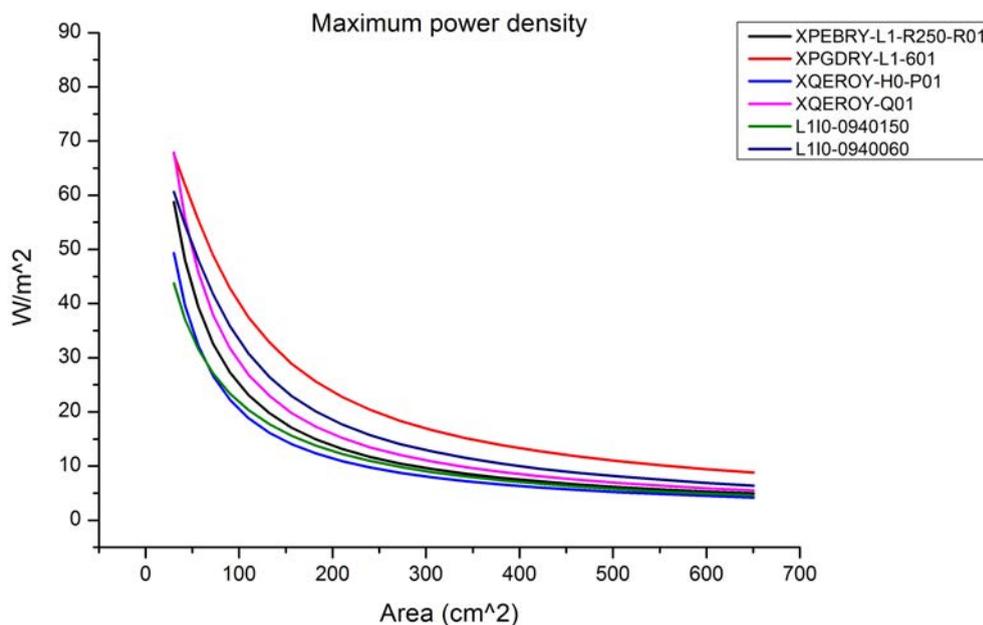


Figura 6.12: Densità di potenza delle sorgenti in funzione dell'area interessata in condizione di massima corrente assorbita (caratterizzata in sfera integratrice)

6.4 Conclusioni

Per quanto riguarda l'ottica CRYSTAL MINE, è possibile notare che la sorgente che presenta una migliore collimazione del flusso radiante è la XQEROY-Q01, e questo è confermato anche dal grafico di figura 6.4, il quale, per la sorgente citata, presenta la curva più piatta all'aumentare dell'area di misura. Di contro però la sorgente XQEROY-Q01 presenta una corrente massima supportata minore rispetto alla XPGDRY-L1-601, con conseguente valore minore di massima potenza ottica emessa. Riferendosi quindi all'ottica XQEROY-Q01, è vero che presenta la peggiore collimazione a parità di corrente, tuttavia è la sorgente che emette la maggior quantità di flusso radiante la quale pertanto permette di raggiungere un valore di irradianza maggiore nonostante l'area illuminata sia più grande.

Un altro aspetto su cui porre attenzione è il confronto della figura 6.3: in questo caso si ha la stessa sorgente luminosa e la stessa ottica secondaria; ciò che cambia è solo l'ottica primaria: infatti il LED L1I0-0940060 emette con un angolo di 60° mentre il L1I0-0940150 emette con un angolo di 150°. Poiché l'efficienza totale misurata in sfera integratrice è molto simile, l'unica spiegazione possibile per un grafico d'irradianza così diverso è il fatto che l'ottica secondaria non sia stata progettata per collimare una sorgente con un angolo di emissione così stretto. Il risultato è un picco di irradianza pari alla metà di quello della sorgente con angolo di emissione di 60°.

Con riferimento all'efficienza complessiva del sistema di figura 6.5, è possibile notare

come la sorgente più efficiente, a parità di ottica, sia la L1I0-0940150 (IR). Se invece si considera l'ottica LEIA S e la figura 6.10 è possibile notare che, a parità di corrente, vengono privilegiate le sorgenti di dimensioni inferiori. In particolare la sorgente collimata in modo migliore risulta essere la XQEROY-Q01. Considerando invece la massima potenza ottica disponibile si osserva che la sorgente irradiante maggiormente, a parità di area, è la XPGDRY-L1-601.

Per quanto riguarda l'efficienza complessiva, la sorgente che porta ad avere un'efficienza maggiore è la L1I0-0940060.

Attuando ora un ulteriore confronto tra le due ottiche (CRYSTAL MINE e LEIA S) prese in considerazione e la sorgente XPGDRY-L1-601 si nota come effettivamente l'ottica LEIA S garantisce un angolo più stretto ma a spese dell'efficienza: dovendo quindi fare un paragone in termini di potenza irradiata a parità di sorgente risulta in questo caso più performante l'ottica CRYSTAL MINE.

Osservando più attentamente i dati, risulta però che la sorgente XPEBRY-L1-R250-R01 è quella che riesce a concentrare meglio la potenza con l'ottica CRYSTAL MINE montata. Tuttavia, poichè il passo successivo è quello che prevede la costruzione di un prototipo in cui più sorgenti riescano a collimare in uno stesso punto, avere un fascio leggermente più ampio permette di avere una tolleranza maggiore sulla struttura meccanica del sistema. In figura 6.13 è quindi possibile apprezzare la differenza di forma in 3D della potenza ottica irradiata sulla superficie.

Inoltre è da tenere in considerazione il fatto che la massima corrente ammessa dalla sorgente XPGDRY-L1-601 è pari a 2 A, di conseguenza la potenza ottica emessa a questa corrente sarà superiore a quella caratterizzata.

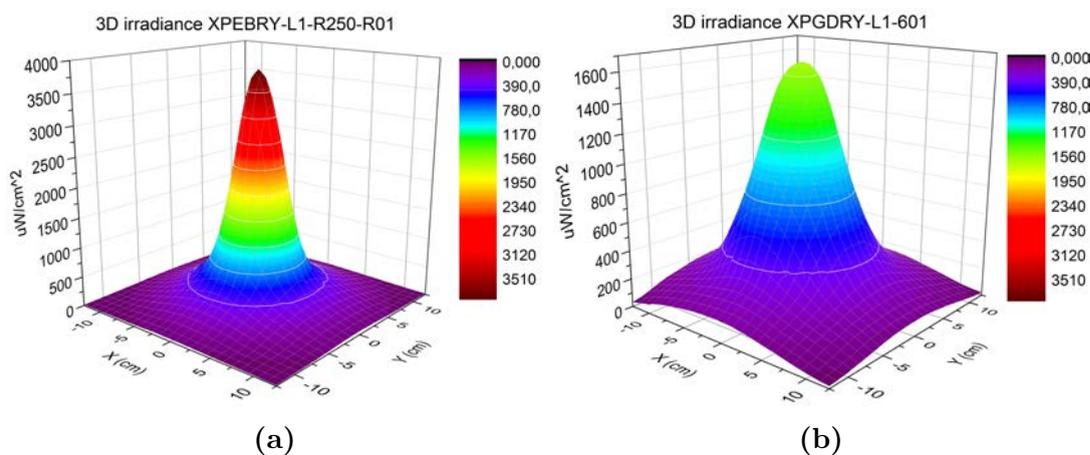


Figura 6.13: Grafico 3D della potenza irradiata alla corrente di 200 mA su un piano con ottica CRYSTAL MINE e sorgenti XPEBRY-L1-R250-R01 (a) e XPGDRY-L1-601 (b)

Si è quindi deciso di scegliere l'ottica CRYSTAL MINE e le sorgenti XPGDRY-L1-601 e L1I0-0940150. Pertanto si creeranno due versioni di un prototipo, una con la massima potenza ottica disponibile e l'altra con la massima efficienza tra i componenti caratterizzati.

Capitolo 7

Realizzazione prototipo

Nella realizzazione del prototipo finale è importante innanzitutto ottenere un modello affidabile dell'ottica scelta: poichè la casa produttrice, a causa dei segreti aziendali, divulga solo un modello meccanico simile di ogni ottica, è stato necessario realizzare una scansione 3D dell'ottica scelta e poi ricostruirla tramite un software CAD basato su SolidWorks, Optisworks.

7.1 Modello ottica CRYSTAL MINE

7.1.1 Costruzione del modello

Per ottenere un modello valido è stato necessario inizialmente scansionare l'oggetto mediante lo scanner 3D Shining Einscan-SP. Viste le difficoltà nella scansione, soprattutto per ottenere un buon profilo della regione interna (dove è alloggiata la sorgente), è stato necessario costruire un piedistallo in cartone in modo da migliorare l'acquisizione e permettere una migliore sovrapposizione di più scansioni. In seguito,

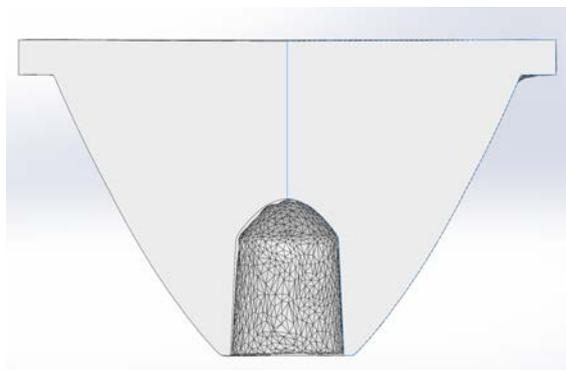


Figura 7.1: Sezione del modello scansionato con profilo di rotazione del modello definitivo

come mostrato in figura 7.1, si è proceduto a individuare una sezione centrale del modello scansionato e successivamente è stato possibile ricostruirlo tramite *spline* e, tramite rotazione attorno all'asse centrale, si è ottenuto il modello definitivo.

7.1.2 Confronto dati di misura e simulatore

Una volta costruito il modello della lente, è risultato importante fare una simulazione per comprendere la differenza con la misura reale: pertanto si è svolta la simulazione nelle stesse condizioni della tavola xy (distanza e potenza irradiata dalla sorgente), come mostrato in figura 7.2.

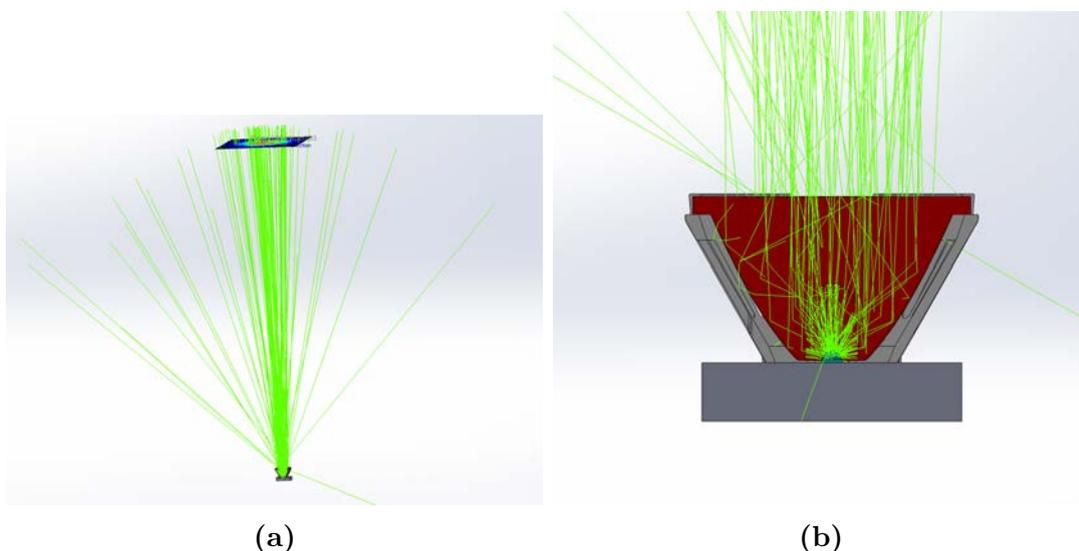


Figura 7.2: Simulazione in condizione di misura della tavola xy (a) e sezione del modello (b)

Dunque il risultato della simulazione è mostrato nel grafico di figura 7.3, in cui viene mostrata la potenza irradiata dalla sorgente XPGDRY-L1-601 in un piano parallelo al bordo dell'ottica, posto a un metro di distanza, e il valore misurato con tavola xy.

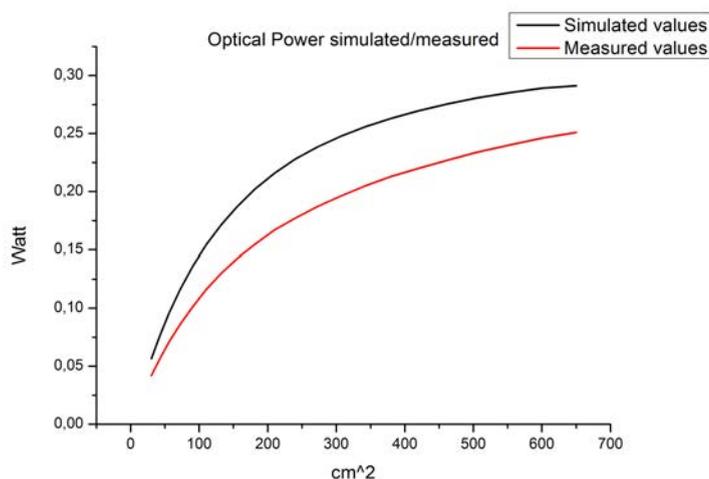


Figura 7.3: Grafico della potenza ottica della sorgente XPGDRY-L1-601 collimata dall'ottica CRYSTAL MINE. Confronto tra valori simulati e misurati

Tabella 7.1: Valori notevoli misurati e simulati relativi al grafico 7.3

Area (cm^2)	Valori misurati	Valori simulati
30.25	0.042	0.057
110.25	0.116	0.154
240.25	0.177	0.228
420.25	0.220	0.270
650.25	0.251	0.291

Per poter ora ottenere un modello più corretto in questa applicazione è necessario introdurre un fattore correttivo: osservando il grafico 7.3 e i valori in tabella 7.1 ci si accorge che tra le due tracce si verifica uno scostamento minimo pari al 26.1%. Ciò è dovuto alla superficie dell'ottica reale non perfetta, al materiale di fabbricazione non ideale e all'allineamento non perfetto tra ottica e sensore in fase di misura. Correggendo il valore attraverso la formula

$$CORR_{value} = 0.739 \times SIM_{value} \quad (7.1)$$

si ottiene il grafico di figura 7.4: in questo caso il grafico corretto risulterà sempre inferiore al valore misurato, fornendo una stima conservativa rispetto alla realizzazione pratica.

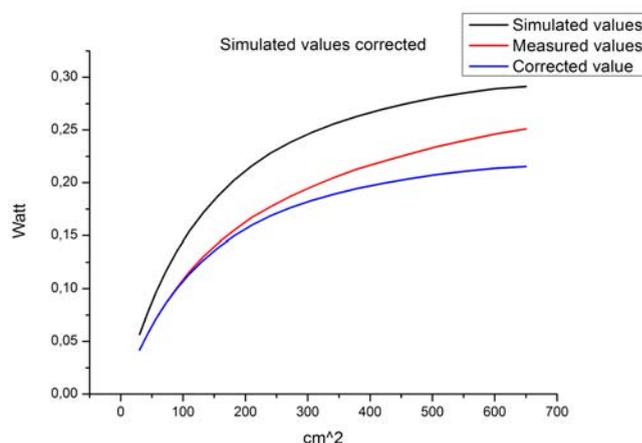


Figura 7.4: Grafico della potenza ottica della sorgente XPGDRY-L1-601 collimata dall'ottica CRYSTAL MINE. Introduzione del fattore correttivo sul valore simulato

7.2 Costruzione Prototipo

7.2.1 Definizione specifiche e scelte di progetto

Come specifica principale viene definita la massima irradianza che deve essere raggiunta, ovvero almeno $2000 W/m^2$ nella zona centrale di area $30.25 cm^2$, usando le sorgenti XPGDRY-L1-601, che sono le più potenti. Considerando il grafico della

densità di potenza ottenuto con tavola xy risulta che l'irradianza media, nella suddetta area, sia pari a $IRR = 84.52 \text{ W/m}^2$, per cui utilizzando almeno 24 sorgenti è possibile ottenere un'irradianza media (sempre nell'area sopracitata) superiore ai 2 kW/m^2 . Sono quindi usate 25 sorgenti in quanto facilmente posizionabili in una matrice 5×5 .

Considerata l'efficienza di queste pari a 0.61, è necessario predisporre un dissipatore per sorgente che riesca a dissipare all'incirca 1.8 W. La scelta è ricaduta quindi sul modello ATS-CPX045045035-164-C1-R0 il quale presenta una resistenza termica minima (per flusso d'aria non convogliato) pari a 2.4°C/W .

7.2.2 Progetto prototipo

Nel progetto della struttura complessiva è stata inizialmente ideata una singola strip di sorgenti, inclinate reciprocamente in modo da incrociare la perpendicolare centrale di ogni ottica in uno solo punto. Considerando l'inclinazione reciproca delle due facce del distanziatore (in verde) di 5° si ottiene una punto di incontro a distanza di 68 cm dal centro dell'ottica, come mostrato in figura 7.5. Come indicato in figura 7.6, in questa fase è stato individuato l'allineamento dei due fori di montaggio opposti comprendenti il distanziatore (in verde), la PCB (in rosa) e il dissipatore (in grigio) in modo da fissare il tutto per mezzo di due bulloni e rispettivi dadi.

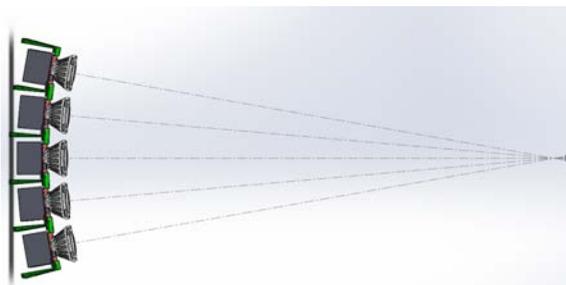


Figura 7.5: Modello e incrocio delle perpendicolari di una singola strip di prototipo

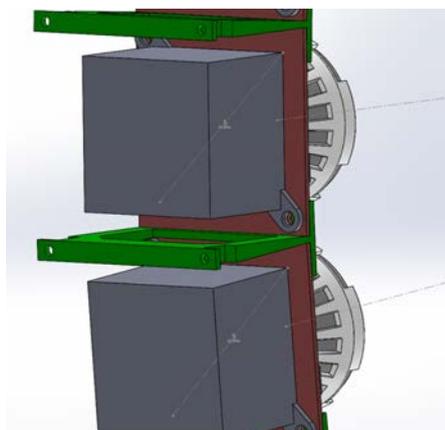


Figura 7.6: Ingrandimento di strip posteriore: si evidenzia l'allineamento del foro e la finestra per la circolazione dell'aria

Si noti inoltre la finestra sul distanziatore, parallela alle alette di raffreddamento del dissipatore stesso, in modo da consentire la circolazione dell'aria all'interno di ogni dissipatore.

Per unire tutte e cinque le strip è stato ottenuto, per sottrazione dal modello indicato, un ulteriore distanziatore (in giallo); anche in questo caso le facce sono inclinate reciprocamente di 5° per permettere l'allineamento nel medesimo punto. È ottenuta quindi la matrice complessiva in figura 7.7.

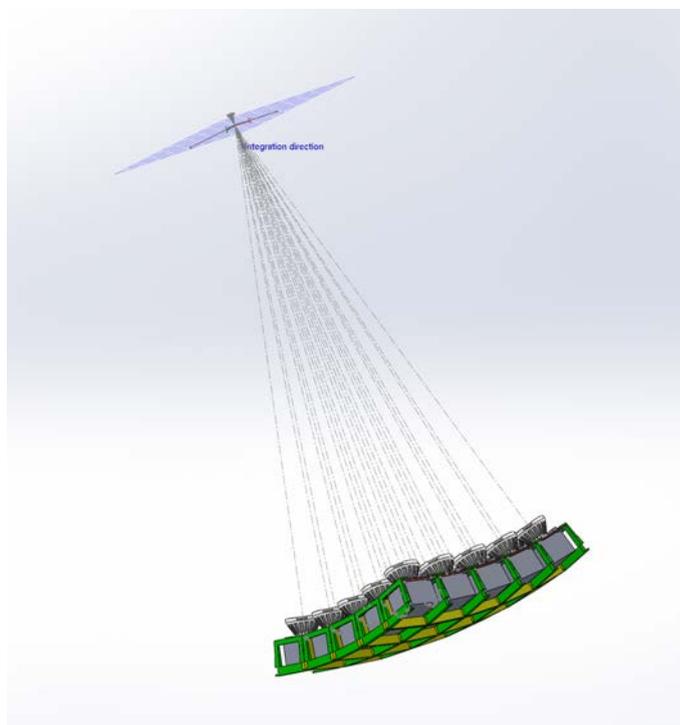


Figura 7.7: Modello e incrocio delle perpendicolari dell'intero prototipo

In questa fase si è inoltre verificato che l'inclinazione delle sorgenti fosse adeguata per valutare lo spazio sufficiente all'alloggiamento delle ottiche, in particolare che ci fosse uno spazio tra i bordi superiori di quest'ultime sufficiente a sopperire a eventuali tolleranze dei pezzi una volta realizzati.

In figura 7.8 è rappresentato un ingrandimento della struttura complessiva: in particolare si può notare l'incastro tra i due distanziatori e la predisposizione di un foro per mantenere assieme la struttura nell'eventualità di giochi eccessivi. La struttura definitiva è quindi rappresentata in figura 7.9: si nota quindi che ogni singola sorgente è inclinata con un angolo di 5° rispetto alle successive in ogni direzione. Il risultato è una struttura simile a una calotta sferica, in cui la superficie di ogni ottica è distante dal punto di incrocio 68 cm. Dal punto di vista meccanico la struttura è stata progettata in maniera modulare, impiegando due sole tipologie di elementi, mostrati in figura 7.10. Questa esigenza deriva dal fatto che i pezzi così ottenuti sono di dimensioni contenute e stampabili mediante stampante 3D.

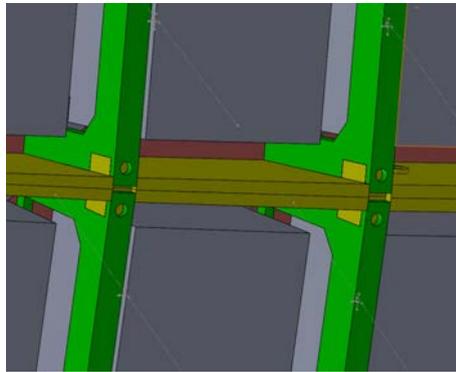


Figura 7.8: Fissaggio a incastro dei due distanziatori, predisposizione di foro per fissaggio di sicurezza

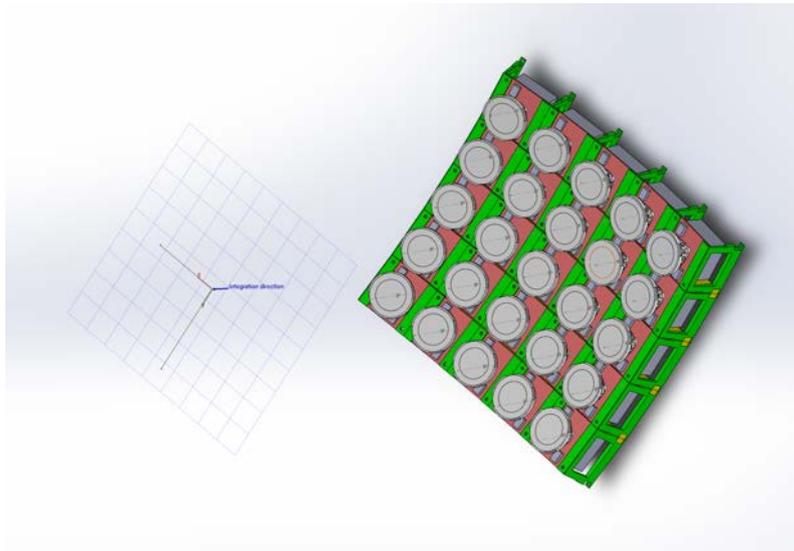


Figura 7.9: Panoramica del sistema progettato

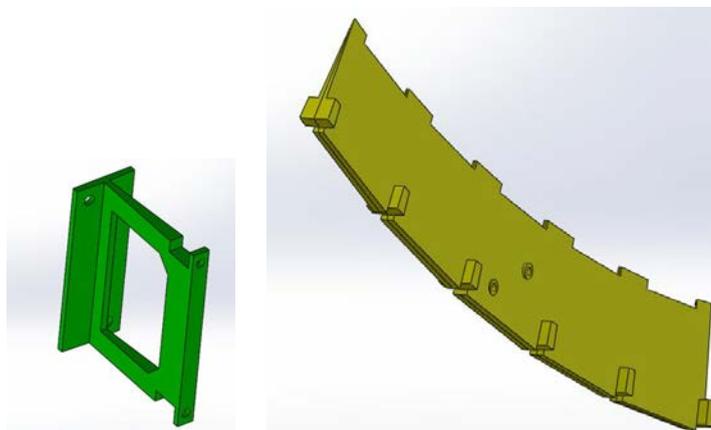


Figura 7.10: Distanziatori per costruire la struttura modellati con Solidworks

7.2.3 Simulazione prototipo

Una volta progettato il sistema è stato necessario simulare il tutto per stimare l'irradianza nel punto di incontro delle perpendicolari, con distanza pari a 68 cm dalla superficie delle ottiche. Il risultato è riportato in figura 7.11. È immediato

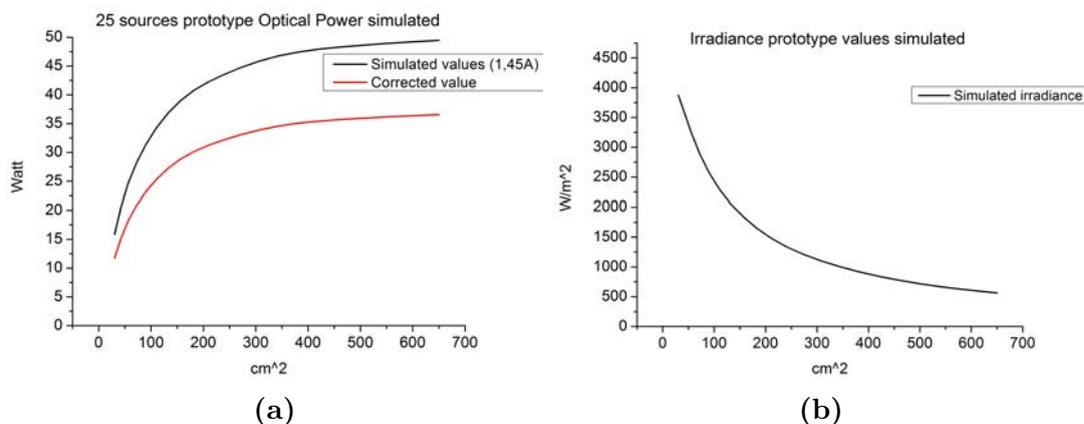


Figura 7.11: (a) Potenza ottica simulata del sistema con sorgenti XPGDRY-L1-601: valore simulato e valore corretto; (b) Valori di irradianza simulati e corretti del prototipo con sorgenti XPGDRY-L1-601 a 68 cm di distanza

notare come il valore di irradianza simulato, in questo caso, sia superiore a quello stimato e indicato all'inizio del progetto: il motivo risiede nel fatto che è stata ridotta la distanza dalla sorgente rispetto a quanto indicato in fase preliminare. Ciò non rappresenta sicuramente un ostacolo alla realizzazione del prototipo.

7.2.4 Progettazione PCB

La progettazione della PCB, realizzata con software Orcad, è essenzialmente vincolata dalle dimensioni e dalla posizione dei fori di montaggio del dissipatore e in seconda battuta dall'ingombro meccanico dei connettori che collegano le singole schede. Pertanto, è stata posizionata la sorgente al centro della scheda e, come mostrato in figura 7.12, sono stati indicati i fori di fissaggio del dissipatore e quelli per l'alloggiamento dell'ottica (in centro). Le PCB risultano quindi quadrate, con lato 60 mm. Un accorgimento importante è stato quello di aumentare le dimensioni della piazzola di rame corrispondente al pad termico della sorgente in modo da garantire una migliore trasmissione termica verso il dissipatore stesso. Agli estremi della scheda sono state inoltre predisposte le piazzole per alloggiare i connettori. La scelta di porre due connettori per scheda è dettata dalla comodità di avere sullo stesso punto del prototipo montato entrambi i cavi di alimentazione. Le piste di rame sono state dimensionate per supportare una corrente di 2 A, di conseguenza hanno larghezza pari a 1 mm e spessore del rame di 35 μm .

Per quanto riguarda le PCB per alloggiare le sorgenti L110-0940150, queste sono state realizzate in modo identico, con la differenza unica delle dimensioni delle piazzole centrali, realizzate della misura indicata nei datasheet delle sorgenti.

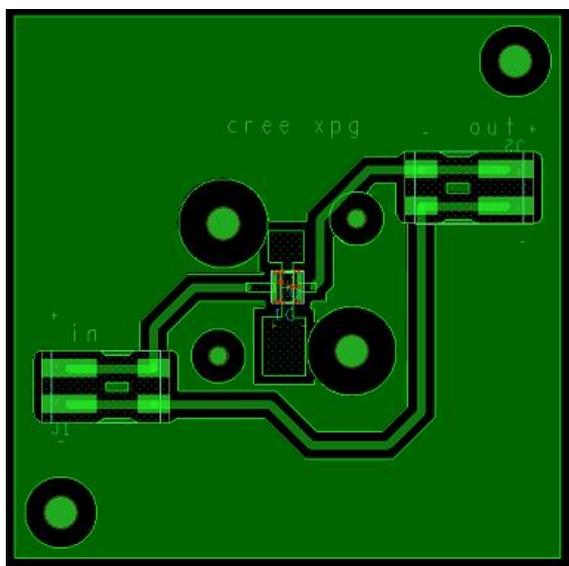


Figura 7.12: Progetto delle PCB: al centro sono presenti le piazzole di alloggiamento delle sorgenti, agli estremi i connettori

7.2.5 Realizzazione prototipo

Il primo passo di realizzazione del prototipo è stato quello di far realizzare le PCB in alluminio e, dopo l'acquisto di tutti i componenti necessari, il loro montaggio. Le sorgenti e i connettori sono stati saldati attraverso crema saldante e le ottiche fissate alle schede tramite viti M3, come indicato nel datasheet del produttore. Si è posto dunque il problema di come gestire la porzione della testa della vite fuoriuscente dalla parte inferiore della scheda: ciò rappresenta un problema in quanto si andrebbe a creare una intercapedine non desiderata tra l'interfaccia termica del dissipatore (in grafite) e la scheda, rendendo vano lo scopo del dissipatore stesso. Il tutto è stato risolto, come indicato in figura 7.13, impiegando viti a testa svasata e, dopo aver allargato i fori con una punta conica, è stato possibile inglobare la testa della vite all'interno della PCB stessa. I distanziatori sono stati realizzati con stampante



Figura 7.13: Fissaggio dell'ottica alla PCB tramite viti a testa svasata

3D *Ultimaker 3 extended* in materiale PLA. Le schede sono state infine collegate elettricamente in serie. Il risultato finale è mostrato in figura 7.14. Le dimensioni finali

risultano essere all'incirca $30 \times 30 \times 10$ cm e il prototipo ha un peso complessivo di circa 3 kg.

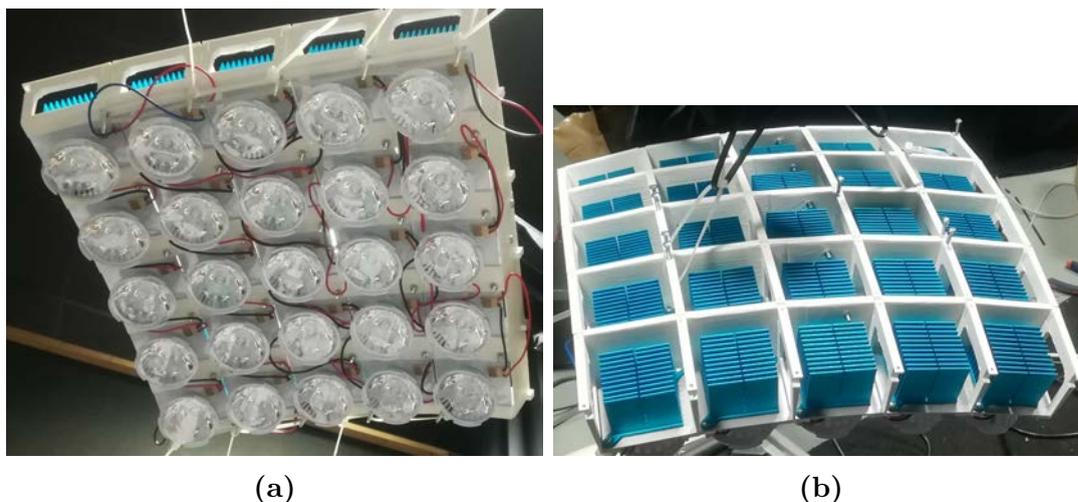


Figura 7.14: Prototipo montato completo

7.3 Misure di irradianza con tavola xy

Il passo successivo è stato quello di misurare l'irradianza planare con tavola xy: per fare ciò si sono scelte le medesime impostazioni già indicate in precedenza, ovvero un'area di misura pari a 650.25 cm^2 (25.5 cm di lato) con il massimo valore di irradianza posto al centro della superficie e uno step di misura pari a 0.5 cm. Si è deciso quindi di effettuare le misure alla corrente di polarizzazione di 350 mA, 700 mA e alla massima corrente ammessa dalle sorgenti in modo da poter effettuare un confronto tra le due versioni del prototipo: quella royal blue (con sorgenti XPGDRY-L1-601) e quella IR (con sorgenti L1I0-0940150).

7.3.1 Sorgenti royal blue XPGDRY-L1-601

Inizialmente è stata fatta una misura di irradianza su piano con tavola xy e corrente di polarizzazione di 350 mA all'altezza di 68 cm (come da progetto). Il risultato è quindi mostrato in figura 7.15a. In questo caso il punto centrale di massima irradianza è pari a 1033 W/m^2 . Dopo aver effettuato la misura si è ricercata l'altezza, rispetto alla superficie dell'ottica centrale, in cui effettivamente il punto centrale presenta valore di irradianza massimo. Variando l'altezza si sono dunque ottenuti i valori di irradianza riportati in tabella 7.2. Si nota dunque che il valore di irradianza massimo individuato è pari a 1455 W/m^2 ad una distanza di 51 cm.

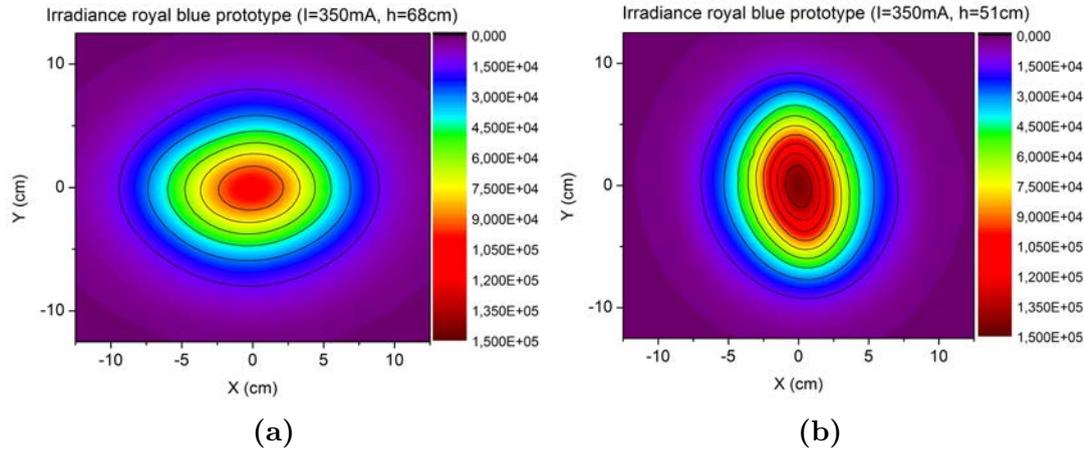


Figura 7.15: (a) Grafico di irradianza planare con il prototipo royal blue, sorgenti polarizzate a 350 mA e distanza dall'ottica centrale del piano di misura pari a $h=68$ cm; (b) Grafico di irradianza planare con il prototipo royal blue, sorgenti polarizzate a 350 mA e distanza dall'ottica centrale del piano di misura pari a $h=51$ cm

Tabella 7.2: Valori di irradianza massimi al variare dell'altezza con polarizzazione in corrente pari a 350 mA

Altezza (cm)	Irradianza (W/m^2)
58	1316
57	1349
56	1375
55	1303
54	1424
53	1444
52	1452
51	1455
50	1448
49	1431
48	1407

A questo punto è possibile effettuare le misure di irradianza sul punto effettivo di massimo. Per quanto riguarda la polarizzazione a 350 mA il nuovo grafico di irradianza planare è mostrato in figura 7.15b. Per poter effettuare la misura a 700 mA è stato necessario adottare alcuni accorgimenti: in primo luogo il datasheet del sensore di irradianza garantisce un massimo valore rilevato pari a $2000 W/m^2$ e una temperatura massima di esercizio di $50^\circ C$. Pertanto è stato necessario adottare un filtro attenuatore ottico e una protezione del sensore dall'irraggiamento diretto. È stato dunque adottato il filtro *Thorlabs NE10b* che presenta la caratteristica di trasmissione indicata in figura 7.16. Nelle lunghezze d'onda attorno ai 430 nm si nota che il filtro attenua il valore reale di un fattore 10. È stato inoltre necessario proteggere la parte esterna del sensore dall'irraggiamento diretto al fine di evitare un aumento di temperatura dello stesso, come si nota in figura 7.17, realizzata con termocamera. Il grafico di irradianza con polarizzazione a 700 mA è dunque riportato in figura 7.18a.

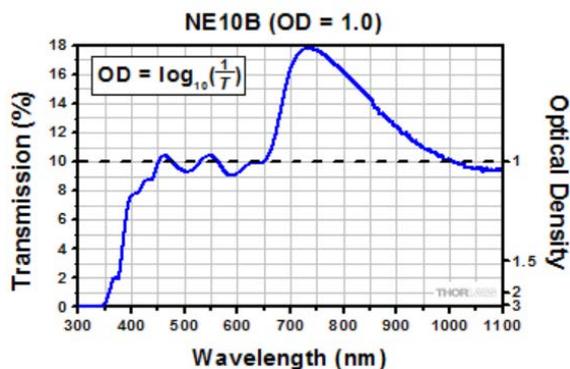


Figura 7.16: Caratteristica del filtro NE10b utilizzato

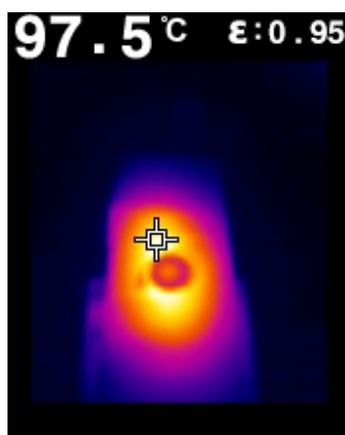


Figura 7.17: Immagine del sensore coperto da filtro: la copertura esterna risulta necessaria per preservare il sensore stesso

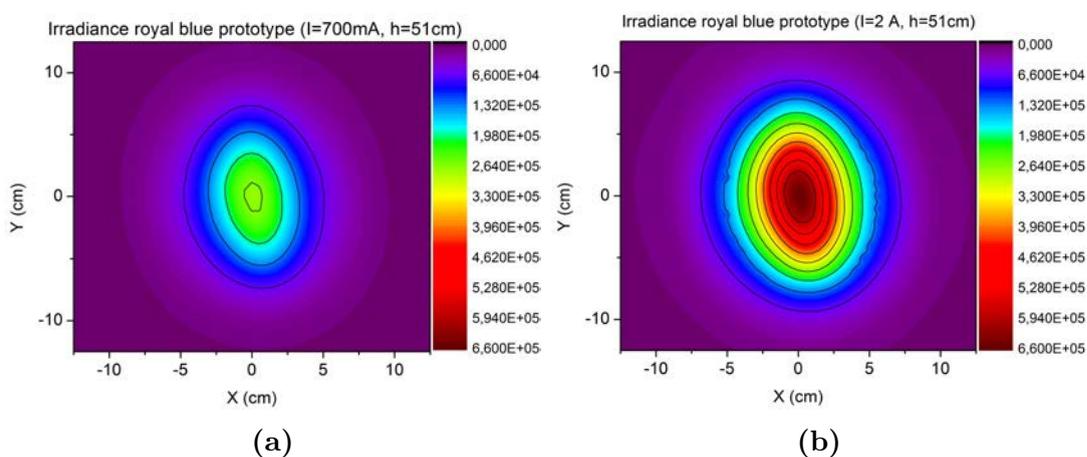


Figura 7.18: (a) Grafico di irradianza planare con il prototipo royal blue, sorgenti polarizzate a 700 mA e distanza dall'ottica centrale del piano di misura pari a $h=51$ cm; (b) Grafico di irradianza planare con il prototipo royal blue, sorgenti polarizzate a 2 A e distanza dall'ottica centrale del piano di misura pari a $h=51$ cm

Per quanto riguarda la polarizzazione a 2 A si è deciso di procedere in questo modo per evitare surriscaldamento ulteriore del sensore: si è considerata solo la sorgente centrale e si è valutata l'irradianza nel punto di massimo; per questo motivo si sono ottenuti i valori riportati in tabella 7.3, che riporta la massima irradianza sia a 700 mA che a 2 A. Usando la formula 7.2 si è calcolato il coefficiente moltiplicativo k che, moltiplicato per i valori di irradianza misurati a 700 mA, porta ad ottenere l'irradianza complessiva con polarizzazione a 2 A, mostrata in figura 7.18b.

$$k = \frac{IRR_{single,2A}}{IRR_{single,700mA}} = \frac{510.3 \text{ W/m}^2}{211.6 \text{ W/m}^2} = 2.4 \quad (7.2)$$

Tabella 7.3: Valori di irradianza di picco a 700 mA e 2 A della sola sorgente centrale

$IRR_{single,700mA}$	211.6 W/m^2
$IRR_{single,2A}$	510.3 W/m^2

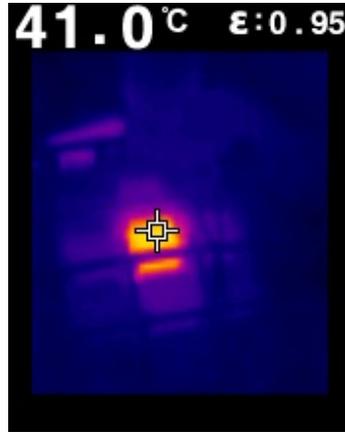


Figura 7.19: Temperatura del dissipatore montato su sorgente centrale e polarizzata a 2 A

In quest'ultima prova si è inoltre testata la funzionalità del dissipatore tramite termocamera, la quale rileva un aumento di temperatura contenuto, mostrato in figura 7.19. È possibile quindi stimare la resistenza termica del dissipatore come rapporto tra l'aumento di temperatura e la potenza elettrica dissipata sotto forma di calore. Considerando i seguenti dati: $V = 3.46\text{V}$, $I = 2.00\text{A}$, $T_{max} = 41^\circ\text{C}$, $T_{amb} = 23^\circ\text{C}$, $EFF=0.6$. Si ottiene quindi che

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = \frac{T_{max} - T_{amb}}{(1 - EFF) \times V \times I} = \frac{18^\circ\text{C}}{2.77} = 6.50^\circ\text{C/W} \quad (7.3)$$

Il valore trovato indica una stima, non riportata nel datasheet, di resistenza termica in condizione di dissipazione passiva.

A partire dai grafici di irradianza di figura 7.15b, 7.18a e 7.18b è possibile, come già fatto in precedenza, ottenere i grafici di potenza ottica rispetto all'area, mostrati in figura 7.20 e il grafico dell'irradianza rispetto all'area in cui è calcolata, mostrato in figura 7.21. In tabella 7.4 sono inoltre riportati dei valori di potenza ottica per aree notevoli.

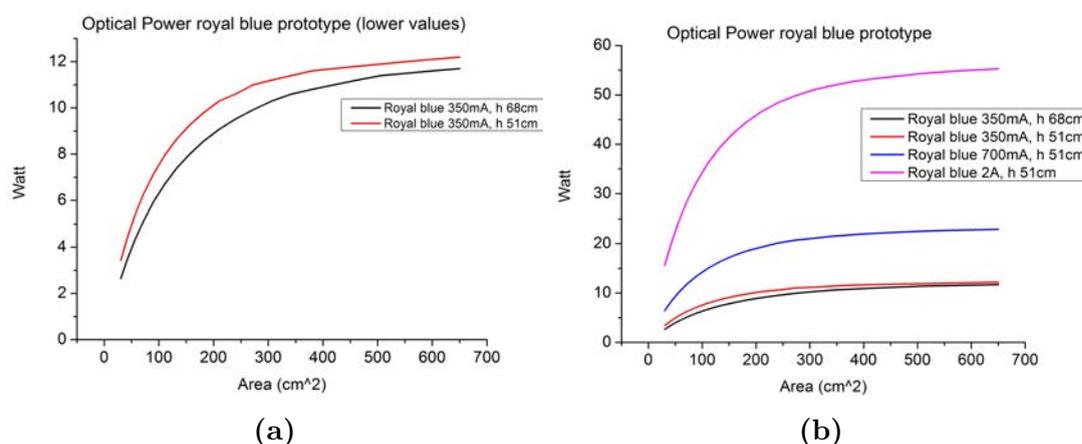


Figura 7.20: Valori di potenza ottica misurati del prototipo a 350 mA figura (a) e a 700 mA e 2 A figura (b)

Tabella 7.4: Valori di potenza ottica del prototipo Royal blue per alcune aree notevoli

Area (cm ²)	30.25	110.25	240.25	420.25	650.25
Royal blue 350 mA, h 68 cm (W)	2.65	6.69	9.52	11.00	11.70
Royal blue 350 mA, h 51 cm (W)	3.43	7.94	10.60	11.70	12.20
Royal blue 700 mA, h 51 cm (W)	6.45	15.00	20.10	22.10	22.90
Royal blue 2 A, h 51 cm (W)	15.60	36.10	48.40	53.30	55.30

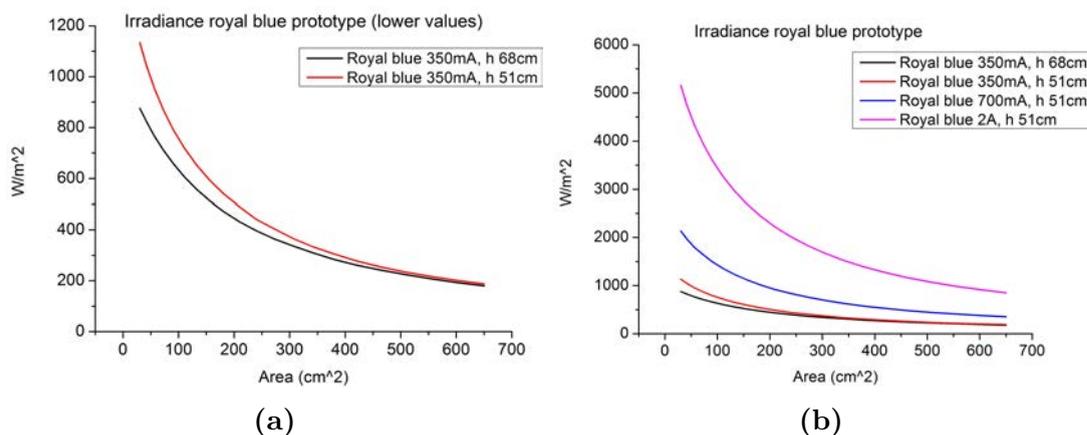


Figura 7.21: Valori di irradianza misurati del prototipo a 350 mA figura (a) e a 700 mA e 2 A figura (b)

7.3.2 Sorgenti Infrarosse L1I0-0940150

Per quanto riguarda la versione IR del prototipo è stata svolta la stessa caratterizzazione con tavola xy, con la sola differenza che la massima corrente supportata è pari a 1 A. È stata quindi svolta la caratterizzazione alla distanza dall'ottica centrale come da progetto, quindi a 68 cm, il cui risultato è mostrato in figura 7.22a. A questo punto si è ricercato il valore di massima irradianza del punto centrale variando la distanza dal piano di misura, ottenendo il valori di tabella 7.5. Da ciò si evince che il punto di massima irradianza si trova alla distanza $h=53$ cm rispetto all'ottica centrale, per cui le misure successive sono state fatte a questa altezza. Viene

Tabella 7.5: Valori di irradianza di picco al variare dell'altezza

Altezza (cm)	Irradianza (W/m^2)
58	1599
57	1646
56	1690
55	1726
54	1760
53	1771
52	1761
51	1744
50	1700
49	1646
48	1581

quindi riportato in figura 7.22b il grafico dell'irradianza, con sorgenti polarizzate a 350 mA, a questa nuova distanza.

Nell'esecuzione corretta della misura sia a 700 mA che a 1 A, come nella versione

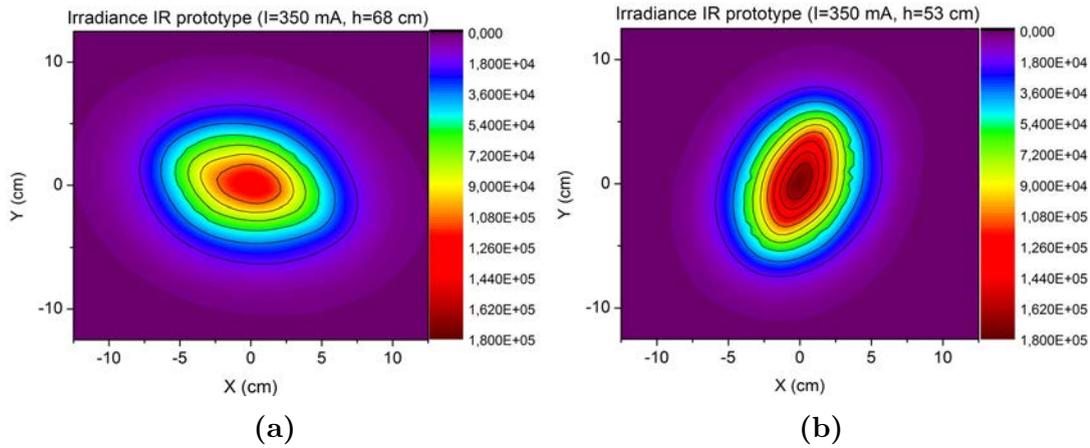


Figura 7.22: (a) Grafico di irradianza del prototipo IR alla distanza di 68 cm e polarizzato a 350 mA ; (b) Grafico di irradianza del prototipo IR alla distanza di 53 cm e polarizzato a 350 mA

con sorgenti royal blue, si è tenuto conto del massimo valore misurabile dal sensore, e pertanto si è sfruttato il filtro *Thorlabs NE10b*. È stata inoltre effettuata una misura diretta del coefficiente di trasmissione ottenendo che questo è pari a 10.65%. Dunque lo strumento misura un valore attenuato di un fattore 9.37.

Inoltre, riguardo alla misura a 1 A, anche questa è stata ottenuta per via indiretta, sfruttando la misura con polarizzazione a 700 mA e calcolando, come per il prototipo royal blue, il valore massimo di irradianza della sorgente centrale polarizzata sia a 700 mA che a 1 A. Sfruttando la formula

$$k_1 = \frac{IRR_{single,1A}}{IRR_{single,700mA}} = \frac{359.4 W/m^2}{266.5 W/m^2} = 1.3 \quad (7.4)$$

e moltiplicando la misura a 700 mA per il fattore k_1 si è ottenuta la misura cercata. I grafici di irradianza sul piano alle correnti di 700 mA e 1 A sono mostrati rispet-

tivamente in figura 7.23a e 7.23b.

È inoltre stata calcolata la potenza ottica incidente in funzione dell'area in tutti i casi e riportata in figura 7.24. In tabella 7.6 sono riportati i valori di potenza ottica per alcune aree notevoli. Viene inoltre calcolata l'irradianza in funzione dell'area e mostrata in figura 7.25. Infine è stata valutato il modesto aumento di temperatura del dissipatore centrale, tramite termocamera, mostrato in figura 7.26.

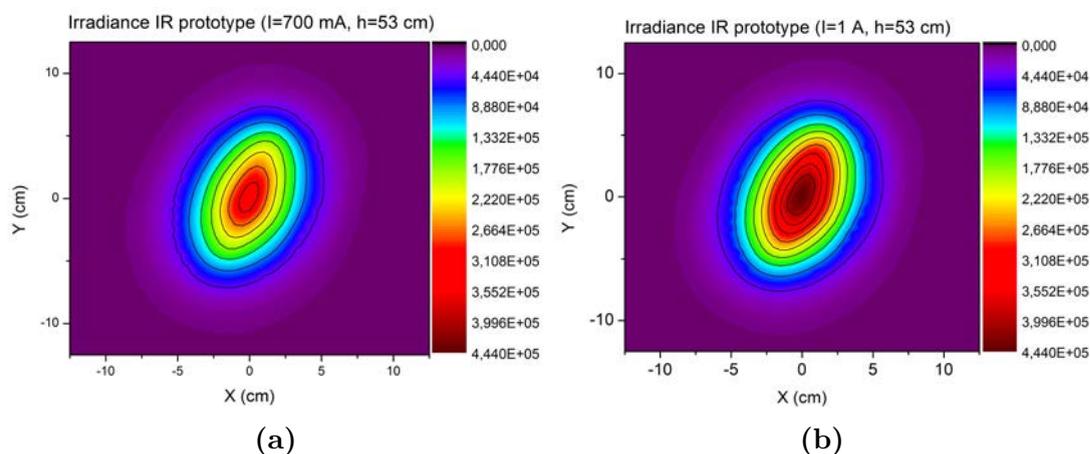


Figura 7.23: (a) Grafico di irradianza del prototipo IR alla distanza di 53 cm e polarizzato a 700 mA; (b) Grafico di irradianza del prototipo IR alla distanza di 53 cm e polarizzato a 1 A

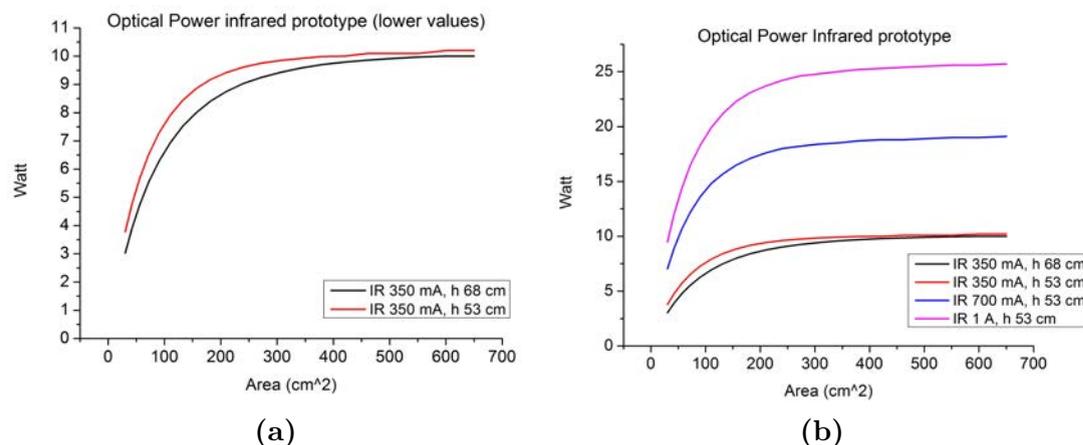


Figura 7.24: Valori di potenza ottica misurati del prototipo IR a 350 mA figura (a) e a 700 mA e 2 A figura (b)

Tabella 7.6: Valori di potenza ottica del prototipo IR per alcune aree notevoli

Area (cm^2)	30,25	110,25	240,25	420,25	650,25
IR 350mA, h 68 cm(W)	3.03	6.93	9.03	9.79	10.00
IR 350 mA, h 53 cm (W)	3.78	7.91	9.61	10.00	10.20
IR 700 mA, h 53 cm (W)	7.04	14.80	18.00	18.80	19.10
IR 1 A, h 53 cm (W)	9.49	19.90	24.20	25.30	25.70

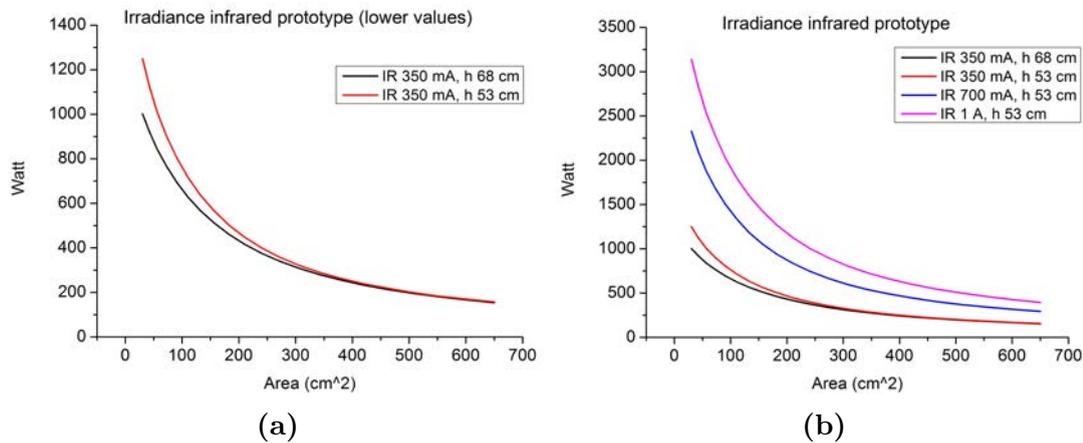


Figura 7.25: Valori di irradianza misurati del prototipo IR a 350 mA figura (a) e a 700 mA e 2 A figura (b)

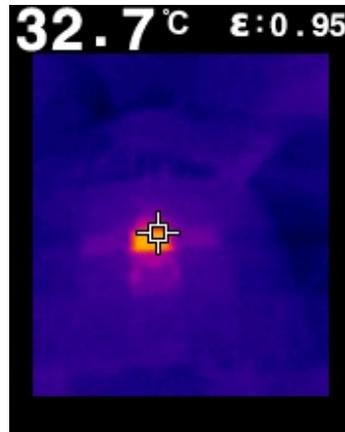


Figura 7.26: Temperatura della sorgente centrale del prototipo IR polarizzata a 1 A

7.4 Commenti sui dati presentati

Da un primo sguardo ai grafici di irradianza planare risulta che, al variare della distanza, la forma del fascio cambia, sia nel caso del prototipo IR che nel caso del prototipo royal blue: è chiaro che la causa non è legata al tipo di sorgente ma è associata alla struttura meccanica del prototipo stesso. La spiegazione più plausibile è che il sistema presenti due fuochi distinti; pertanto ci si è spostati verso quello in cui è stato misurato il valore di irradianza maggiore. Considerato che la simulazione non ha evidenziato criticità geometriche della struttura, è possibile che ciò sia dovuto alla realizzazione dei singoli pezzi: in particolare, essendo la struttura realizzata con elementi talvolta sottili per migliorarne la compattezza, questa risulta flettere in alcuni punti, influenzando così nel corretto allineamento delle singole ottiche. Considerando ora i valori di irradianza in funzione dell'area, risulta che i valori misurati siano superiori a quelli simulati: ciò è spiegato analizzando la potenza emessa dalla sorgente. La simulazione è stata eseguita utilizzando il massimo valore di po-

tenza ottica misurata nella caratterizzazione in sfera integratrice (quindi relativa alla corrente di polarizzazione di 1.45 A) mentre la misura di irradianza del prototipo è stata realizzata alla massima potenza consentita emessa dalla sorgente (con corrente di polarizzazione pari a 2 A). La discrepanza tra i due risultati è comunque coerente con i presupposti.

Per quanto riguarda la versione IR del prototipo il confronto più interessante riguarda la misura eseguita a 700 mA: si nota in questo caso un valore di irradianza superiore rispetto alla versione royal blue per quanto riguarda l'area più piccola (30.25 cm^2). Questo è principalmente spiegato dalla migliore collimazione delle singole sorgenti IR a parità di ottica impiegata e dalla migliore efficienza della sorgente stessa.

Capitolo 8

Prove di riscaldamento

Come prova finale del prototipo, si è proceduto con l'esecuzione delle prove di riscaldamento reali di alcuni campioni per poter mettere alla prova il sistema e poter intuire le sue potenzialità. Sono stati eseguiti quindi alcuni test nelle stesse condizioni per poter effettuare dei confronti. In particolare, con l'aiuto dell'irradiometro, si è individuato che polarizzando il prototipo royal blue a 1.21 A di corrente si ottiene lo stesso valore di irradianza di picco del prototipo IR. I test sono stati realizzati sfruttando una termocamera per poter individuare i profili temporali di riscaldamento. Nello svolgimento delle prove si è cercato di far coincidere la superficie superiore del campione da scaldare con il punto di massima irradianza, allineando il campione con l'aiuto del sensore di irradianza e ponendolo alla giusta altezza. Per questioni di sicurezza i campioni sono stati alloggiati su una base formata da una lamina di acciaio e mantenuta leggermente sollevata da terra mediante l'utilizzo di due staffe.

8.1 Campione 1: cubo di PMMA

Il campione consiste in un cubo di PMMA di lato pari a 40 mm, con le superfici levigate leggermente con carta abrasiva per limitare la riflessione ottica della superficie altresì lucida. Sul lato verticale sono stati praticati dei fori equidistanti con trapano a colonna, tali che il primo si trovi alla distanza di 5 mm, e i successivi alla distanza di 10 mm dal precedente. Ogni foro è stato praticato alla distanza di 20 mm dallo spigolo laterale, e profondo 20 mm, in modo da ottenere dei punti di misura a diverse altezze ma tutte al centro della superficie irradiata. In ogni foro è stata inserita una termocoppia di tipo K. Il risultato è mostrato in figura 8.1. La prova si è svolta facendo scaldare il blocchetto per 40 minuti e monitorando l'andamento della temperatura delle sonde centrali e della faccia superiore del cubo. La misura di temperatura si è svolta tramite termocamera FLIR A35, campionando la misura ogni secondo. La temperatura delle sonde è stata letta attraverso il datalogger Keysight 34970A con scheda multiplexer 34901A. Le sonde, inoltre, sono numerate in base alla distanza crescente dalla superficie irradiata.

Nei grafici non è stata inserita la misura della termocoppia più bassa in quanto si scalda in maniera anomala. Per chiarezza i grafici completi sono posti in fondo alla sezione.

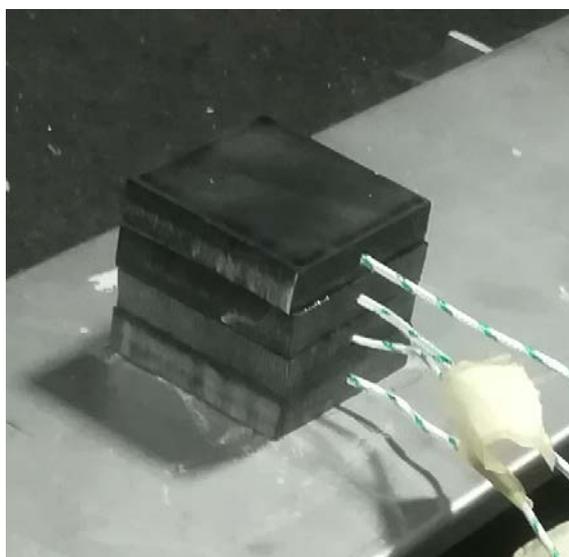


Figura 8.1: Foto del cubo di PMMA e termocoppie inserite

8.1.1 Riscaldamento con prototipo IR

In questo caso la prova di riscaldamento si è svolta polarizzando il prototipo IR alla massima corrente ammessa, quindi 1 A. Il risultato del profilo di riscaldamento è mostrato in figura 8.2.

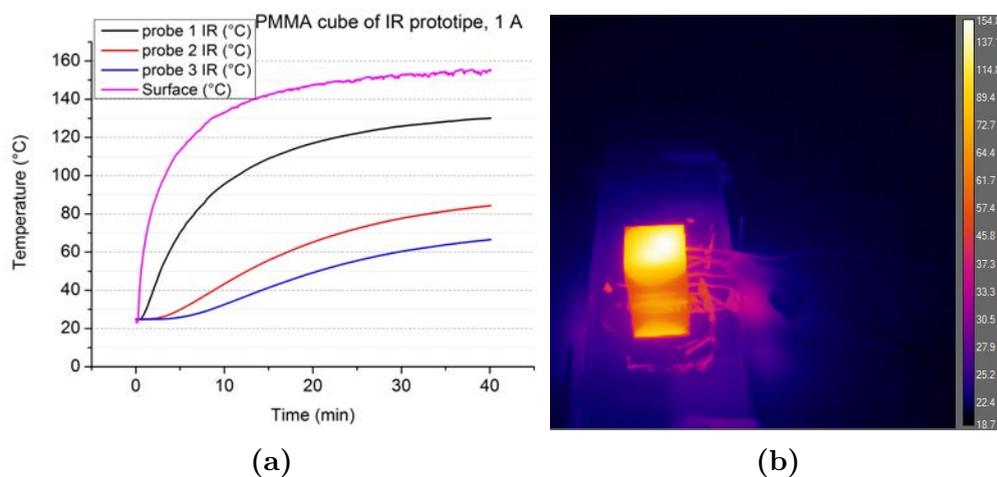


Figura 8.2: Grafico del riscaldamento del blocchetto con prototipo IR polarizzato a 1 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.1.2 Riscaldamento con prototipo royal blue

La prova di riscaldamento si è svolta polarizzando il prototipo con 1.21 A di corrente in quanto presenta lo stesso valore di irradianza di picco della versione IR: le due misure diventano quindi confrontabili. In figura 8.3 è mostrato il profilo di riscaldamento del campione.

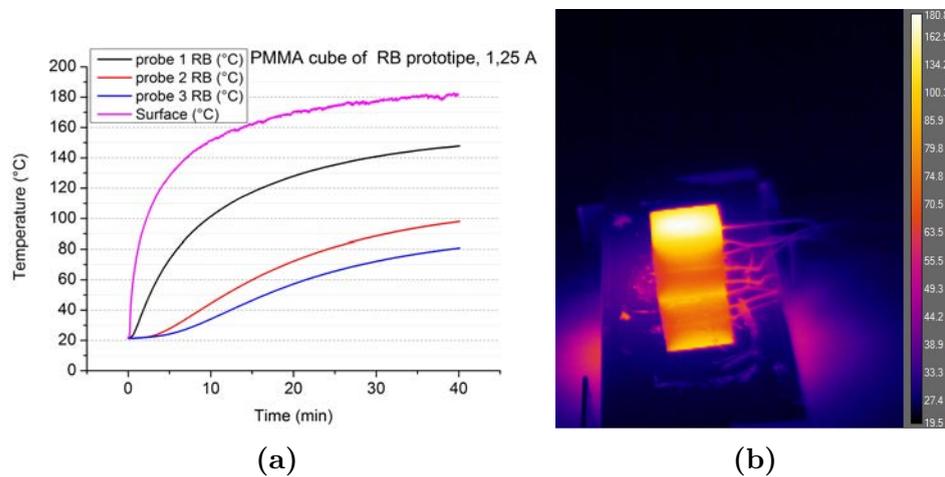


Figura 8.3: Grafico del riscaldamento del blocchetto con prototipo royal blue polarizzato a 1.21 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.1.3 Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza

In questo caso la prova si è svolta polarizzando il prototipo alla corrente di 2 A. Il grafico 8.4 mostra il profilo di riscaldamento.

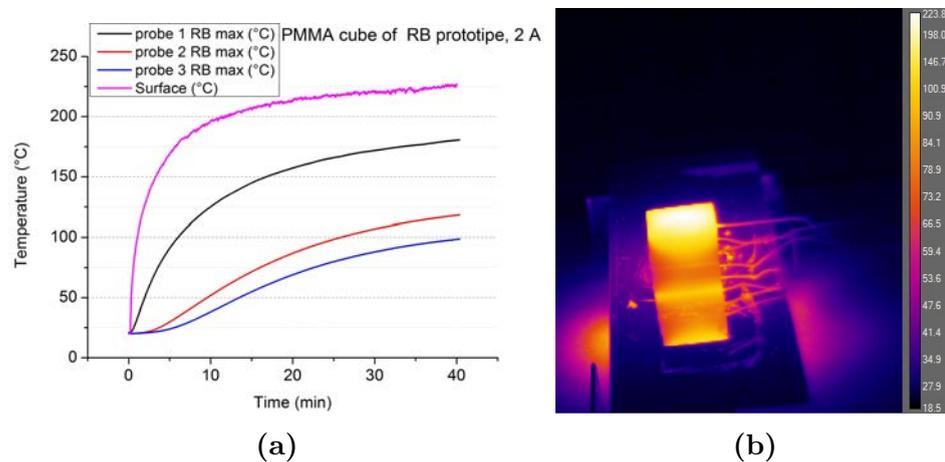


Figura 8.4: Grafico del riscaldamento del blocchetto con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.1.4 Confronto tra prova con prototipo royal blue e IR

Si è inoltre fatto un confronto diretto del profilo di riscaldamento tra la prova effettuata con prototipo IR e la prova con prototipo royal blue, alla medesima potenza, per poter scoprire se vi è una differenza in termini di profondità di penetrazione tra le due lunghezze d'onda: è stato calcolato il rapporto tra l'aumento di temperatura di ogni sonda e l'aumento di temperatura della superficie esterna. Il risultato è mostrato nelle figure 8.5 e 8.6.

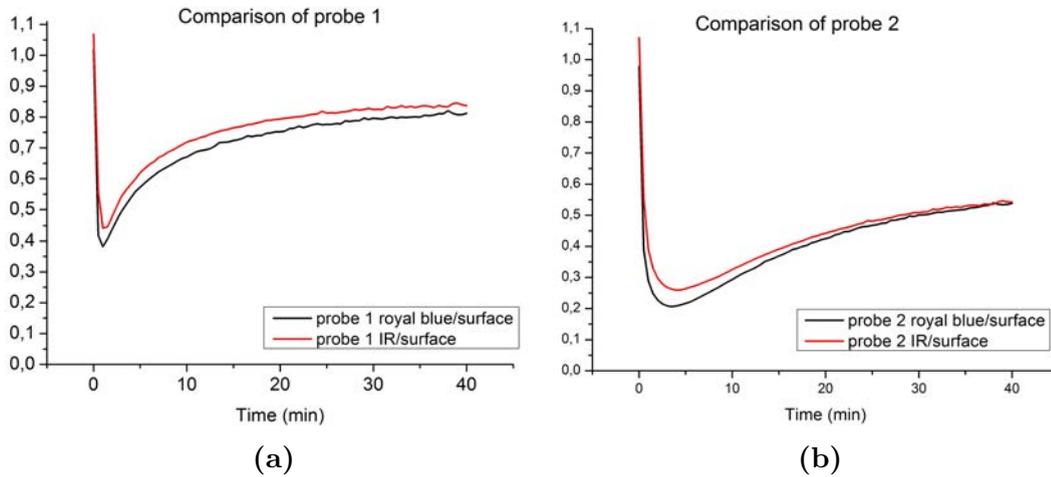


Figura 8.5: (a) Confronto dell'aumento di temperatura della sonda 1 (in rapporto alla temperatura superficiale); (b) Confronto dell'aumento di temperatura della sonda 2 (in rapporto alla temperatura superficiale)

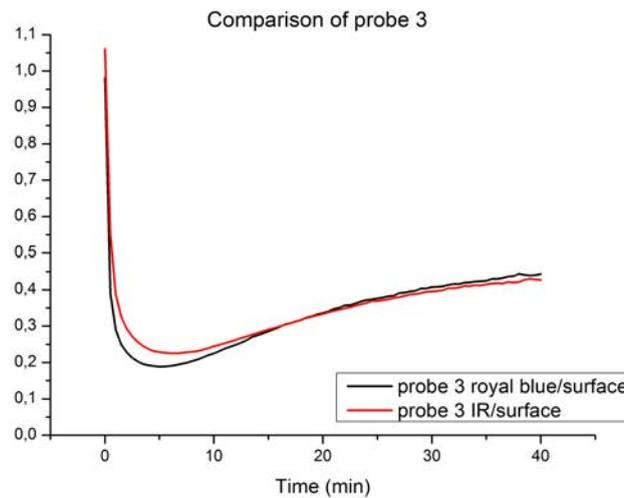


Figura 8.6: Confronto dell'aumento di temperatura della sonda 3 (in rapporto alla temperatura superficiale)

8.2 Campione 2: fetta di pane bianco

In questa prova il campione è una fetta di pane bianco in cassetta, confezionato, spesso all'incirca 10 mm. Si è scelto questo in quanto le fette sono tutte dello stesso spessore. In questo caso, inoltre, la durata della prova viene decisa di volta in volta in base all'andamento della temperatura superficiale.

8.2.1 Riscaldamento con prototipo IR

Il profilo di riscaldamento del campione con prototipo IR, polarizzato a 1 A, è mostrato in figura 8.7. La prova è durata 15 minuti, in quanto la temperatura, di 41°C , si è rivelata stabile. Il risultato è la fetta di pane leggermente seccata sulla parte superiore.

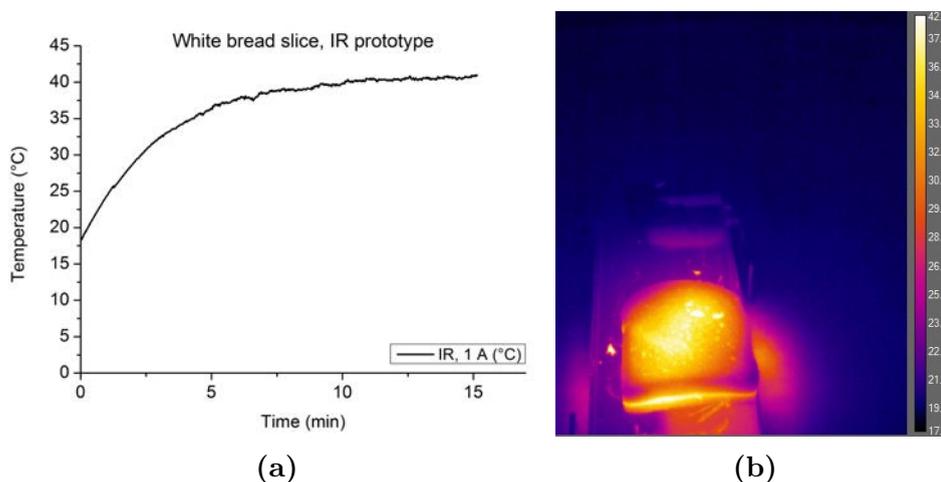


Figura 8.7: Grafico del riscaldamento della fetta di pane bianco con prototipo IR polarizzato a 1 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.2.2 Riscaldamento con prototipo royal blue

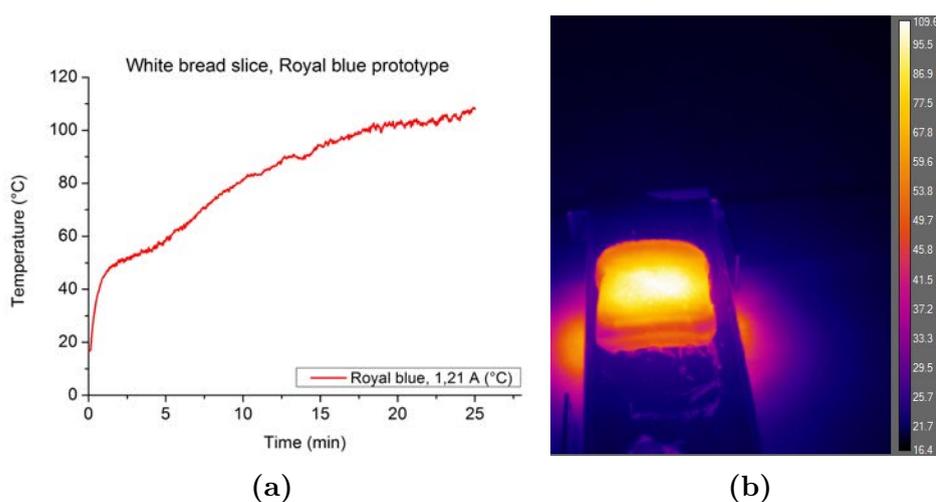


Figura 8.8: Grafico del riscaldamento della fetta di pane bianco con prototipo royal blue polarizzato a 1.21 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

In questo caso la prova è durata 25 minuti, ottenendo il risultato del grafico di figura 8.8. La superficie del campione ha quindi raggiunto la temperatura di 108°C . È possibile notare nella figura 8.8a un cambio di pendenza della curva attorno al minuto 5: questo è dovuto alla parziale evaporazione dell'acqua contenuta

nel campione, che porta a velocizzare l'assorbimento e quindi il riscaldamento del campione stesso. Il pane risulta quindi essiccato.

8.2.3 Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza

La prova è durata 10 minuti, in quanto il pane ha iniziato a bruciare. In figura 8.9 è mostrato l'andamento di temperatura superficiale. Nel grafico di figura 8.9a è possibile notare due cambi di pendenza: uno attorno al primo minuto, molto probabilmente dovuto all'evaporazione dell'acqua sulla superficie; il secondo attorno al settimo minuto, dovuto all'imbrunimento della superficie del campione. In entrambi i casi si denota un aumento dell'assorbimento di potenza. Viene inoltre mostrato in figura 8.10 il campione dopo 10 minuti di irraggiamento. È evidente la bruciatura al centro del campione, coincidente con il punto di massima irradianza: la bruciatura risulta avere dimensioni di circa 40 mm di lunghezza e 30 mm di larghezza.

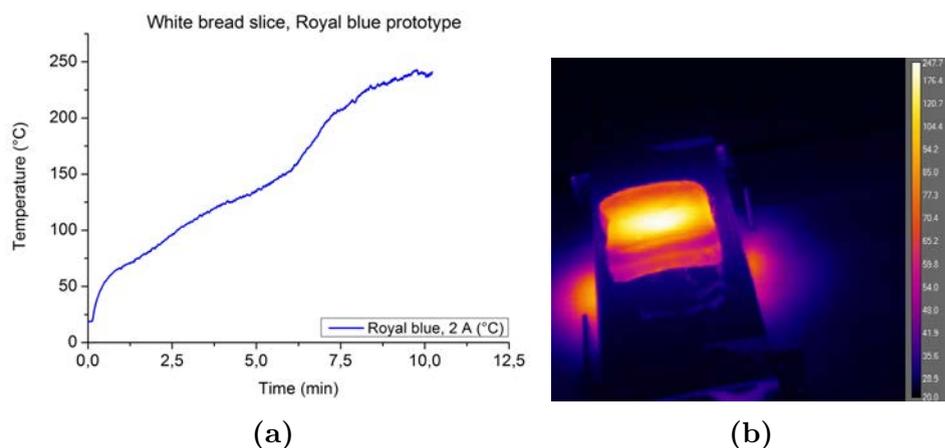


Figura 8.9: Grafico del riscaldamento della fetta di pane bianco con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

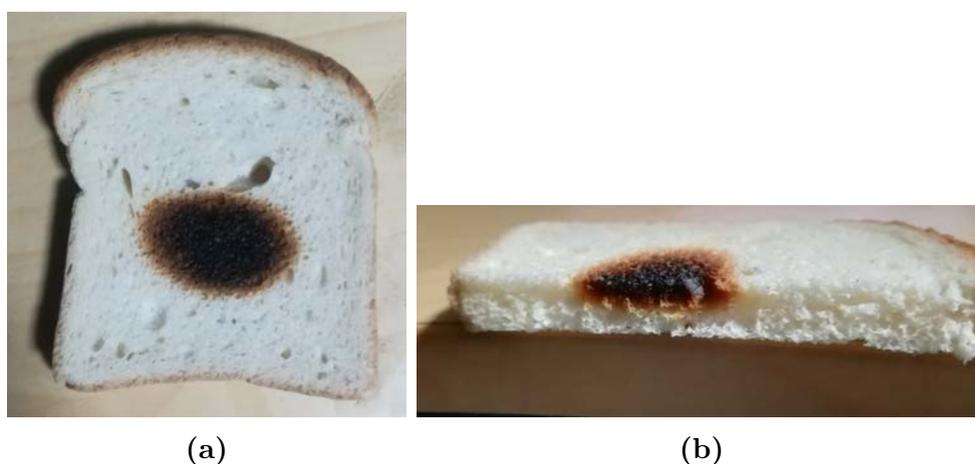


Figura 8.10: Campione di pane bianco dopo irraggiamento con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a) e sezione (b)

8.3 Campione 3: fetta di pane integrale

Il campione consiste in una fetta di pane integrale di spessore di circa 5 mm. Si è deciso di usare il pane integrale per notare la differenza di riscaldamento con un campione di colore più scuro.

8.3.1 Riscaldamento con prototipo IR

Nella prova di riscaldamento con prototipo IR il profilo di temperatura è mostrato in figura 8.11. Nel caso specifico la misura è stata interrotta dopo 25 minuti. La temperatura raggiunta è pari a 54°C .

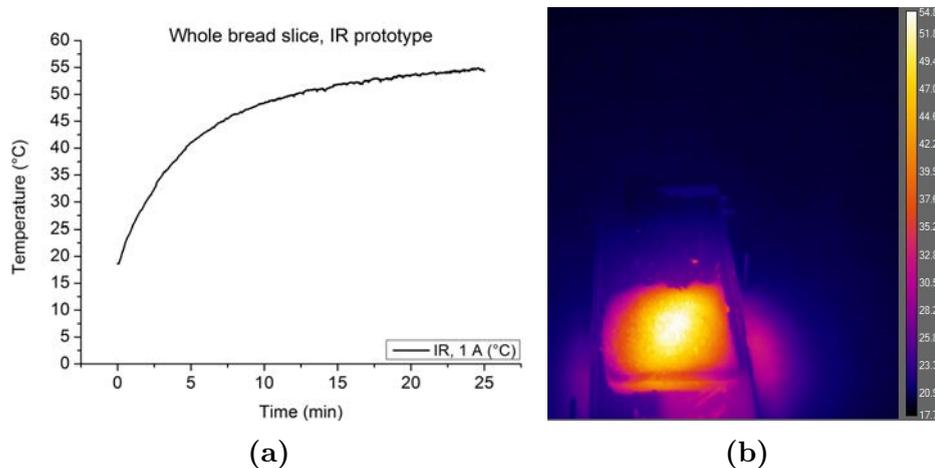


Figura 8.11: Grafico del riscaldamento della fetta di pane integrale con prototipo IR polarizzato a 1 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.3.2 Riscaldamento con prototipo royal blue

In questo caso la prova di riscaldamento ha una durata complessiva di 25 minuti, in modo da rendere confrontabili i valori ottenuti con la prova svolta con prototipo IR. Il risultato è mostrato in figura 8.12. In questo caso il campione ha raggiunto la temperatura di 130°C .

8.3.3 Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza

In quest'ultima prova si è irraggiato il campione con la massima potenza disponibile del prototipo royal blue. In questo caso la prova è stata interrotta dopo 20 minuti in quanto il campione iniziava a bruciare. Il risultato del profilo di temperatura è illustrato in figura 8.13. In figura 8.14 è inoltre mostrato il campione dopo la prova: al centro è visibile la bruciatura.

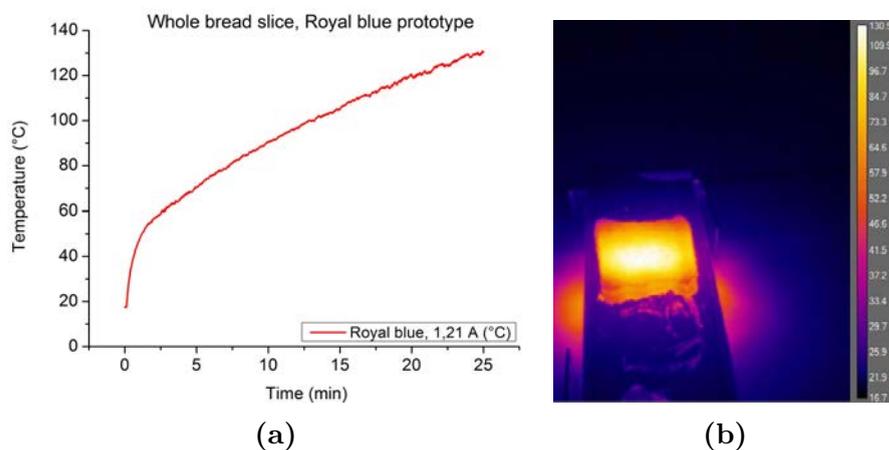


Figura 8.12: Grafico del riscaldamento della fetta di pane integrale con prototipo royal blue polarizzato a 1.21 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

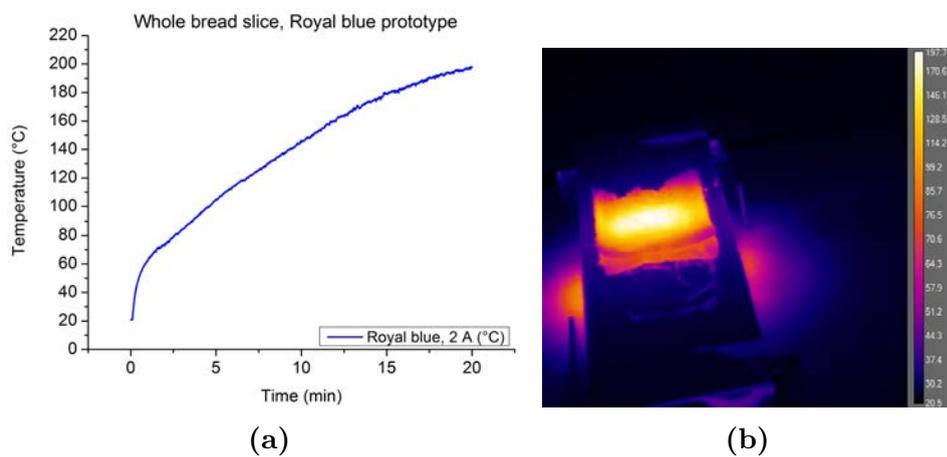


Figura 8.13: Grafico del riscaldamento della fetta di pane integrale con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)



Figura 8.14: Campione di pane integrale dopo la prova con prototipo royal blue polarizzato a 2 A: al centro è visibile la bruciatura

8.4 Campione 4: cioccolato fondente

Il campione è costituito da tre pezzi di cioccolato fondente dal peso complessivo di circa 50 grammi, impilati in modo da dare spessore al campione. La scelta del tipo di cioccolato (scuro) è dovuta al fatto che questo favorisca l'assorbimento dell'energia irraggiata. Il tipo di campione utilizzato è mostrato in figura 8.15.

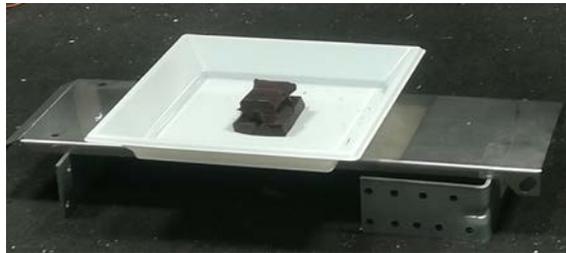


Figura 8.15: Campione di cioccolato prima di essere irraggiato

8.4.1 Riscaldamento con prototipo IR

In questo caso la prova è durata all'incirca 23 minuti facendo arrivare il campione alla temperatura superficiale di 95°C . Il grafico di figura 8.16 riporta l'andamento temporale di questa: sono visibili delle variazioni repentine di temperatura dovuti al movimento del campione durante lo scioglimento.

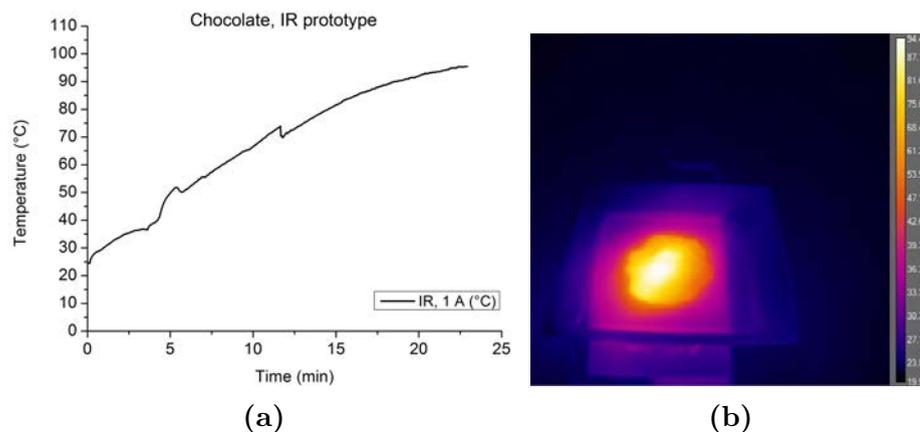


Figura 8.16: Grafico del riscaldamento del campione di cioccolato con prototipo IR polarizzato a 1 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.4.2 Riscaldamento con prototipo royal blue

Anche la prova con prototipo royal blue è durata all'incirca 23 minuti, facendo raggiungere la temperatura di poco meno di 160°C : il grafico in questione è riportato in figura 8.17.

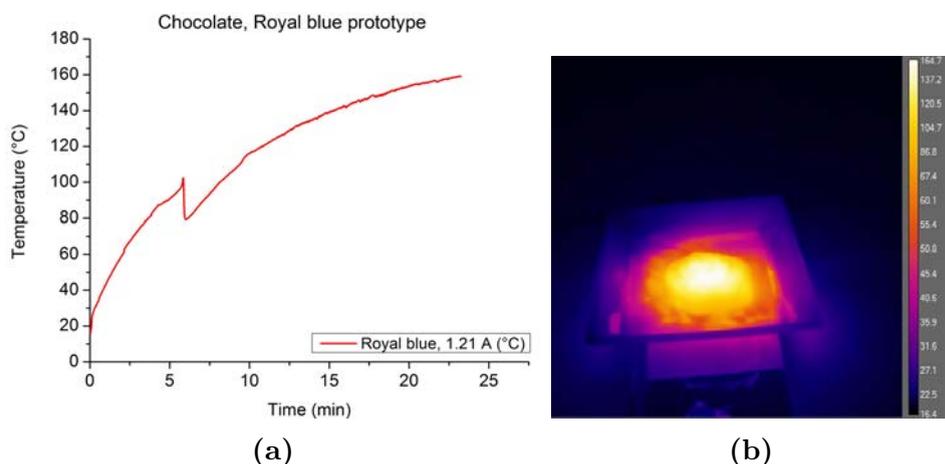


Figura 8.17: Grafico del riscaldamento del campione di cioccolato con prototipo royal blue polarizzato a 1.21 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

8.4.3 Riscaldamento con prototipo royal blue alla massima potenza

In questo caso la prova è durata circa 15 minuti in quanto il campione iniziava a bruciare: la temperatura raggiunta è di circa 206°C . Il grafico rispettivo è riportato in figura 8.18.

In figura 8.19 è rappresentato invece il campione durante l'irraggiamento e dopo la fine della prova: in figura 8.19b è possibile notare la presenza di fumo derivante dalla bruciatura, che si vede successivamente sulla superficie del campione.

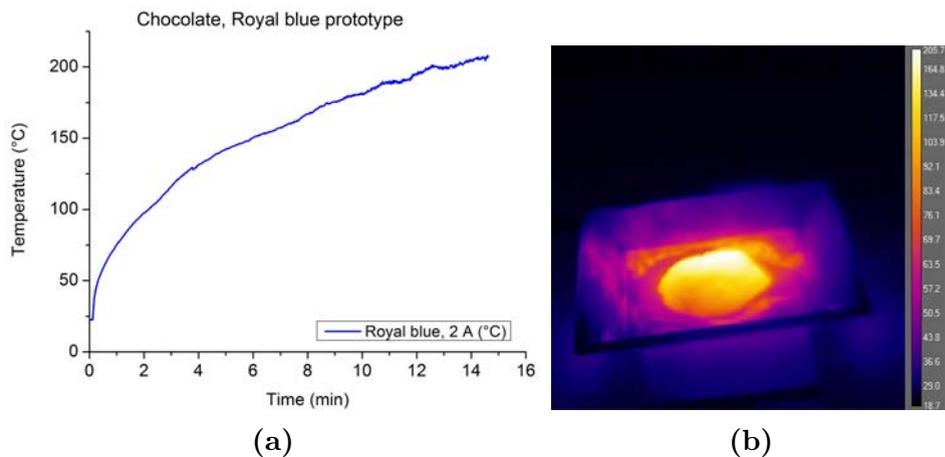


Figura 8.18: Grafico del riscaldamento del campione di cioccolato con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a); immagine con termocamera durante il riscaldamento (b)

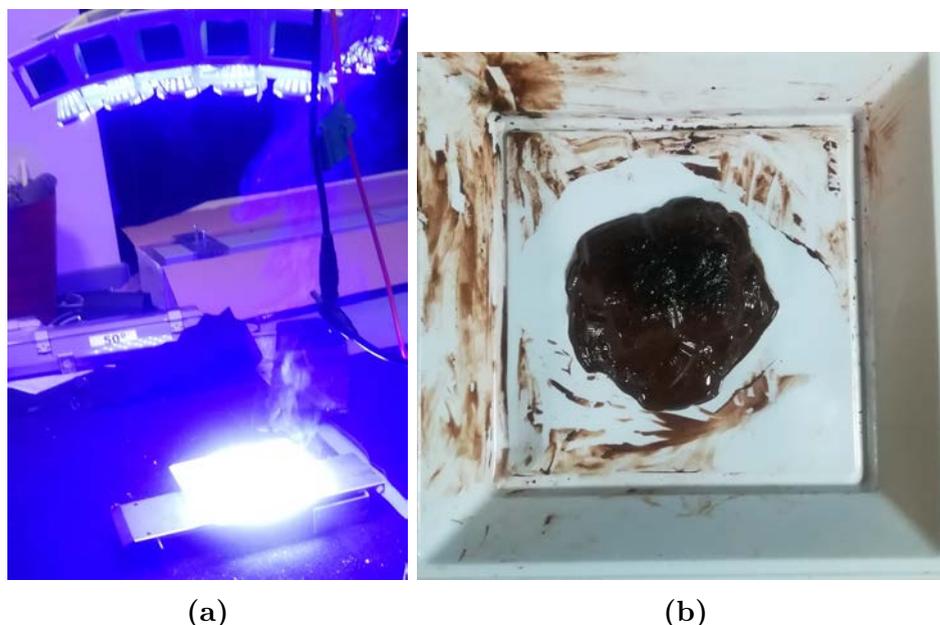


Figura 8.19: Campione di cioccolato irraggiato con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a) e dopo la prova (b)

8.5 Prova di cottura uovo

Come ultima prova si è cercato di cuocere un uovo, sfruttando la massima potenza irradiata dal prototipo Royal blue. La prova ha mostrato l'ottima potenzialità di cottura del tuorlo in quanto si è raggiunta la temperatura di oltre 190°C in poco meno di 25 minuti come mostrato in figura 8.21; l'albume invece è rimasto relativamente freddo. Osservando anche in questo caso il grafico di figura 8.21a si possono notare almeno due cambi di pendenza: il primo, dovuto alla parziale essiccazione della superficie del tuorlo, attorno all'ottavo minuto di prova; il secondo, dovuto al parziale imbrunimento della superficie, attorno al ventiduesimo minuto. In entrambi i casi si può notare un incremento dell'aumento di temperatura, e quindi dell'assorbimento di potenza. Il campione, dopo l'irraggiamento è mostrato in figura 8.20.



Figura 8.20: Foto del campione di uovo dopo l'irraggiamento: si nota il tuorlo cotto e l'albume ancora trasparente

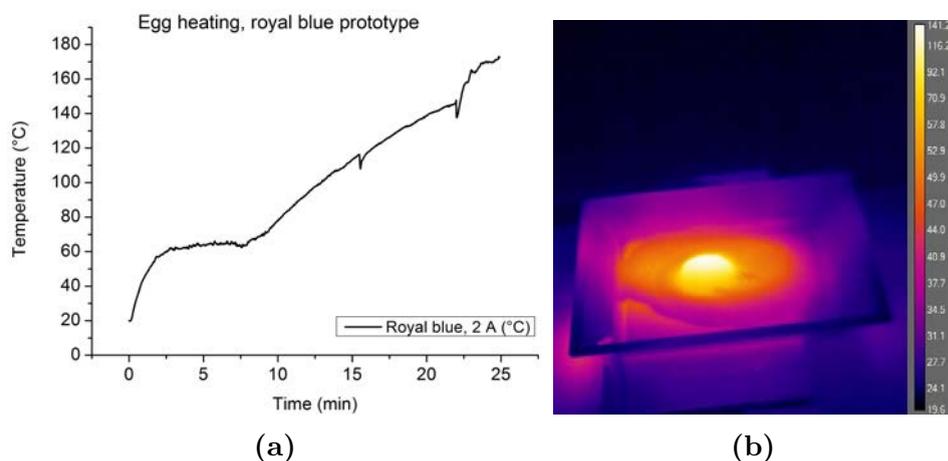


Figura 8.21: Grafico del riscaldamento dell'uovo con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a) e immagine con termocamera durante la prova (b)

La bassa temperatura dell'albume è stata confermata attraverso l'irraggiamento del solo albume, come mostrato in figura 8.22

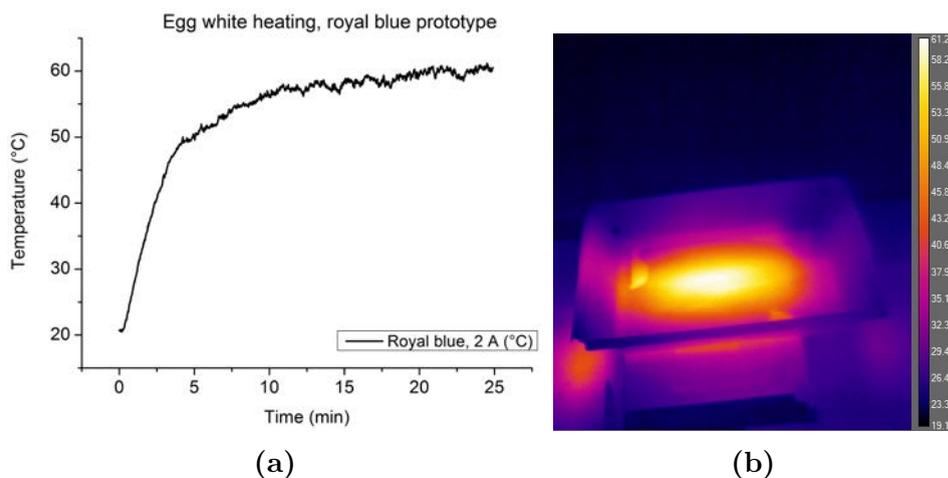


Figura 8.22: Grafico del riscaldamento dell'albume con prototipo royal blue polarizzato a 2 A (a) e immagine con termocamera durante la prova (b)

8.6 Commento e confronto sulle prove fatte

Considerando la prova di riscaldamento del cubo di PMMA è possibile notare degli aspetti in comune e delle differenze. Per quanto riguarda gli aspetti in comune, è possibile notare che, per ogni grafico, la differenza di temperatura finale tra la prima e la seconda sonda e tra la seconda e la terza è all'incirca la stessa e pari rispettivamente a circa 50°C e 20°C . Ciò è un risultato atteso in quanto il calore tende a propagarsi per conduzione all'interno del materiale. Il confronto più interessante risulta quello tra la versione IR e quella royal blue a parità di potenza: in questo caso si nota un aumento di temperatura maggiore nella versione royal blue rispetto a quella IR. Ad un'analisi più approfondita, risulta che il profilo di riscaldamento

della prima sonda nelle due prove in questione sia sostanzialmente sovrapponibile nei primi 10 minuti. Aggiungendo ciò, si può concludere che l'assorbimento di energia nella versione IR avvenga in uno strato maggiore di materiale. Di contro nella versione royal blue l'assorbimento avviene tutto solo superficialmente, portando ad un aumento di temperatura maggiore.

Questo viene inoltre confermato dai grafici di confronto, notando come il rapporto tra la temperatura delle sonde interne e quella superficiale sia sempre maggiore nel caso del prototipo IR.

Per quanto riguarda la prova di riscaldamento del pane bianco si nota immediatamente come, a parità di potenza irradiata, la versione del prototipo con le sorgenti royal blue abbia un effetto maggiore, arrivando a scaldare il campione fino ad oltre 100°C . È da evidenziare inoltre come, polarizzando il prototipo alla massima corrente (2 A), sia possibile raggiungere la temperatura di oltre 240°C , creando una bruciatura al centro, in un tempo più limitato rispetto alle prove precedenti. Tale effetto è da imputare al differente assorbimento del materiale alle due lunghezze d'onda analizzate. La lunghezza d'onda del royal blue risulta più assorbita rispetto alla lunghezza d'onda IR. Dal confronto tra la prova di riscaldamento del pane integrale con sorgenti IR e quella con sorgenti royal blue alla stessa irradianza risulta che, anche in questo caso, il campione irraggiato con prototipo royal blue raggiunga temperature più elevate a parità di tempo. Per quanto riguarda la prova svolta con prototipo royal blue alla massima potenza si nota come la temperatura raggiunta in 20 minuti sia poco meno di 200°C . Ad uno sguardo più generale appare chiaro che sia stato più difficoltoso scaldare quest'ultimo campione rispetto al pane bianco, probabilmente a causa della maggior densità e quantità d'acqua presente all'interno, nonostante questo presenti un colore più scuro che dovrebbe favorire l'assorbimento di energia.

La prova di riscaldamento del cioccolato rivela che con la versione IR del prototipo questo si scioglie in maniera più uniforme, probabilmente a causa della maggiore profondità di penetrazione dell'energia irradiata. Nel caso del prototipo royal blue il riscaldamento avviene in maniera più repentina, causando un indurimento e parziale bruciatura della superficie e uno scioglimento del materiale sottostante.

Per quanto riguarda l'ultima prova, si è scelto di cuocere un uovo: dall'esperimento risulta che il tuorlo si sia completamente cotto mentre l'albume sia rimasto trasparente e crudo. Una possibile spiegazione è data dal fatto che il tuorlo, essendo pigmentato, riesca ad assorbire l'energia irraggiata, mentre l'albume, essendo trasparente, si faccia completamente attraversare dalla luce, senza scaldarsi in maniera significativa. Il colore giallo del tuorlo inoltre evidenzia come questo elemento non sia in grado di riflettere la luce blu, massimizzando quindi l'assorbimento della luce stessa.

8.7 Grafici completi del cubo di PMMA

In questa sezione sono riportati per completezza i grafici della prova di riscaldamento del cubo di PMMA. Si nota come in tutti i casi la sonda più bassa (numero 4) si scaldi più velocemente di quella immediatamente sopra, probabilmente risentendo dell'aumento di temperatura della piastra metallica dove il campione poggia. I grafici in questione sono quelli di figura 8.23 e 8.24.

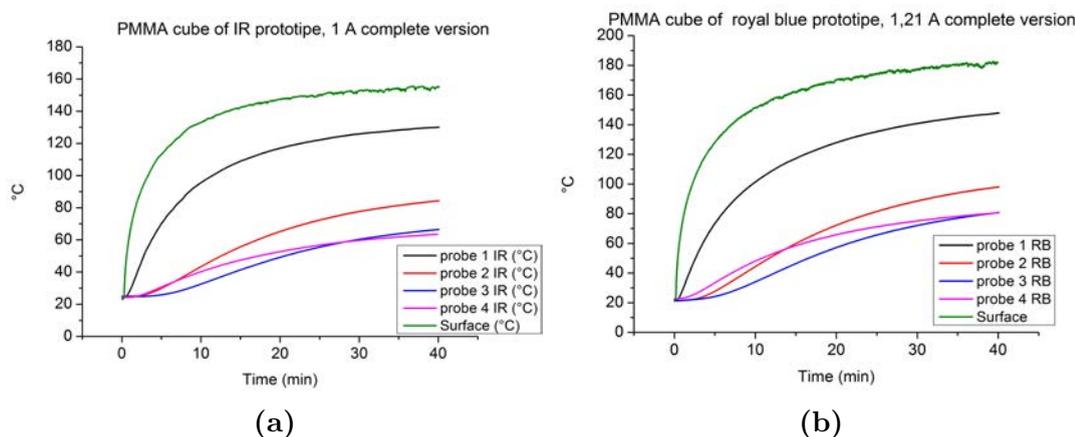


Figura 8.23: Grafico completo del riscaldamento del campione con prototipo IR polarizzato a 1 A (a) e prototipo royal blue polarizzato a 1.21 A (b)

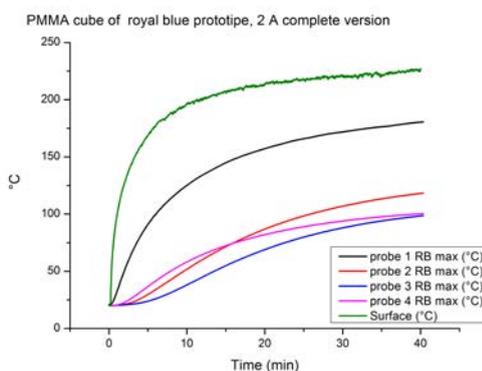


Figura 8.24: Grafico completo del riscaldamento del campione con prototipo royal blue polarizzato a 2 A

Capitolo 9

Conclusione

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo principale quello di realizzare un dispositivo basato su SSL che individuasse una zona di alta irradianza in un'area ristretta in modo da poter ottenere un elevato trasferimento energetico (irraggiamento); il secondo obiettivo è stato quello di analizzare come una diversa lunghezza d'onda di emissione possa influenzare questo. La prima fase ha visto una ricerca e l'individuazione delle sorgenti a più alta irradianza e di ottiche secondarie che garantissero la minore FWHM, seguita da una caratterizzazione di spettro, potenza ottica irradiata ed efficienza in modo da poter attuare un confronto tra le ottiche scelte. Dopo un primo confronto si sono individuati i modelli più performanti per ogni tipologia di package esterno e le ottiche secondarie con maggior efficienza e si è proceduto alla caratterizzazione su tavola xy per poter individuare il sistema formato da sorgente e ottica secondaria che garantisse valori di irradianza più alti, arrivando così alla scelta definitiva di ottica e sorgente. La scelta finale è quindi ricaduta sull'ottica CRYSTAL-MINE e sulle sorgenti XPGDRY-L1-601 (royal blue) e L1I0-0940150 (IR). La scelta di queste è stata dettata da due fattori: il primo legato alla differenza sufficientemente elevata di lunghezza d'onda che porta ad attuare un confronto dei diversi effetti a parità di potenza irradiata; il secondo è dovuto al fatto che la sorgente XPGDRY-L1-601 presenta il più alto valore di irradianza tra le sorgenti individuate, mentre la sorgente L1I0-0940150 offre la più alta efficienza. Si è proceduto quindi alla fase di progettazione e costruzione del prototipo sfruttando un software CAD e simulatore per poter dimensionare correttamente il numero di sorgenti e individuare una struttura che ne permettesse l'allineamento e la dissipazione del calore.

Riguardo alla costruzione del prototipo e le successive misure è stato rilevato che il punto di massima irradianza fosse di circa 18 cm più vicino al prototipo rispetto a quanto progettato: la motivazione principale risulta essere la scelta del materiale (PLA) e la struttura stessa leggermente flettente, che ha portato ad un leggero disallineamento delle ottiche rispetto al progetto originale. Le prove pratiche, infine, hanno fatto ritenere che la lunghezza d'onda prossima ai 450 nm (colore royal blue) sia quella a maggior efficacia per quanto riguarda l'aumento di temperatura indotto, soprattutto negli strati più superficiali.

In conclusione si ritiene che un sistema ad alta irradianza possa essere utilizzato per cottura superficiale di cibo, se questo non risulta essere trasparente, o in ambito industriale per cottura o trattamento di vernici colorate. Inoltre, sempre in ambito

industriale, un sistema così basato può essere integrato in processi produttivi che necessitino di un riscaldamento superficiale di un materiale da trattare o appena trattato. In ogni caso, ogni applicazione dovrà essere valutata specificatamente in quanto si è notato che l'efficacia di riscaldamento dipende da fattori specifici quali assorbimento del materiale e colore dello stesso.

Possibili sviluppi successivi sono incentrati sul consolidamento della struttura meccanica, usando ad esempio altri materiali più rigidi. Un altro possibile sviluppo, da verificare, è quello di progettare un sistema basato su un'unica PCB e un'unica ottica centrale più grande, corredata eventualmente da riflettori interni ai lati in modo da garantire la collimazione e allineamento dei fasci. Un sistema così formato avrebbe probabilmente un'efficienza complessiva minore, ma risulterebbe più leggero; inoltre, la dissipazione del calore prodotto dalle sorgenti risulterebbe più efficace in quanto sarebbe adottabile un dissipatore unico; infine, un sistema con queste caratteristiche risulterebbe più compatto e di dimensioni inferiori.

Bibliografia

- [1] Schubert E.F., Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press,2006,
- [2] R.S. Muller T.I. Kamins, Device electronics for integrated circuits, Wiley and sons, 2003, pp 231-238
- [3] Dong S. Lee, Daniel Byrnes, Aniruddh Parekh, Steve Ting, William Quinn,Carrier injection efficiency in nitride LEDs, Journal of Crystal Growth, Volume 310, Issue 23,2008, pp 5158-5161
- [4] Xing Li, Huiyong Liu, X. Ni, Ümit Özgür, Hadis Morkoç, Effect of carrier spillover and Auger recombination on the efficiency droop in InGaN-based blue LEDs, Superlattices and Microstructures, Volume 47, Issue 1, 2010, pp 118-122
- [5] Zhao Chao, Ng Tien Khee, Prabaswara Aditya, Conroy Michele, Jahan-gir Shafat, Frost Thomas, O'Connell John, Holmes Justin D., Parbrook Peter J., Bhattacharya Pallab, Ooi Boon S., An enhanced surface passivation effect in InGaN/GaN disk-in-nanowire light emitting diodes for mitigating Shockley–Read–Hall recombination, Nanoscale, Volume 7, Issue 40, 2015, pp 16658-16665
- [6] M. Dal Lago, M. Meneghini, N. Trivellin, G. Meneghesso, E. Zanoni, Degradation mechanisms of high-power white LEDs activated by current and temperature, Microelectronics Reliability, Volume 51, Issues 9–11, 2011, pp. 1742-1746,
- [7] B. Arnaudov, D.S. Domanevskii, S. Evtimova, Ch. Ivanov, R. Kakanakov,Band-filling effect on the light emission spectra of InGaN/GaN quantum wells with highly doped barriers, Microelectronics Journal, Volume 40, Issue 2, 2009,pp 346-348
- [8] A. V. Arecchi, T. Messadi, and R. J. Koschel, Field Guide to Illumination, SPIE Press, Bellingham, WA (2007), pp26
- [9] L.Jia-Ming, Photonic Devices, Cambridge University Press, 2005, pp 872-873.
- [10] Th.Gessmann, E. F.Schubert, High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications, Journal of Applied Physics,Volume 95,Issue 5, 2004, pp 2203-2216

- [11] S. Volodymyr, Gheslaghi N., Sözen M., Elci M., Sheremet N., Aydın A., Altuntaş Ismail, Ding K., Avrutin V., Özgür Ü., Morkoç H., InGaN stress compensation layers in InGaN/GaN blue LEDs with step graded electron injectors. *Superlattices and Microstructures*. Volume 116, Issue 10, 2018, pp. 1016
- [12] William A. Melton, Jacques I. Pankove, GaN growth on sapphire, *Journal of Crystal Growth*, Volume 178, Issues 1–2, 1997, Pages 168-173
- [13] Sh Sh Sharofidinov, A V Redkov, A V Osipov, S A Kukushkin, GaN growth via HVPE on SiC/Si substrates: growth mechanisms, *Journal of Physics: Conference series*, Volume 917, pp. 032028
- [14] T. Egawa, B. Zhang and H. Ishikawa, High performance of InGaN LEDs on (111) silicon substrates grown by MOCVD, in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, no. 3, 2005, pp. 169-171
- [15] Kim Jun-Youn and others, Highly efficient InGaN/GaN blue LED grown on Si (111) substrate. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 8262, 2011
- [16] Leszczynski M., Grzegory I., Bockowski M., Łuczniak, B. (2008). Secrets of GaN substrate properties for high luminosity of InGaN quantum wells, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 6910, art nr. 69100G, 2008
- [17] Horng R.-H., Wu B.-R., Tien C.H (2014). Performance of GaN-based light-emitting diodes fabricated using GaN epilayers grown on silicon substrates, *Optics express*, Volume 22, 2014, pp A179-A187
- [18] Liu Z., Liu S., Wang K., Luo X., Status and prospects for phosphor-based white LED packaging, *Frontiers of Optoelectronics in China*, Volume 2, 2009, pp 119-140
- [19] Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., *Elementi di fisica-elettromagnetismo e onde*, 2008, 2 edizione, pp. 339-340.
- [20] Jiang W, Schneider K., TIR optics enhance the illuminance on target for directional LED modules, *LED's magazine*, Issue 49, 2012, pp 59-61
- [21] Wang K., Liu S., Luo X., Wu D., *Freeform Optics for LED Packages and Applications*, 2017, Wiley and Sons, pp.
- [22] Verzellesi G., Saguatti D., Meneghini M., Bertazzi F., Goano M., Meneghesso G., Zanoni E., Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies, *Journal of Applied Physics*, Volume 114, Issue 7, 2013, pp. 071101
- [23] Karpov S., ABC-Model for Interpretation of Internal Quantum Efficiency and Its Droop in III-Nitride LEDs: A Review, *Optical and Quantum Electronics*, Volume 47, 2015, pp. 1293-1303

- [24] <https://www.luxemozione.com/2016/05/sistemi-ottici-led-lenti-vs-riflettori-qual-e-migliore.html>
- [25] <https://library.weschool.com/lezione/ottica-geometrica-fisica-indice-di-rifrazione-legge-di-snell-brachistocrona-principio-di-fermat-17360.html>
- [26] <https://www.electronicweekly.com/news/products/led/electronics-weeklys-big-guide-to-led-optics-2011-09/>
- [27] <https://www.biofotonica.it/tecnologie/sfere-integratrici/>
- [28] <https://marinelifetech.wordpress.com/2012/12/13/beam-me-up-scotty-beam-angle-and-led-optics-explained-part-2>
- [29] <https://www.nap.edu/read/18279/chapter/5#37>

