



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRONICA

**“SVILUPPO DI SISTEMA DI ILLUMINAZIONE
MULTIWAVELENGTH IN FIBRA OTTICA”**

Relatore: *Prof. Nicola Trivellin*

Correlatore: *Prof. Matteo Meneghini*

Laureando: *Claudio Candian*

Anno Accademico 2021/2022

Padova, 3 ottobre 2022

A chi mi ha accompagnato lungo questo viaggio

5.3	Simulazioni svolte e risultati ottenuti	. . . . .	78
5.4	Osservazioni e conclusioni	. . . . .	87
6	Sistema con guida di luce	. . . . .	91
6.1	Principio di funzionamento	. . . . .	91
6.2	Prototipo di sistema e componenti ottici utilizzati per realizzarlo	. . . . .	92
6.3	Simulazioni svolte e risultati ottenuti	. . . . .	94
6.4	Osservazioni e conclusioni	. . . . .	104
7	Risultati sperimentali	. . . . .	107
7.1	Sistema con specchi diecrici	. . . . .	107
7.2	Sistema con guida di luce	. . . . .	115
	Conclusioni	. . . . .	123
	Bibliografia	. . . . .	127

Abstract

Attualmente, in molti laboratori che operano nei campi dell'ottica e dell'optoelettronica, un sistema di illuminazione multiwavelength in fibra ottica potrebbe essere utile per diversi scopi. Il lavoro di tesi proposto si prefigge l'obiettivo di sviluppare e studiare tale sistema di illuminazione fino a trovare una soluzione sufficientemente efficiente per realizzarlo in maniera completa fisicamente.

Inizialmente si è svolto un processo di selezione delle sorgenti da acquistare ed utilizzare, ovvero dei LED. Si sono tenuti in considerazione diversi aspetti e alla fine, con qualche compromesso, si è compilata una lista di 24 LED.

Successivamente si sono studiate e sviluppate mediante un simulatore ottico tre tipologie diverse di sistema, le quali sono state scelte scartandone molte altre di meno promettenti o comunque con diversi problemi. Per ognuna di esse inizialmente si è considerato una sorta di prototipo del sistema completo che fa uso di un insieme ristretto di LED e lo si è studiato e migliorato cercando di massimizzare la sua efficienza, ovvero il rapporto tra luce immessa all'interno della fibra ottica e quella totale emessa dalle sorgenti; in questo modo si può paragonare le tre tipologie e capire con quali di esse ha senso procedere con le prove in laboratorio. Ciò che è emerso è che la prima tipologia, che fa uso di specchi diecrici, raggiunge un'efficienza del 2 %, la seconda, che fa uso di light pipe homogenizing rods, raggiunge il 3 %, mentre la terza, che fa uso di una guida di luce, raggiunge circa il 14 %.

A questo punto, sono state fatte delle prove in laboratorio per confrontare anche realmente le tipologie. In particolare, sono stati costruiti fisicamente i prototipi e sono state fatte misurazioni su di essi, ma solo della prima e terza tipologia tralasciando invece la seconda; con quest'ultima, infatti, si aveva già notato al simulatore ottico che sarebbe stato difficoltoso mantenere le stesse prestazioni del prototipo costruendo il sistema completo, quindi sarebbe stato inutile proseguire facendo ulteriori prove su di essa. Alla fine, la terza tipologia non ha confermato l'efficienza trovata precedentemente, complici da un lato le semplificazioni fatte sul materiale della guida al simulatore ottico, dall'altro la poca precisione nella costruzione del modello reale; la prima tipologia, invece, ha confermato la sua efficienza quindi, in conclusione, sembra essere questa la tipologia più adatta per proseguire e realizzare il sistema completo.

Per disegnare in 3D e simulare i sistemi ottici in questione è stato utilizzato il software PC "OptisWorks", il quale estende SolidWorks con molte funzionalità specifiche per l'ottica.

Introduzione

I difetti nei semiconduttori possono comportare l'interruzione della periodicità della loro struttura cristallina. In particolare, questa perturbazione locale causa l'introduzione di stati energetici all'interno del bandgap proibito del materiale; questi stati energetici introdotti possono agire sia come trappole per i portatori di carica, che come centri di ricombinazione non radiativa. Alla fine, concretamente, la presenza di difetti può limitare sia l'affidabilità che le prestazioni dei semiconduttori, riducendo la loro efficienza di picco e favorendo l'efficiency droop. Risulta quindi fondamentale riuscire a definire le proprietà dei difetti in un certo dispositivo, trovando la loro posizione energetica, comportamento di intrappolamento, sezione trasversale di cattura e posizione spaziale mediante adeguate tecniche di misurazione. Oltretutto, caratterizzando completamente una trappola o un livello profondo può essere possibile dedurre la sua origine fisica.

Per i dispositivi a semiconduttore basati su giunzioni Schottky o p-n, e caratterizzati da una regione di carica spaziale (SCR), esistono diverse tecniche avanzate per caratterizzare i difetti. Queste, in genere, si basano sulla misurazione della variazione della capacità del dispositivo causata da uno stimolo esterno, come potrebbe essere un cambiamento di temperatura, un impulso di tensione, un impulso ottico e altro ancora; in sostanza, tutte le informazioni sulle proprietà dei difetti vengono allora derivate dalla risposta elettrica del dispositivo d'interesse ai suddetti stimoli.

Una di queste tecniche, rilevante soprattutto per dispositivi simil p-n costruiti con materiali wide-bandgap, è la "Deep Level Optical Spectroscopy" (DLOS), la quale si basa sulla misurazione del transitorio di capacità durante un impulso ottico con lunghezza d'onda variabile. Questa tecnica permette di trovare le caratteristiche ottiche di un livello profondo, tra le quali la sua energia ottica di ionizzazione, la dipendenza spettrale della optical cross section $\sigma_o(h\nu)$, anche detta "photoionization cross section" (PCS), e la "steady-state photocapacitance" (SSPC). La tecnica in questione utilizza un impulso ottico per indurre l'emissione di portatori intrappolati. Infatti, mentre il dispositivo è polarizzato ad una certa tensione inversa V_R , in un certo istante un impulso di luce monocromatica viene applicata al dispositivo per eccitare alcuni suoi livelli profondi attraverso l'assorbimento di un fotone: come risultato si ha l'emissione dei portatori di carica precedentemente intrappolati. Se vengono emessi portatori maggioritari, la capacità del dispositivo aumenterà; al contrario, se vengono emessi portatori minoritari, essa diminuirà. Una volta che si raggiunge la nuova condizione steady-state e la capacità si stabilizza, lo stimolo luminoso può essere tolto, quindi i portatori

vengono catturati nuovamente dalle trappole e il dispositivo viene riportato allora alla condizione iniziale. A questo punto, si ripete la misura del transitorio più volte, utilizzando ad ogni ripetizione una luce monocromatica di lunghezza d'onda diversa; alla fine, attraverso una fase di analisi si ottengono tutte le informazioni d'interesse.

Questa tecnica, come anche altre sempre basate sull'assorbimento di fotoni [1], sono state utilizzate recentemente in alcune ricerche presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova, per ricavare caratteristiche d'interesse dei vari dispositivi sotto test.

Un primo esempio di questo è dato dallo studio sui diodi GaN verticali con drogaggio di polarizzazione svolto nel 2019, dove utilizzando in parte anche la tecnica DLOS, si ha avuto conferma della presenza di carbonio residuo nel dispositivo [2]. Un secondo e un terzo esempio sono dati dagli studi sui meccanismi di intrappolamento e de-intrappolamento nei FinFET verticali β -Ga₂O₃ e sull'analisi delle instabilità della tensione di soglia sui GaN-on-Si FET semi-verticali, dove si sono fatte prove che sfruttano sempre l'assorbimento di fotoni per indurre il detrappolamento dei difetti e ricavare quindi diversi parametri [3][4].

Per tutte queste tecniche basate sull'assorbimento di fotoni, come già anticipato spiegando quella DLOS, si ripete la misura più volte, utilizzando ad ogni ripetizione una luce di eccitazione monocromatica di lunghezza d'onda diversa. Di solito queste radiazioni monocromatiche vengono ottenute in due modi ovvero, o con una sorgente policromatica insieme ad un monocromatore, o usando direttamente più LED monocromatici; tuttavia, entrambi i modi offrono diversi svantaggi. Infatti, usando un monocromatore si ottiene poca intensità di luce, cosa che dà problemi quando si deve penetrare in profondità nel materiale; invece, usando più LED monocromatici l'intensità non è un problema, però per ogni singola lunghezza d'onda si ha la complicazione fastidiosa di dover sostituire fisicamente il LED e quindi anche ricalibrare il sistema di misura.

Quindi, potrebbe far comodo un setup che compatti meccanicamente più LED monocromatici con diversa lunghezza d'onda, cosa che alla fine permetterebbe sia di avere alta intensità, in modo da poter arrivare in profondità nel materiale, sia di eliminare il problema della sostituzione e ricalibrazione, in modo da riuscire a fare misure in maniera più veloce e accurata. Proprio per questo scopo, è richiesto di realizzare un sistema che immetta in maniera efficiente la radiazione ottica di più LED monocromatici con diversa lunghezza d'onda all'interno di una fibra ottica di diametro ipotetico di 1 mm, in modo tale che sia guidata una radiazione con spettro regolabile risultante dalla somma di diverse componenti quasi-monocromatiche, da usare poi per illuminare ciò che è necessario; inoltre, per rendere il sistema il più utile e versatile

possibile, si vorrebbe uno spettro ampio, in modo da coprire la banda da circa 300 a circa 1000 nm, oltre che uniforme ma anche variabile a piacimento.

Il lavoro di tesi consiste nello studiare e sviluppare questo sistema di illuminazione, in particolare l'obiettivo principale è trovare una soluzione sufficientemente efficiente per realizzarlo in maniera completa fisicamente. L'efficienza, ovvero il rapporto tra la potenza della radiazione ottica in uscita dal sistema diretta sulla faccetta d'ingresso della fibra (rappresentata ed approssimata da un'area di 1 mm^2) e quella totale emessa dalle sorgenti all'ingresso, è il metro di paragone più importante da usare durante questi studi in quanto risulta fondamentale per prima cosa non sprecare luce attraverso il sistema immettendone il più possibile nella fibra. Inoltre, vanno presi in considerazione anche l'angolo d'ingresso della luce nella fibra e l'uniformità delle sorgenti nel fornire potenza all'uscita.

Il lavoro di tesi si divide globalmente in due fasi: una prima al simulatore ottico su PC e una seconda in laboratorio.

L'obiettivo della prima fase è, dopo aver trovato diverse tipologie di sistema che realizzino quanto voluto e aver scelto i LED necessari, studiare e sviluppare tali tipologie attraverso dei prototipi di dimensioni ridotte all'interno del simulatore ottico, ricercando per ognuno di essi la soluzione ottimale con la migliore efficienza.

Per quanto riguarda la seconda fase l'obiettivo è costruire fisicamente in maniera quanto più fedele possibile le soluzioni ottimali trovate a PC dei vari prototipi, o più precisamente solo quelle tra di loro ritenute più promettenti, per poter misurare anche realmente la loro efficienza, in modo da capire alla fine quale tipologia di sistema sia sufficientemente efficiente per procedere e realizzare il sistema al completo.

La presente trattazione costituisce un riassunto di tutte le attività di studio teorico, di simulazione e di sperimentazione condotte, ed è strutturato nei seguenti capitoli

Capitolo 1: spiegazione di alcune leggi, fenomeni e grandezze fondamentali per questo sistema ed in generale per l'ottica.

Capitolo 2: presentazione di alcuni aspetti d'interesse riguardanti i LED e selezione dei LED da acquistare ed utilizzare.

Capitolo 3: presentazione delle idee scartate per realizzare il sistema, di quelle portate avanti e del procedimento di studio e sviluppo che a grandi linee si è seguito con tutte le tre tipologie.

Capitolo 4: illustrazione del funzionamento del tipo di sistema con specchi diecrici, dello studio e sviluppo di un suo prototipo fino alla soluzione ottimale, di alcune osservazioni e conclusioni.

Capitolo 5: illustrazione del funzionamento del tipo di sistema con light pipe homogenizing rods, dello studio e sviluppo di un suo prototipo fino alla soluzione ottimale, di alcune osservazioni e conclusioni.

Capitolo 6: illustrazione del funzionamento del tipo di sistema con guida di luce, dello studio e sviluppo di un suo prototipo fino alla soluzione ottimale, di alcune osservazioni e conclusioni.

Capitolo 7: presentazione delle prove svolte in laboratorio sulle soluzioni ottimali dei prototipi dei sistemi con specchi diecrici e con guida di luce realizzate fisicamente.

Tutti i disegni e le simulazioni ottiche in 3D sono stati fatti tramite il software OptisWorks, estensione del più diffuso SolidWorks con molte funzionalità specifiche per l'ottica.

Al termine, un capitolo finale concluderà la tesi, riassumendo i risultati più importanti ottenuti durante tutto il lavoro.

Capitolo 1

Concetti fondamentali di ottica

Per poter sviluppare il sistema è necessario, innanzitutto, presentare in questo capitolo alcune leggi, definizioni e concetti riguardanti il tema “ottica”. Parlando di leggi fondamentali non si possono non menzionare le Leggi di Snell, che occorreranno per spiegare i concetti di riflessione interna totale e apertura numerica, a loro volta fondamentali per comprendere il funzionamento dei light pipe homogenizing rods (chiamati anche “light mixing rods”), utilizzati per un certo tipo di sistema, e soprattutto quello delle fibre ottiche. È necessario poi introdurre il concetto e definizione di lunghezza focale per capire come si comportano le lenti asferiche che verranno utilizzate in più occasioni nello sviluppo dei vari tipi di sistema. Sarà utile, inoltre, presentare brevemente le grandezze fotometriche e porle in confronto con quelle radiometriche. Infine, occorre discutere riguardo all’etendue e dei problemi che porta allo sviluppo del sistema.

1.1 Leggi di Snell

Si può descrivere in maniera generalizzata un’onda elettromagnetica progressiva che si propaga in una qualsiasi direzione rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano arbitrario tramite la funzione d’onda $E = f(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$, dove \vec{k} è il vettore d’onda che rappresenta la direzione in cui si propaga dell’onda, \vec{r} è il vettore posizione che identifica un qualunque punto del fronte d’onda rispetto all’origine del sistema di riferimento, mentre $\omega = \frac{2\pi}{T}$ è la pulsazione dell’onda. Nel momento in cui l’onda incide su una superficie, in qualsiasi suo punto P colpito dal fascio, sono presenti contemporaneamente tre onde: l’onda incidente E_i , l’onda riflessa E_r e l’onda rifratta E_t . Queste tre onde vengono rappresentate dalle funzioni:

$$\begin{cases} E_i = f_i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega t) \\ E_r = f_r(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t) \\ E_t = f_t(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t) \end{cases} \quad (1.1.1)$$

dove la pulsazione dell’onda rimane la stessa, essendo una proprietà della sorgente, ma il vettore d’onda cambia perché la velocità dell’onda varia passando da un mezzo materiale ad un altro. Le tre funzioni, coesistendo nello stesso punto P della superficie, chiaramente devono essere in qualche modo dipendenti. Deve esistere una condizione di continuità tra i campi elettrici delle

onde che valga in ogni punto di incidenza sulla superficie e in ogni istante. Si introduce ora il sistema di riferimento cartesiano di figura 1.1.1, che ha origine O sulla superficie, asse z normale alla superficie, asse y sulla superficie in modo tale che il vettore d'onda della radiazione incidente giaccia sul piano yz e asse x in modo da formare una terna levogira $Oxyz$.

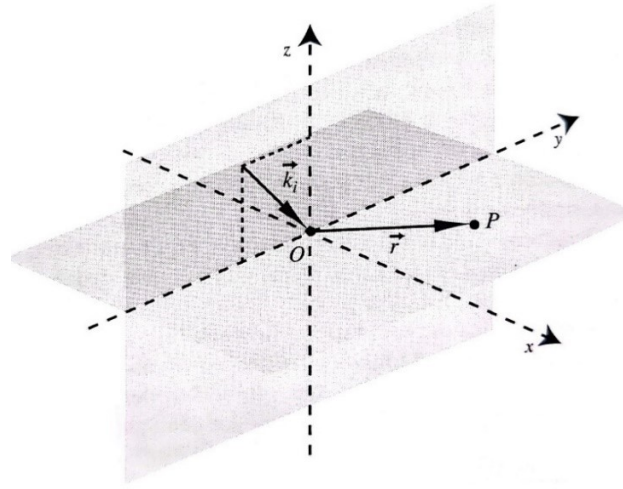


Figura 1.1.1 Sistema di riferimento cartesiano $Oxyz$, punto P e vettore d'onda rappresentante la direzione di propagazione dell'onda incidente [5]

In questo sistema di riferimento nel punto d'incidenza si hanno i vettori così espressi:

$$\begin{cases} \vec{k}_i \equiv (0, k_{iy}, k_{iz}) \\ \vec{k}_r \equiv (k_{rx}, k_{ry}, k_{rz}) \\ \vec{k}_t \equiv (k_{tx}, k_{ty}, k_{tz}) \\ \vec{r} \equiv (x, y, 0) \end{cases} \quad (1.1.2)$$

Alla fine, dopo aver sfruttato la condizione di continuità, aver eseguito dei prodotti scalari e aver sfruttato altre condizioni di uguaglianza, si ricava che i vettori d'onda \vec{k}_i , \vec{k}_r e \vec{k}_t , e quindi le onde stesse, giacciono tutti sul piano yz formando con l'asse z rispettivamente gli angoli θ_i , θ_r e θ_t ; nella figura 1.1.2 si osservano tali angoli.

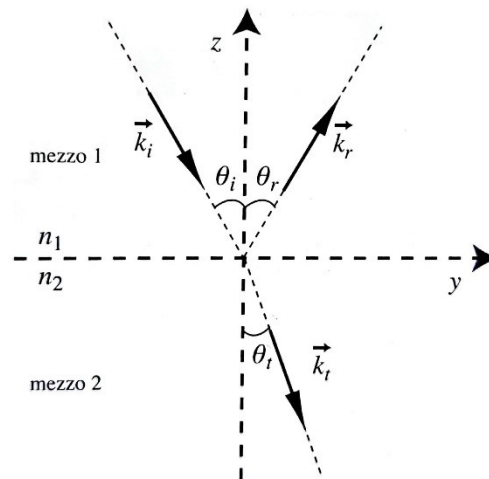


Figura 1.1.2 Onde incidente, riflessa e rifratta nei mezzi 1 e 2 [5]

Sempre nella figura 1.1.2 si osserva che le onde incidente e riflessa si propagano nello stesso mezzo materiale di indice di rifrazione n_1 con velocità v_1 , invece l'onda rifratta si propaga in un mezzo materiale di indice di rifrazione n_2 con velocità v_2 . Alla fine, dopo alcuni passaggi, si ricavano:

$$\theta_i = \theta_r \quad , \quad (1.1.3)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad . \quad (1.1.4)$$

Le equazioni appena ricavate (1.1.3) e (1.1.4) che mettono in relazione gli angoli, insieme alla condizione per cui le onde sono complanari (nel piano yz in questo caso), sono note come Leggi di Snell [5].

1.2 Riflessione interna totale

La riflessione interna totale è il principio fondamentale che permette di mantenere, e far così viaggiare, la luce all'interno di una fibra ottica oppure, come verrà visto in seguito, di un light pipe homogenizing rod. Per spiegare questo fenomeno occorrono le Leggi di Snell che sono appena state illustrate. Nella figura 1.2.1 si osservano situazioni differenti.

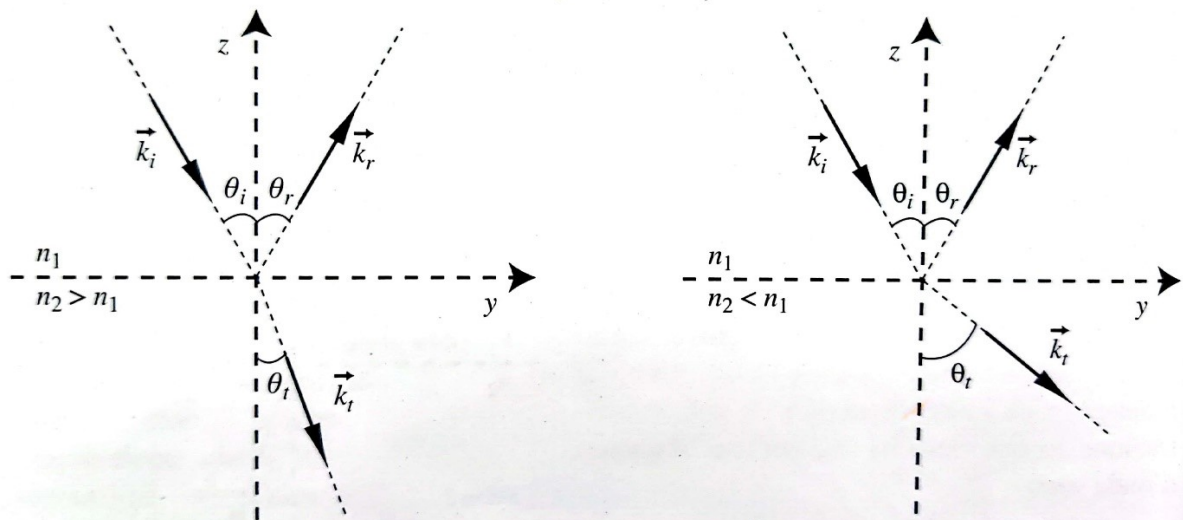


Figura 1.2.1 Interfaccia mezzi 1-2: a) caso con $n_2 > n_1$, b) caso con $n_2 < n_1$ [5]

In figura 1.2.1.a si ha il passaggio da un mezzo con indice di rifrazione più basso ad un mezzo con indice di rifrazione più alto, $n_2 > n_1$, questo significa che si ha sempre:

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i < \sin \theta_i \quad \Rightarrow \quad \theta_t < \theta_i \quad ; \quad (1.2.1)$$

viceversa, in figura 1.2.1.b si ha il passaggio da un mezzo con indice di rifrazione più alto ad uno con indice di rifrazione più basso, $n_2 < n_1$, ciò significa che si ha sempre:

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i > \sin \theta_i \Rightarrow \theta_t > \theta_i . \quad (1.2.2)$$

Nel primo caso non ci sono situazioni particolari [5], mentre nel secondo caso può avvenire la riflessione interna totale. Ad un certo angolo di incidenza chiamato angolo critico o angolo limite θ_c , l'angolo di rifrazione θ_t raggiunge l'ampiezza di $\pi/2$, cioè la massima possibile; l'angolo θ_c si ricava nel seguente modo:

$$\sin \frac{\pi}{2} = 1 \Rightarrow n_1 \sin \theta_c = n_2 \cdot 1 \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) . \quad (1.2.3)$$

A questo punto è evidente che se $\theta_i > \theta_c$ non si riescono più a soddisfare le condizioni di rifrazione e si ha quindi la riflessione totale all'interfaccia. La figura 1.2.2 mostra quanto spiegato.

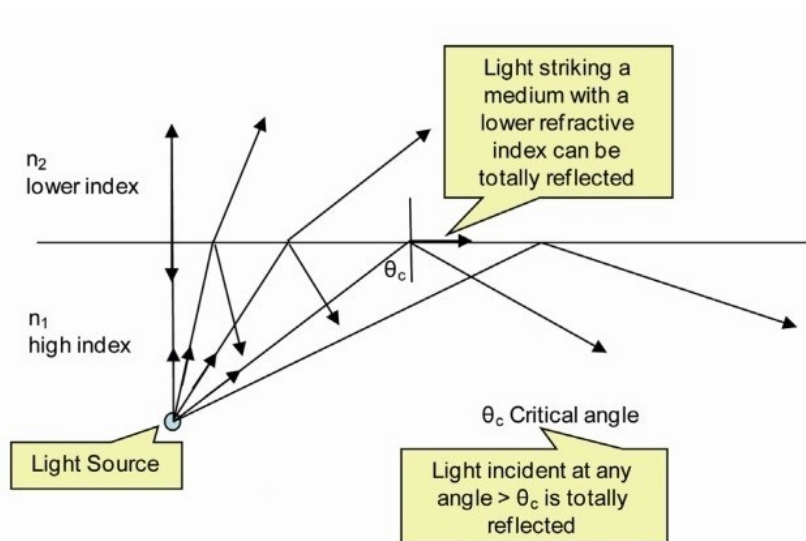


Figura 1.2.2 Cosa può accadere all'interfaccia con $n_2 < n_1$ a seconda dell'angolo di incidenza [6]

Nonostante il nome, va detto che anche in una situazione di riflessione interna totale, in realtà, un'onda rifratta è presente, ma è un'onda di superficie (o onda evanescente) che decade esponenzialmente all'interno del mezzo con indice di rifrazione n_2 [7], per questo può essere trascurata.

Nelle fibre ottiche grazie alla riflessione interna totale si ha la luce in ingresso che rimane idealmente intrappolata all'interno di esse e riesce così a viaggiare da capo a capo; si ha il nucleo della fibra (core) che ha indice di rifrazione maggiore del mantello (cladding) che la riveste (o comunque dell'aria se si usa la fibra "nuda") e questo permette di essere nella situazione $n_2 < n_1$ ed avere una riflessione interna totale. Maggiore è la differenza tra gli indici

di rifrazione, minore è l'angolo minimo rispetto alla normale al quale la luce può incidere sull'interfaccia interna riuscendo a rimanere intrappolata.

Nella fibra, in realtà, oltre alla riflessione interna totale sarebbero presenti diversi fenomeni di distorsione quali la dispersione, l'attenuazione e la non linearità, che però, vista la fibra di lunghezza molto limitata che verrà utilizzata, non verranno presi in considerazione.

È importante ribadire che anche i light pipe homogenizing rods, che verranno utilizzati per un certo tipo di sistema, funzionano grazie al principio della riflessione interna totale.

1.3 Apertura numerica

In 1.2 è stato illustrato il principio che è alla base del funzionamento delle fibre ottiche ovvero la riflessione interna totale che, come già visto, avviene se si ha $n_2 < n_1$ e $\theta_i > \theta_c$. Si può supporre che la condizione $n_2 < n_1$ sia sempre verificata in quanto i materiali di core e cladding hanno gli indici di rifrazione così per costruzione. Sulla condizione $\theta_i > \theta_c$, invece, non si possono fare supposizioni preliminari perché il suo verificarsi o meno dipende strettamente da come la sorgente o il sistema posto a monte della fibra incidono su di essa. Quel che si può fare, sempre tramite le Leggi di Snell, è di trasportare la condizione sull'interfaccia all'ingresso della fibra, ricavando direttamente un vincolo per l'angolo massimo con cui la luce può incidere sulla faccetta d'ingresso; questo risulterà più chiaro osservando la figura 1.3.1 e i passaggi svolti dopo di essa.

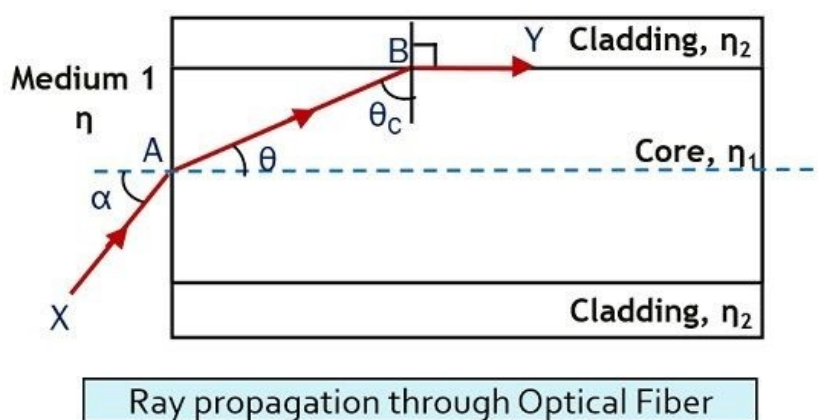


Figura 1.3.1 Angoli di interesse nella propagazione di luce in fibra [8]

Ragionando ponendosi nella situazione limite in cui all'interfaccia "B" della figura 1.3.1 si incide con esattamente l'angolo θ_c , per complementarità tra angoli si ha:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_c ; \quad (1.3.1)$$

ora, guardando sempre la figura 1.3.1, all'interfaccia di ingresso della fibra "A" per le Leggi di Snell si ha:

$$n \sin \alpha = n_1 \sin \theta , \quad (1.3.2)$$

che usando (1.3.1) può essere riscritta come:

$$n \sin \alpha = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c \right) , \quad (1.3.3)$$

inoltre, per identità trigonometrica si può riscrivere come:

$$n \sin \alpha = n_1 \cos \theta_c , \quad (1.3.4)$$

e infine, portando al secondo membro l'indice di rifrazione n , si ha:

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n} \cos \theta_c . \quad (1.3.5)$$

A questo punto è necessario scrivere in maniera differente il termine $\cos \theta_c$ sfruttando l'identità fondamentale della trigonometria:

$$\cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (1.3.6)$$

e per quanto visto in (1.2.3) si può scrivere $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$, quindi si può riscrivere:

$$\cos \theta_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} , \quad (1.3.7)$$

che se sostituito in (1.3.5) permette di ottenere:

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} = \frac{1}{n} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} ; \quad (1.3.8)$$

quello indicato nella figura 1.3.1 con "Medium 1" è solitamente aria, quindi $n = 1$ e la precedente equazione può essere semplificata, definendo per le fibre ottiche [8]:

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3.9)$$

Come anticipato in precedenza, con l'apertura numerica si conosce l'angolo massimo (in realtà il seno di esso) al quale la luce può incidere sulla faccetta d'ingresso della fibra con la sicurezza (idealmente) che essa rimanga confinata e viaggi per riflessione totale. In sostanza, l'apertura numerica rappresenta l'abilità della fibra nel collezionare la luce. Ricollegandosi alla considerazione fatta quando di parlava dell'interfaccia interna, qui si osserva che maggiore è la differenza tra gli indici di rifrazione e maggiore sarà l'angolo con il quale si può incidere sulla faccetta d'ingresso della fibra, in questo caso. L'angolo α è chiamato "angolo di accettazione" e il doppio di esso va a costituire il cosiddetto "cono di accettazione" della fibra ottica.

1.4 Lunghezza focale ed implicazioni

Si osservi la lente convergente (o convessa) in figura 1.4.1.

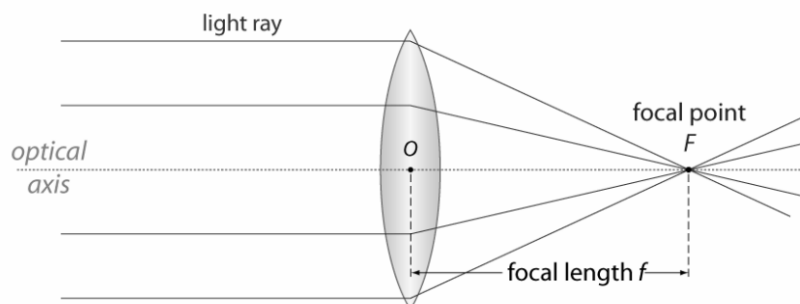


Figura 1.4.1 Lente convessa con focal point e focal length [9]

Il punto dove i raggi di luce si incrociano è chiamato “punto focale” F della lente, mentre la distanza che separa, in generale, il centro O della lente e il punto focale è chiamata “distanza focale” o anche “lunghezza focale” f della lente [10]. In termini più pratici, sempre guardando la figura 1.4.1, si potrebbe pensare alla lunghezza focale in due modi:

- Se ci si pone a sinistra con una sorgente a distanza infinita che giunge con raggi collimati, allora la lunghezza focale risulta la distanza dal centro della lente alla quale questi raggi convergono in un punto;
- Se ci si pone a destra con una sorgente puntiforme, allora la lunghezza focale è la distanza dal centro della lente alla quale porre tale sorgente per avere oltre la lente un fascio di raggi collimati.

La seconda versione è quella che più si addice per il sistema che verrà sviluppato nel Capitolo 4, in quanto le sorgenti di luce saranno dei LED, che si possono vedere, con chiare approssimazioni, come sorgenti puntiformi; la prima versione potrebbe essere più adatta nel caso di utilizzo di laser.

Conoscere cosa rappresenta la lunghezza focale risulta importante ma rappresenta solo la “base”, infatti, partendo dalla situazione in cui si ha la sorgente esattamente alla distanza focale, si potrebbe mantenere fissa la sorgente ma modificare la posizione della lente:

- allontanandola o avvicinandola lungo la normale del LED (asse ottico);
- spostandola sulle due dimensioni del piano ottico in cui si trova;
- inclinandola di qualche grado;

ognuno di questi movimenti permette di ottenere effetti diversi sulla luce in uscita e questo fatto tornerà molto utile nello sviluppo del sistema del Capitolo 4, quindi verrà approfondito meglio

in quel momento. Va notato che alcuni di questi movimenti si potrebbero avere anche involontariamente per l'imprecisione nella realizzazione dei supporti per lenti e LED o nel posizionamento degli stessi.

A livello pratico può risultare più utile conoscere la "lunghezza focale posteriore" f_b , ovvero la distanza che separa la faccia posteriore o il vertice posteriore ("posteriore" nel senso di quello che guarda al punto focale) dal punto focale, questo perché anche conoscendo f non è detto che si conosca esattamente dov'è posizionato il punto O in quanto esso potrebbe non trovarsi in corrispondenza di alcun riferimento fisico della lente; anche questo concetto verrà rivisto nel momento in cui verranno mostrate le lenti fisicamente utilizzate. A seconda della forma della lente poi, potrebbe essere che la lunghezza focale si riferisca alla distanza tra il punto focale e un punto all'interno della lente diverso dal suo centro, cosa che di solito è segnalata nel disegno di riferimento del produttore, ma anche per questo motivo è utile fare riferimento alla lunghezza focale posteriore il cui significato resta sempre il medesimo. In figura 1.4.2 è riportato il disegno di riferimento per una lente sferica piano-convessa in vetro N-BK7.

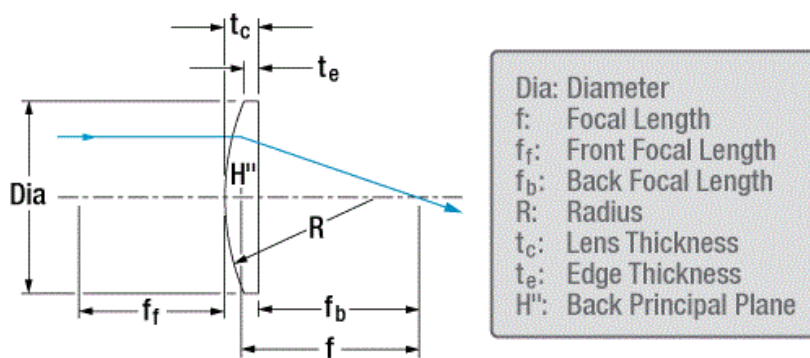


Figura 1.4.2 Esempio di lente con i suoi punti e distanze di riferimento [11]

Dalla figura 1.4.2 si può notare, come detto in precedenza, che la lunghezza focale f corrisponde alla distanza tra il punto focale e un qualcosa di diverso dal centro della lente, in questo caso il piano principale posteriore H'' .

Un'ultima considerazione: quanto visto finora ha sempre fatto riferimento a lenti convergenti (o convesse), visto che è effettivamente il tipo di lenti che si andranno ad utilizzare in seguito, ma se si guardano le lenti divergenti (o concave) esse hanno le distanze ed i punti di riferimento discussi in precedenza posizionati diversamente visto che i raggi si comportano diversamente con questo tipo di lenti.

1.5 Grandezze radiometriche e fotometriche

Può tornare utile vedere brevemente le grandezze radiometriche del S.I. visto che in seguito verranno usate nella maggior parte delle misure; insieme ad esse vengono presentate anche le grandezze fotometriche corrispondenti, perché alcuni datasheet o strumenti potrebbero fornire solamente questo tipo di dati. Si possono definire [12]:

- Radiometria = è il rilevamento e la misurazione delle onde luminose nella parte ottica dello spettro elettromagnetico, la quale si suddivide in luce ultravioletta, visibile e infrarossa.
- Fotometria = radiometria che viene ponderata per la tipica risposta dell'occhio umano (approssimativamente 380-750 nm); rappresenta quindi uno speciale sottoinsieme della radiometria.

La tabella in figura 1.5.1 riassume le più comuni quantità radiometriche e fotometriche.

Radiometric			Photometric		
Quantity	Symbol	Units	Quantity	Symbol	Units
Radiant Power	Φ_e	W	Luminous Flux	Φ_v	lumens (lm)
Radiant Intensity	I_e	W/sr	Luminous Intensity	I_v	lm/sr
Irradiance	E_e	W/m ²	Illuminance	E_v	lm/m ²
Radiance	L_e	W/m ² ·sr	Luminance	L_v	lm/m ² ·sr

"e" = "energetic"

"v" = "visual"

Figura 1.5.1 Principali quantità radiometriche e fotometriche [12]

Grandezze radiometriche:

Flusso (o potenza) radiante = Il flusso radiante Φ_e è definito come la quantità di energia radiante emessa da una sorgente nell'unità di tempo:

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt} \quad (1.5.1)$$

La sua unità di misura è il Watt [W] (1 W = 1 J/s), per questo il flusso radiante è anche noto come potenza radiante. Il flusso radiante è molto importante, infatti su di esso si basano le definizioni di tutte le altre grandezze radiometriche [13].

Intensità radiante = Se si vuole definire l'intensità radiante I_e , è necessario per forza introdurre il concetto di angolo solido. Si consideri la sfera di figura 1.5.2.

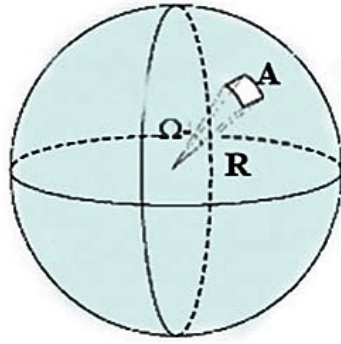


Figura 1.5.2 Rappresentazione di angolo solido [13]

L'angolo solido Ω può essere definito come il rapporto tra l'area di una parte di una sfera A e il quadrato del raggio R della stessa sfera:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} . \quad (1.5.2)$$

L'angolo solido è adimensionale, tuttavia gli è stata assegnata un'unità denominata steradiano [sr]. Una sfera intera copre un angolo solido di 4π .

Ora, si posiziona una sorgente puntiforme al centro della sfera. L'intensità radiante è definita come il flusso radiante emesso dalla sorgente per unità di angolo solido in una data direzione:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} . \quad (1.5.3)$$

La sua unità di misura è Watt su steradiano [W/sr]. Per come è definita l'intensità radiante è indipendente dalla distanza dalla sorgente [13].

Irradianza = L'irradianza E_e è definita come il rapporto tra il flusso radiante incidente su una superficie e la superficie stessa:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} . \quad (1.5.4)$$

La sua unità di misura è Watt su metro quadro [W/m²]. L'equazione (1.5.4) si riferisce a un elemento di superficie dA_{norm} che è perpendicolare alla direzione del raggio, dove quindi l'irradianza è massimizzata. Tuttavia, in generale, la superficie potrebbe essere orientata con qualsiasi angolo rispetto alla direzione del raggio incidente, come si può vedere nella figura 1.5.3, per questo si può generalizzare l'equazione precedente moltiplicandola per il termine $\cos \theta$, dove θ è l'angolo tra la direzione del raggio e la normale dell'elemento d'area [13]:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \cos \theta . \quad (1.5.5)$$

Va notato che, a differenza dell'intensità radiante, l'irradianza varia con il quadrato della distanza dalla sorgente.

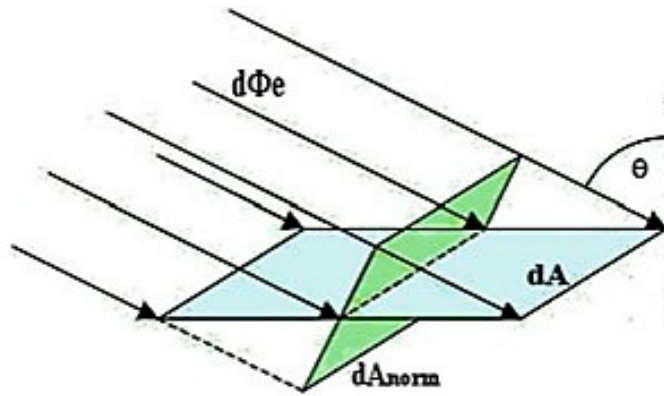


Figura 1.5.3 Raggio che incide con un certo angolo sull'elemento di area dA [13]

Radianza = Si consideri un cono di radiazione che entra o esce da una superficie come mostrato in figura 1.5.4.

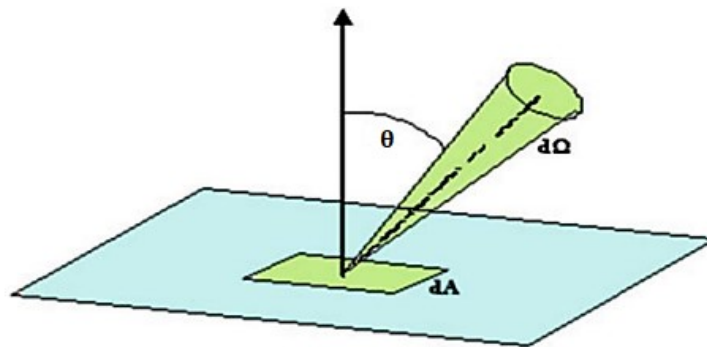


Figura 1.5.4 Cono di radiazione che esce da una superficie [13]

La radianza è definita come il flusso radiante per unità di angolo solido per unità di area proiettata perpendicolare alla direzione del fascio:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (1.5.6)$$

L'unità di misura è Watt su steradiante su metro quadro $[W/sr \cdot m^2]$. Nel caso particolare in cui la superficie stessa sia perpendicolare alla direzione specificata, l'equazione precedente si può semplificare in [13]:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA} \quad (1.5.7)$$

Si può dire quindi che questa quantità riesca a descrivere l'ammontare di luce che cade su un certo angolo solido e che viene emessa, passa attraverso oppure è riflessa da una certa superficie.

Grandezze fotometriche:

Per passare alle grandezze fotometriche occorre tener conto di come l'occhio umano percepisce la radiazione ottica. In figura 1.5.5 è mostrata normalizzata l'Eye Sensitivity Function anzi, più in particolare, la Photopic Eye Sensitivity Function $V(\lambda)$ cioè la funzione che rappresenta la sensibilità tipica dell'occhio umano allo spettro ottico durante la visione fotopica (= diurna).

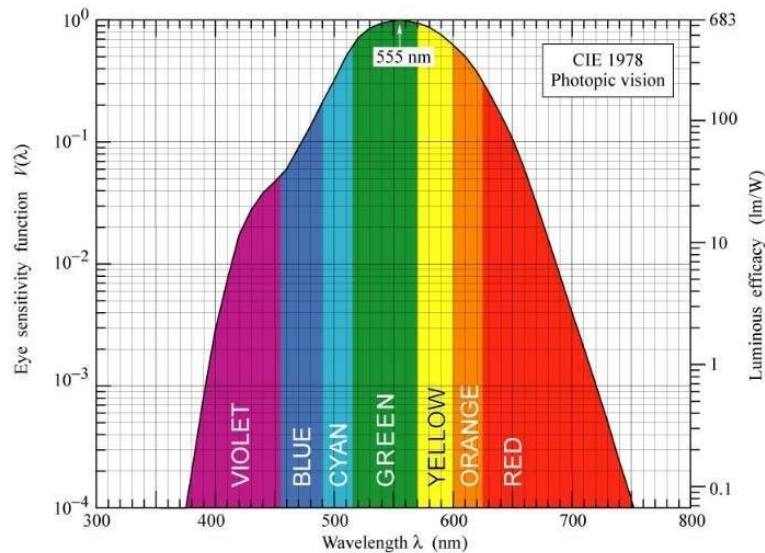


Figura 1.5.5 Photopic Eye Sensitivity Function $V(\lambda)$ [14]

Si nota che non è possibile utilizzare le stesse grandezze usate in radiometria, perché la luce da tenere in considerazione non è tutta quella emessa dalla sorgente ma solamente quella all'interno del range 380-780 nm, quindi vanno definite nuove grandezze.

In generale per passare da una grandezza radiometrica X_e ad una fotometrica X_v matematicamente si ha:

$$X_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda , \quad (1.5.8)$$

in cui K_m è una costante riferita al massimo della curva vista in figura 1.5.5 e che fissa una relazione tra radiometria e fotometria [13].

Flusso luminoso = Il flusso luminoso è uguale al flusso radiante dopo la convoluzione con la funzione $V(\lambda)$, ovvero, lunghezza d'onda per lunghezza d'onda il flusso radiante viene moltiplicato per $V(\lambda)$ e quindi integrato nell'intervallo visibile 380-780 nm secondo l'equazione:

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad , \quad (1.5.9)$$

questa grandezza ha un'unità di misura speciale, il lumen [lm], che storicamente è stata definita come 1/683 W del flusso radiante di una sorgente monocromatica a 555 nm in aria; ovvero, in altri termini, una sorgente monocromatica a 555 nm che emette 1 W di potenza radiante produce un flusso luminoso di 683 lm. A causa di questa definizione, la costante K_m ha il valore di 683 lm/W, corrispondente alla massima efficacia spettrale della curva fotopica $V(\lambda)$ quando questa non è normalizzata al suo picco. Come quello radiante, il flusso luminoso è di base una potenza, cioè è energia luminosa irradiata da una sorgente per unità di tempo [13]. Inoltre, sempre come quello radiante, il flusso luminoso è molto importante perché su di esso si basano le definizioni di tutte le altre grandezze fotometriche.

Intensità luminosa = L'intensità luminosa è l'intensità radiante ponderata su $V(\lambda)$:

$$I_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} I_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad , \quad (1.5.10)$$

ed è definita come flusso luminoso emesso per unità di angolo solido in una certa direzione:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad . \quad (1.5.11)$$

La sua unità di misura è la candela [cd] che evidentemente è pari a [lm/sr] anche se, mentre nel caso radiometrico il Watt è un'unità di misura fondamentale del Sistema Internazionale di Unità SI, nella fotometria è la candela ad esserla, quindi sarebbe più giusto dire che è il lumen ad essere pari a [cd·sr]. L'intensità luminosa descrive come la luce emessa da una sorgente è distribuita nello spazio, quindi se si rappresentano tutti i valori di intensità in uscita dalla sorgente in tutte le direzioni come vettori, la superficie che formano definisce un cosiddetto solido fotometrico [13]. Infine, per come è definita l'intensità luminosa è indipendente dalla distanza dalla sorgente, come l'intensità radiante.

Illuminamento = L'illuminamento è l'equivalente fotometrico dell'irradianza, ovvero è la densità del flusso radiante ponderata su $V(\lambda)$:

$$E_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad , \quad (1.5.12)$$

e, come è stato ricavato nella rispettiva grandezza radiometrica, è dato dal flusso luminoso per unità di area ricevente perpendicolare:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \cos \theta . \quad (1.5.13)$$

La sua unità di misura è il lux [lx] che evidentemente è pari a [lm/m²] [13]. Va notato che, come l'irradianza, l'illuminamento varia con il quadrato della distanza dalla sorgente.

Luminanza = La relazione tra luminanza e radianza è sempre data da:

$$L_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_v(\lambda) V(\lambda) d\lambda , \quad (1.5.14)$$

Poiché la luminanza è il flusso luminoso per unità di angolo solido per unità di area proiettata perpendicolare alla direzione del fascio:

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta} . \quad (1.5.15)$$

La sua unità di misura è candele su metro quadro [cd/m²] [13]. Come visto nella radianza, nel caso particolare in cui la superficie stessa sia perpendicolare alla direzione specificata, l'equazione precedente si semplifica in:

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA} . \quad (1.5.16)$$

Proprio come la radianza, si può dire che questa quantità riesca a descrivere l'ammontare di luce che cade su un certo angolo solido e che viene emessa, passa attraverso oppure è riflessa da una certa superficie, ora ponderata sulla funzione di sensibilità fotopica dell'occhio umano.

1.6 Etendue

La luce mentre viaggia in un sistema ottico occupa una determinata area e possiede una certa estensione angolare [15]. L'etendue è una proprietà geometrica che quantifica le dimensioni che la luce occupa spazialmente e angolarmente; quantifica anche, in qualche modo, la capacità di trasmissione del sistema ottico per i sistemi in cui la luce deve essere accoppiata. Matematicamente, è il prodotto dell'area di una sorgente o di una pupilla e l'angolo solido che sottende la luce emessa o ricevuta da quell'area. La figura 1.6.1 mostra una sorgente con area A che emette simmetricamente con un angolo θ , in un mezzo di indice di rifrazione n ; in tal caso l'etendue si può scrivere come:

$$\varepsilon = \pi A n^2 \sin^2 \theta \quad (1.6.1)$$

e di solito la si trova è espressa in [m²] [16], anche se a volte può capitare di trovarla espressa in [m²sr].

Quando si conosce l'apertura numerica di un dispositivo, si ha un'indicazione molto chiara anche della sua etendue; infatti, nella definizione data in (1.3.9) per le fibre ottiche si aveva trascurato l'indice di rifrazione n del mezzo, in quanto generalmente si parla di aria, ma tenendone conto e osservando (1.3.8), l'apertura numerica si può riscrivere in maniera più generale come:

$$NA = n \sin \alpha \quad (1.6.2)$$

e si nota allora che nell'equazione dell'etendue (dove l'angolo α è chiamato angolo θ) si ha:

$$\varepsilon = \pi A \cdot NA^2 \quad (1.6.3)$$

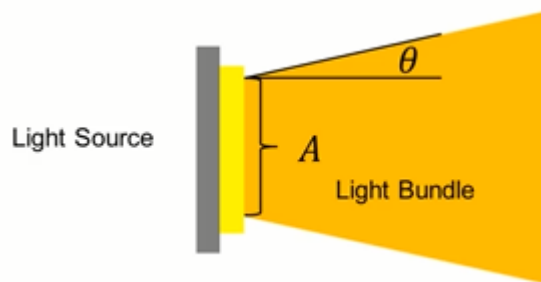


Figura 1.6.1 Sorgente di area A che emette simmetricamente con angolo θ , in un mezzo di indice di rifrazione n [16]

L'etendue a volte è chiamata anche Estensione Geometrica e indicata con la lettera G , ma si possono trovare anche i termini Estensione Ottica e Invariante Ottica [17].

Ciò che rende veramente importante l'etendue è quanto segue: si ha, per esempio, una sorgente che emette luce con una certa etendue; quando questa luce si propaga nello spazio, anche attraverso un sistema ottico, la sua etendue può rimanere la stessa o al massimo può aumentare, ma mai diminuire.

Quanto appena detto può essere dimostrato ed è noto come “Legge di conservazione dell'etendue” ed è diretta conseguenza dell'uso di elementi ottici imperfetti e del secondo principio della termodinamica. Più precisamente, l'etendue:

- si conserva se il sistema ottico è perfetto;
- aumenta se il sistema ottico è imperfetto (diffusioni, dispersioni, aberrazioni e diffrazioni non intenzionali o intenzionali, ...);
- non diminuisce mai .

Quest'ultimo aspetto è il più importante [16]. Si pensi ora ad un sistema formato da un LED, una lente e una fibra ottica; ognuno di questi tre elementi ha una propria etendue, il problema è che chi possiede quella inferiore costituisce un limite per gli altri, che si può chiamare per esempio ε_{lim} . Questo limite può portare a conseguenze opposte ma sempre rilevanti, come si può osservare nelle seguenti situazioni:

1. La fibra ottica è l'elemento con l'etendue più bassa, ε_{lim} . LED e lente hanno quindi un'etendue superiore (e uguale tra loro, per ipotesi) che, come detto in precedenza, non può diminuire per raggiungere ε_{lim} , ciò significa che parte della luce che emettono e trasmettono viene per forza di cose persa.
2. Al contrario di prima, il LED è l'elemento con l'etendue più bassa, ε_{lim} . Lente e fibra ottica hanno quindi un'etendue superiore (e uguale tra loro, per ipotesi) e per questo tutta la luce emessa dal LED può riuscire a finire dentro alla lente e alla fibra ottica tuttavia, in questo modo, si hanno degli elementi ottici sovradimensionati rispetto alla sorgente.

A questo punto risulta chiaro ed evidente che il caso ottimale si ha quando tutti gli elementi sono “accoppiati” nell'etendue, cioè hanno la stessa etendue [17].

Quanto appena detto in materia di etendue andrà ricordato nel momento in cui si andranno a sviluppare i sistemi di interesse: non si potrà pretendere che prendendo un certo LED che emette con una certa etendue si riesca ad immettere tutta la sua luce all'interno di un'etendue inferiore, indipendentemente dal tipo di lente che si andrà ad usare e dalla posizione della stessa.

Capitolo 2

LED

In questo capitolo vengono trattati alcuni aspetti riguardanti i LED. Per prima cosa occorre fare chiarezza sul perché quando qui si parla di sistema multiwavelength si intende un sistema con LED diversi che emettono luce di colore diverso; per fare questo viene discusso il legame che c'è tra colore, lunghezza d'onda, bandgap e materiali che costituiscono il LED, senza però entrare troppo nei dettagli dei meccanismi di funzionamento di LED e diagrammi a bande. È poi necessario illustrare alcuni dei meccanismi di non idealità propri dei LED, in particolare quelli che più incideranno nello sviluppo di questo sistema e di cui quindi si terrà conto, ovvero Blue-shift e Red-shift. In seguito, vengono mostrati alcuni modelli di emissione dei LED, così da avere chiaro con quali distribuzioni angolari generalmente i LED emettono. Infine, viene presentata la lista dei LED che verranno utilizzati nei vari tipi di sistema e i motivi che hanno portato alla scelta di tali LED.

2.1 Legame tra colore, lunghezza d'onda, bandgap e materiali del LED

Un LED non emette luce da un filo incandescente o da un gas, bensì è un dispositivo allo stato solido che emette luce da un materiale semiconduttore grazie all'elettroluminescenza. Nei LED, inizialmente, elettroni e lacune vengono separati drogando il materiale per formare una giunzione p-n, composta da zone con diversa concentrazione di elettroni e lacune. Nel layer drogato di tipo p ci sono le lacune, cioè posti vacanti di elettroni, mentre nel layer drogato di tipo n ci sono elettroni liberi che possono muoversi al suo interno. Nel momento in cui si attiva il flusso di elettroni dal layer di tipo n a quello di tipo p, gli elettroni si ricombinano in maniera radiativa con le lacune, come si osserva in figura 2.1.1, e mentre ciò avviene è rilasciata una certa quantità di energia, dipendente dal bandgap, sotto forma di fotoni (cioè di luce). Prende il nome di "bandgap" (o anche "energy gap") la differenza di energia tra la parte superiore della banda di valenza e la parte inferiore della banda di conduzione posseduta dai materiali che danno la giunzione p-n.

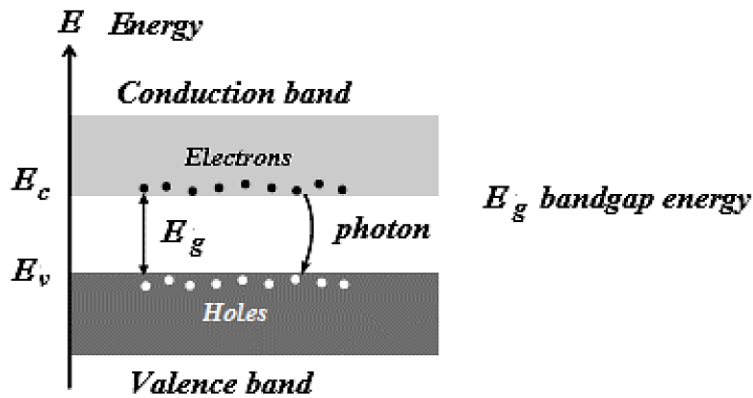


Figura 2.1.1 Ricombinazione radiativa con l'emissione di un fotone [18]

L'emissione di fotoni dipende anche dal tipo di bandgap, diretto o indiretto. Esempi di bandgap diretti e indiretti di semiconduttori vengono presentati in figura 2.1.2. Due momenti cristallini, e i corrispondenti vettori k , caratterizzano lo stato di energia minima della banda di conduzione e quella massima della banda di valenza. Se nel materiale questi due vettori k sono uguali, si ha un gap diretto; viceversa, se sono diversi, si ha un gap indiretto. Quando il bandgap è diretto, un elettrone riesce a ricombinarsi con una lacuna con lo stesso momento, emettendo direttamente un fotone; quest'ultimo ha una lunghezza d'onda relativamente grande e quindi un numero d'onda trascurabile rispetto ai vettori d'onda k del reticolo, pertanto in questa situazione la conservazione del momento totale del cristallo è facilmente soddisfatta. Quando invece il gap è indiretto, la probabilità di emissione di un fotone è minore, poiché gli elettroni devono anche necessariamente trasferire momento ai fononi del reticolo cristallino (oppure riceverlo dagli stessi) per avere la conservazione del momento totale del cristallo, quindi, ovviamente, non si otterranno sorgenti luminose efficienti costruendole con semiconduttori che hanno tale caratteristica [18].

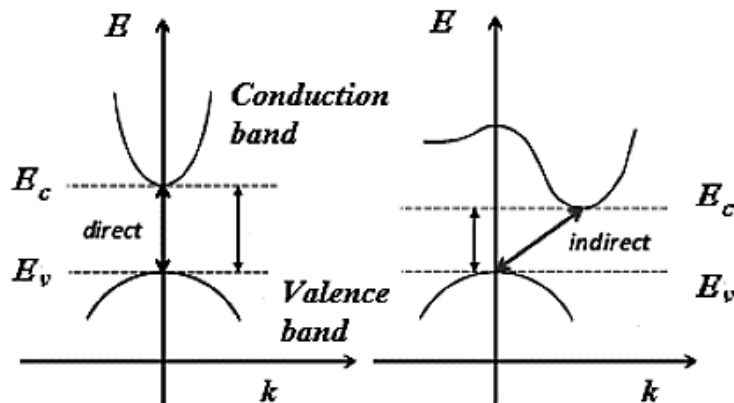


Figura 2.1.2 Esempi di bandgap di semiconduttori: a) bandgap diretto, b) bandgap indiretto [18]

Ora, concentrandosi di più sui fotoni, come già detto, quando un elettrone passa dalla banda di conduzione a quella di valenza viene rilasciata un'energia attraverso l'emissione di un fotone; questa energia è idealmente pari a quella del bandgap, con il valore di quest'ultimo che dipende principalmente dai materiali che costituiscono quel determinato LED, quindi se si vuole un bandgap diverso si deve andare ad utilizzare un LED diverso, costituito da altri materiali; detto questo, è noto che energia E e lunghezza d'onda λ del fotone sono legate dalla Legge di Planck:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} , \quad (2.1.1)$$

dove ν è la frequenza del fotone, h è la costante di Planck e c è la velocità della luce nel vuoto. Ricordando che una certa lunghezza d'onda nello spettro luminoso corrisponde ad un colore, si può arrivare alla seguente conclusione: un certo LED emette luce di un determinato colore, quindi con una determinata lunghezza d'onda, questo perché ha un determinato bandgap dovuto ai materiali di cui è costituito; questo vale evidentemente anche quando si ha un intero sistema, cioè un “sistema di illuminazione multicolore” è ottenuto nel momento in cui si realizza un “sistema di illuminazione multiwavelength”, che a sua volta è ottenuto nel momento in cui si utilizza un set di LED con bandgap diversi, ognuno costituito da certi materiali.

In verità, parlando di semiconduttori con gap diretti, gli elettroni che vanno dalla banda di conduzione a quella di valenza non lo fanno esclusivamente passando dal livello energetico corrispondente al punto più basso della prima a quello corrispondente al punto più alto della seconda, ed è proprio per questo motivo che lo spettro di emissione dei LED non è formato da una singola lunghezza d'onda ma da un'intera banda. Si prenda in considerazione un fotone con frequenza ν : il suo momento è trascurabile, quindi l'elettrone non deve cambiare il proprio momento durante la transizione, cioè essa deve necessariamente essere “verticale”; esisterà solo un numero limitato di stati congiunti con energia $h\nu$, che viene rappresentato dalla densità di stati congiunti in funzione dell'energia $\rho_j(E = h\nu)$. Allo stesso tempo i portatori di carica sono distribuiti nelle bande in accordo con la statistica di Boltzmann $f_B(E)$. L'intensità di luce emessa in funzione dell'energia $E = h\nu$, cioè lo spettro del LED, è proporzionale al prodotto dei due termini appena visti, come si vede in figura 2.1.3.

Ovviamente lo spettro del LED può essere rappresentato anche in funzione della lunghezza d'onda visto che, come già detto, energia e lunghezza d'onda sono legate dalla Legge di Planck. In figura 2.1.4.a si vede lo spettro di un LED in funzione dell'energia mentre in 2.1.4.b lo stesso spettro è in funzione della lunghezza d'onda.

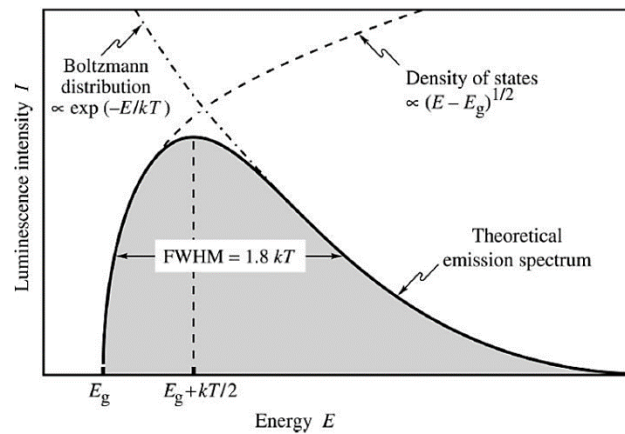


Figura 2.1.3 Spettro di emissione di un LED in funzione dell'energia di fotone [19]

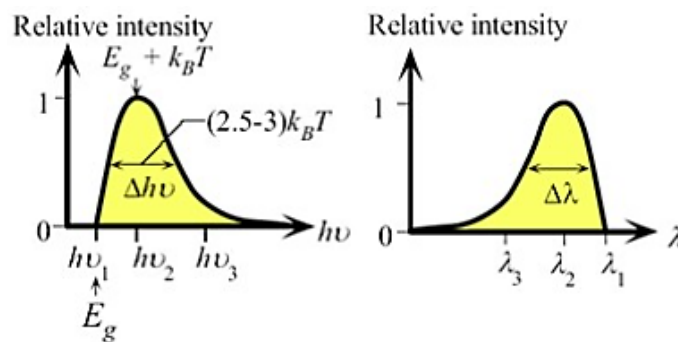


Figura 2.1.4 Spettro di un LED in funzione di: a) energia, b) lunghezza d'onda [20]

Quanto appena visto è corretto a livello teorico, ma a livello pratico la situazione è leggermente differente: i LED reali hanno uno spettro che solitamente ha una forma più a campana (gaussiana) rispetto a quelli appena visti, questo per la non perfetta uniformità nel materiale. Un esempio di questo è lo spettro in figura 2.1.5 appartenente al LED Roithner a 420 nm SMB1N-420H, il quale è uno dei LED che, come verrà mostrato, sono stati acquistati ed utilizzati.

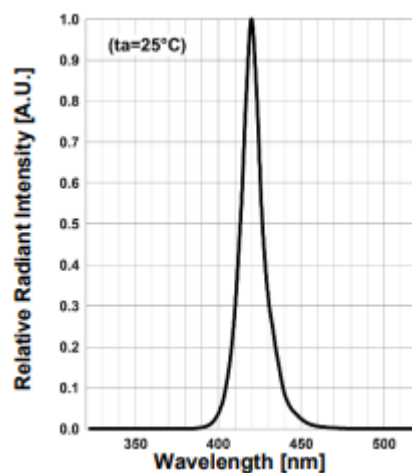


Figura 2.1.5 Spettro del LED Roithner a 420 nm SMB1N-420H [21]

2.2 Meccanismi di non idealità considerevoli

I LED possiedono numerosi meccanismi di non idealità che causano un peggioramento dell'efficienza complessiva e modificano lo spettro ideale di quei LED; alcuni di essi, quali per esempio la non idealità della curva I-V, le resistenze e i diodi parassiti, la carrier escape sono presenti in ogni caso, una volta scelti determinati LED, e quindi l'utente utilizzatore non può fare molto per evitarli. Diversamente, ci sono altri meccanismi, come il Blue-shift e il Red-shift, che avvengono proporzionalmente al modo in cui lavorano i LED e per questo l'utente può riuscire a limitarli, ragion per cui saranno proprio questi i meccanismi di cui si terrà conto nello sviluppo dei sistemi di interesse.

Il primo meccanismo discusso è il Blue-shift, che porta questo nome perché è letteralmente uno spostamento verso il blu del picco di emissione, cioè verso lunghezze d'onda inferiori; esso è legato alla corrente iniettata al LED. Il motivo principale di questo meccanismo è che all'aumentare della corrente iniettata, aumenta la quantità di cariche che riempiono la quantum well del dispositivo, con la conseguenza che i livelli energetici si riempiono di elettroni e lacune, aumentando così la differenza di energia tra il livello più basso nella banda di conduzione e quello più alto nella banda di valenza ovvero la differenza di energia tra i due livelli di ricombinazione; alla fine, essendo l'energia dei fotoni $E \propto \frac{1}{\lambda}$, la lunghezza d'onda diminuisce. Nella figura 2.2.1.a si vede quanto appena descritto; inoltre, si nota anche la FWHM ("larghezza a metà altezza") aumentare contemporaneamente; nella figura 2.2.1.b si ha direttamente in nero la lunghezza d'onda del picco vs la corrente iniettata e in blu la FWHM vs la corrente iniettata.

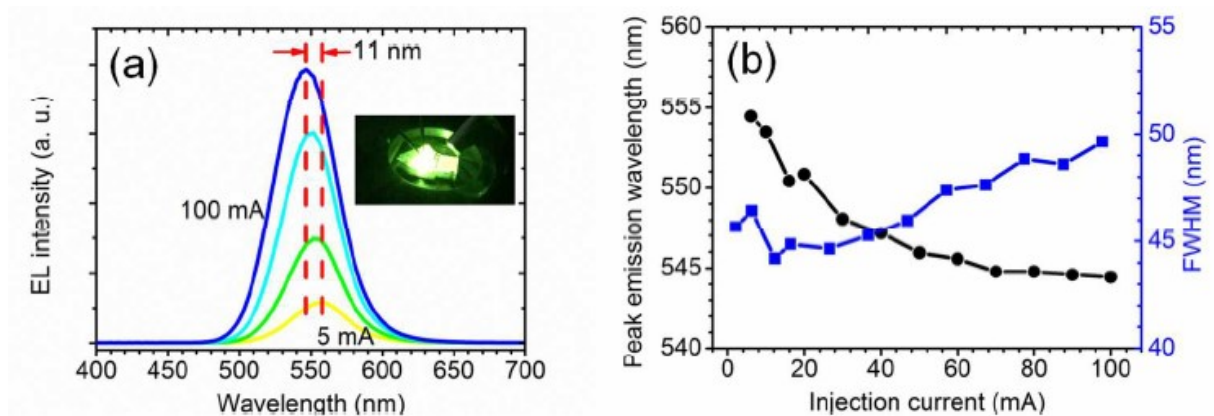


Figura 2.2.1 a) spettro di emissione di un LED per vari valori di corrente iniettata; b) lunghezza d'onda del picco e FWHM vs corrente iniettata [22]

Il secondo meccanismo discusso è il Red-shift, che porta questo nome perché si tratta di uno spostamento verso il rosso del picco di emissione, cioè verso lunghezze d'onda superiori; esso è legato alla temperatura a cui lavora il LED. Per dare una spiegazione a questo fenomeno, occorre prima dire che nella maggior parte dei semiconduttori la dipendenza del bandgap E_g dalla temperatura è descritta dalla formula di Varshni:

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} , \quad (2.2.1)$$

con $E_g(0K)$ valore del bandgap a 0K mentre α e β parametri caratteristici del materiale; a questo punto, è evidente che un aumento di temperatura porta ad una diminuzione del bandgap e in questo modo diminuisce l'energia dei fotoni emessi (e l'intensità luminosa) e di conseguenza, sempre per la Legge di Planck dove $E \propto \frac{1}{\lambda}$, la lunghezza d'onda aumenta. La temperatura a cui lavora un LED dipende certamente dall'ambiente in cui si trova, ma un aspetto ancora più importante da considerare è che durante il suo normale funzionamento si presenta un inevitabile e naturale surriscaldamento, dovuto a vari fenomeni dissipativi all'interno di esso. In figura 2.2.2 si può osservare il Red-shift con lo spettro di un LED normalizzato alla temperatura di 25° C il cui picco varia sia in altezza che in lunghezza d'onda con la temperatura.

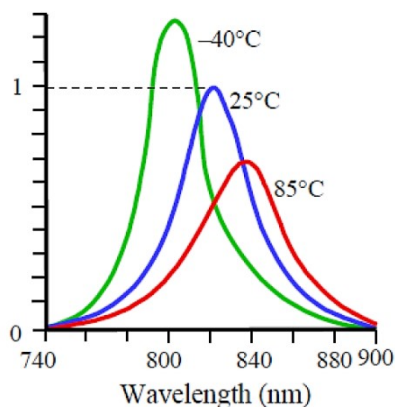


Figura 2.2.2 Esempio di come lo spettro di un LED varia con la temperatura [23]

È chiaro che iniettando molta corrente in un LED si provoca il Blue-shift ma, contemporaneamente, aumentano i fenomeni dissipativi che causano un aumento di temperatura e conseguentemente il Red-Shift, quindi i due meccanismi, alla fine, si compensano parzialmente.

Questi due meccanismi dovranno essere considerati nello sviluppo del sistema e si dovranno attuare delle misure per limitarli, pena uno spettro differente da quello desiderato. Per esempio, per limitare il Blue-shift converrà sempre attenersi alle indicazioni di corrente indicate nei datasheet dei LED, mantenendosi ben al di sotto del valore massimo indicato; per limitare il

Red-shift, invece, andrà controllato che la dissipazione del calore provocato dai LED sia sufficiente, eventualmente cambiando tipo di PCB e/o aggiungendo dei dissipatori.

2.3 Modelli di emissione dei LED

Una sorgente o una superficie riflettente è detta “Lambertiana” quando si osserva che la distribuzione angolare della sua intensità radiante (o luminosa) segue la Legge del coseno di Lambert, cioè l’intensità varia secondo il coseno dell’angolo rispetto alla normale della sorgente o della superficie; per esempio, si avrà il 100 % di intensità a 0° , mentre il 50% a 60° . Questo tipo di distribuzione può essere osservato in figura 2.3.1.

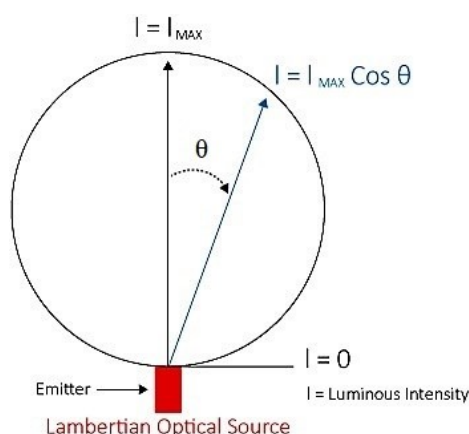


Figura 2.3.1 Emissione con distribuzione angolare Lambertiana [24]

Nella figura 2.3.1 si può chiamare “angolo totale” l’angolo che si ottiene rappresentando anche a sinistra della normale θ , cioè 2θ . Tipicamente nei datasheet dei LED si trova la voce “viewing angle” che indica l’angolo totale nel quale l’intensità è maggiore o uguale al 50% di quella massima; chiaramente, se l’emissione è perfettamente Lambertiana il viewing angle è esattamente 120° , infatti, come già detto in precedenza, si raggiunge il 50% dell’intensità in corrispondenza di $\theta = 60^\circ$, che è equivalente a dire $2\theta = 120^\circ$. I LED piani dotati di sola ottica primaria sono comunemente considerati sorgenti Lambertiane, infatti hanno una distribuzione angolare vicina a quella ideale Lambertiana, con viewing angle sempre intorno ai 120° . Invece, si possono ottenere viewing angle superiori oppure inferiori ai 120° se i LED sono dotati anche di ottica secondaria.

Inoltre, realizzando LED di forma non piana, è possibile ottenere distribuzioni molto diverse da quella Lambertiana. Per esempio, con LED di forma emisferica, con la regione che emette luce posta al centro di esso, si ottiene un’emissione con distribuzione angolare isotropica;

oppure, se il LED ha forma parabolica si ottiene una distribuzione angolare fortemente diretta. Comunque, va detto che questi due tipi di LED sono più difficili da fabbricare rispetto a quelli piani [25]. Nella figura 2.3.2 si osservano i vari tipi di LED e le corrispondenti distribuzioni.

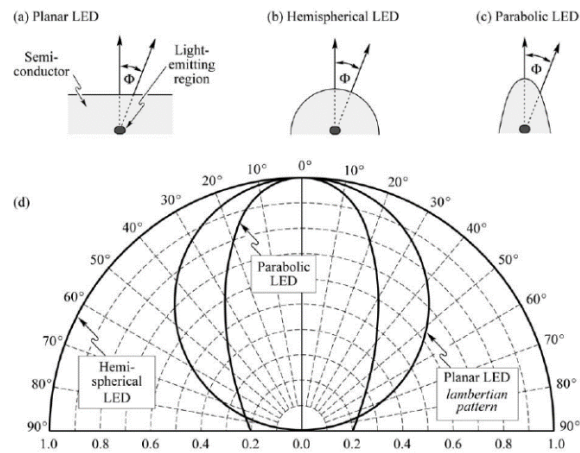


Figura 2.3.2 Varii tipi di LED e corrispondenti distribuzioni [25]

2.4 Processo di selezione dei LED da utilizzare

Per il processo di selezione è conveniente fermarsi ad un numero di produttori limitato, altrimenti la scelta di LED utilizzabili diventerebbe troppo vasta e sarebbe difficile fare un confronto ed arrivare ad una lista in tempi ragionevoli. I produttori selezionati sono 5: Osram, Lumileds, Roithner LaserTechnik, Cree Led, LITE-ON.

Per realizzare i vari tipi di sistema, i LED selezionati devono rispettare determinati requisiti. Il primo requisito, innanzitutto, è avere una serie di LED tale da coprire la banda di lunghezze d'onda da circa 300 nm a circa 1000 nm, con salti di circa 30 nm tra un LED e l'altro. A questo scopo, per ogni LED, viene controllata nel datasheet la lunghezza d'onda dominante poiché essa rappresenta la lunghezza d'onda che viene percepita osservando quel LED, che è un'informazione più utile rispetto a quella sulla lunghezza d'onda di picco, almeno per il fine del sistema da realizzare.

Una volta presi dei LED per determinate lunghezze d'onda, il requisito successivo è che abbiano un rapporto potenza radiante/area elevato, valutando eventualmente, in caso di indecisione durante un confronto tra più LED con la stessa lunghezza d'onda, se sia meglio sacrificare il valore del rapporto in favore di una potenza particolarmente elevata o di un'area molto piccola possedute da un LED in particolare. È utile occupare un'area la più piccola possibile con ogni singolo LED, in modo che anche l'area complessivamente occupata da tutti

i LED sia piccola e insieme ad essa anche le dimensioni totali del sistema ottico da utilizzare. Invece, il motivo che porta a volere maggiore potenza radiante possibile per ogni lunghezza d'onda selezionata è abbastanza scontato: al di là dello scopo per cui il sistema verrà utilizzato e l'efficienza che si riuscirà ad ottenere, ciò che si cerca di realizzare è pur sempre una sorta di sistema di illuminazione (e miscelazione), quindi è lecito pensare che sia sempre meglio partire con LED in grado di sviluppare una potenza radiante la più grande possibile, che in un secondo tempo eventualmente verrà limitata agendo sui parametri elettrici in caso essa risulti eccessiva; rimanendo in questo ambito, va notato che la potenza radiante tipica indicata nei datasheet è ottenuta per un determinato valore di corrente, che varia da LED a LED, quindi occorre fare attenzione nel momento in cui si fanno confronti di potenza tra LED diversi.

Un'area piccola fa pensare correttamente anche al fatto che in questo modo si riduce l'etendue e quindi si migliora l'efficienza di accoppiamento con sistema ottico e fibra; tuttavia, sempre a riguardo dell'etendue, non in tutti i tipi di sistema che si andranno a realizzare sarà meglio avere un viewing angle il più piccolo possibile, anzi in un certo tipo sarà un requisito averlo grande, quindi, operando un compromesso, la maggior parte dei LED scelti ha un viewing angle intorno ai 120° , con alcune eccezioni al di sopra e al di sotto ($\sim 160^\circ$ e $\sim 70^\circ$).

Nel Capitolo 4 verrà presentato un certo tipo di sistema basato sugli specchi diecrici, oggetti quest'ultimi che generano un ulteriore requisito per i LED: degli specchi si vedranno i dettagli, ma già preliminarmente, prevedendo il loro utilizzo, si può dire che avendo essi determinate lunghezze d'onda di taglio, è requisito che le lunghezze d'onda dei LED non si trovino troppo vicini ad esse, altrimenti ci si ritroverebbe con parte dello spettro emesso che non avrebbe il comportamento desiderato.

L'ultimo aspetto fondamentale da considerare è la disponibilità: alcuni dei LED inizialmente selezionati sono stati tolti e rimpiazzati in fase di acquisto, per la non disponibilità in tempi inferiori all'anno o, in altri casi, per l'obbligo di acquisto di una certa quantità minima. Infatti, dopo tutti i confronti fatti, la lista mostrerebbe LED provenienti da 4 produttori, ma considerando appunto anche la disponibilità il numero scende a 3 e oltretutto si hanno alcuni "buchi di lunghezze d'onda", nel senso che alcuni LED non disponibili non presentano proprio alcuna alternativa cercando tra gli altri produttori selezionati. La tabella 2.4.1 contiene la lista dei LED acquistati che verranno utilizzati sia per le simulazioni fatte a PC che per le prove pratiche eseguite in seguito: la prima colonna riporta la lunghezza d'onda dominante, la seconda le dimensioni del chip, la terza il viewing angle, la quarta la potenza radiante tipica e tra parentesi la corrente con la quale è ottenuta, la quinta il produttore e il nome del LED.

λ [nm]	Dim. [mmxmm]	θ [°]	O.P. [mW]	Produttore e nome
275	3.6 x 3.6	120	42 (350mA)	Osram, OSOLON UV 3636 - SU CULDN1.VC
365	5 x 5.2	126	500 (500mA)	Roithner, SMB1N - 365V
395	5 x 5.2	126	750 (500mA)	Roithner, SMB1N - 395V
420	5 x 5.2	128	420 (350mA)	Roithner, SMB1N - 420H
453	1.1 x 1.1	120	1140 (700mA)	Osram, OSOLON Pure 1010 - GD VJLPE1.14
470	3 x 3	120	628 (350mA)	Osram, OSCONIQ P 3030 - GB QSSPA1.13
490	1.1 x 1.1	120	588 (700mA)	Osram, OSOLON Pure 1010 - GC VJLPE1.13
525	1.1 x 1.1	120	442 (700mA)	Osram, OSOLON Pure 1010 - GT VJLPE1.13
560	3 x 3	120	1080 (1000mA)	Osram, OSTAR Projection Compact - KP CSLNM1.F1
570	1.1 x 1.1	120	641 (700mA)	Osram, OSOLON Pure 1010 - GG VJLPE1.F3
590	5 x 5.2	128	120 (350mA)	Roithner, SMB1N - 590
621	1.1 x 1.1	120	310 (700mA)	Osram, OSOLON Pure 1010 - GR VJLPE1.F3
640	3 x 3	120	1045 (700mA)	Osram, OSOLON Square - GH CSSRM4.24
660	2 x 2	162	380 (350mA)	Lumileds, LUXEON C Color Line- Deep Red
680	5 x 5.2	128	520 (600mA)	Roithner, SMB1N - 680D
700	5 x 5.2	130	120 (500mA)	Roithner, SMB1N - 700
730	2 x 2	162	340 (350mA)	Lumileds, LUXEON C Color Line - Far Red
760	5 x 5.2	128	400 (800mA)	Roithner, SMB1N - 760D
810	5 x 5.2	126	560 (800mA)	Roithner, SMB1N - 810D
850	1.6 x 1.6	70	1150 (1000mA)	Osram, OSOLON P1616 Lens - SFH 4171S
880	5 x 5.2	130	610 (800mA)	Roithner, SMB1N - 880D
910	5 x 5.2	126	850 (1000mA)	Roithner, SMB1N - 910D
940	1.6 x 1.6	70	1150 (1000mA)	Osram, OSOLON P1616 Lens - SFH 4181S
980	5 x 5.2	128	400 (800mA)	Roithner, SMB1N - 980D

Tabella 2.4.1 Lista dei LED acquistati ed utilizzati

Utilizzando i dati su lunghezza d'onda dominante e potenza tipica dei 24 LED appena elencati, si può costruire, in maniera molto approssimata, lo spettro complessivo che essi formano; questo è illustrato in figura 2.4.1. Va ricordato che le potenze radianti tipiche indicate nei datasheet sono ottenute per un determinato valore di corrente che varia da LED a LED.

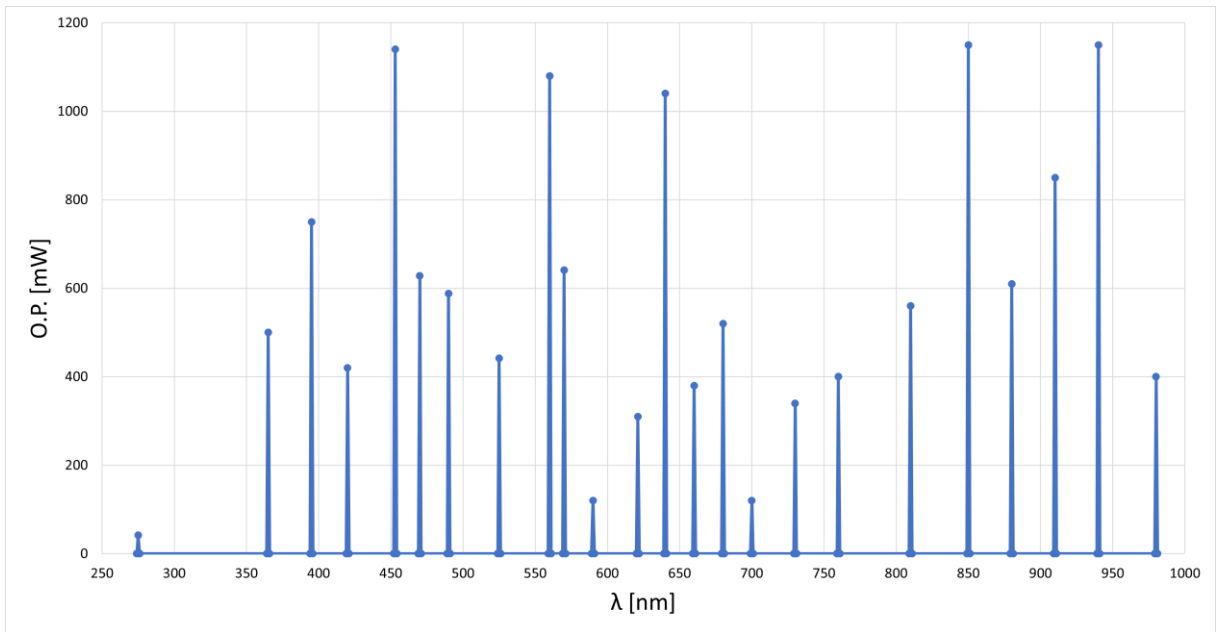


Figura 2.4.1 Spettro complessivo (molto approssimato) che i 24 LED formano

Capitolo 3

Presentazione dei sistemi pensati e introduzione di quelli sviluppati

In questo capitolo vengono, per prima cosa, illustrate le primissime idee avute per realizzare il sistema voluto. In seguito, sono introdotte brevemente le idee che invece poi sono state anche sviluppate e quindi tradotte in progetti di sistema, quanto meno in forma di simulazioni; l'ultima parte del capitolo presenta proprio la metodologia per lo sviluppo e l'analisi dei vari tipi di sistema, oltre che per la comparazione dei risultati ottenuti da essi, con una breve parentesi in cui si parla del software utilizzato.

3.1 Prime idee di sistemi

Come già anticipato, si deve sviluppare e studiare un sistema che immetta in maniera efficiente la radiazione ottica di più LED monocromatici con diversa lunghezza d'onda all'interno di una fibra ottica di diametro ipotetico di 1 mm, in modo tale che sia guidata una radiazione con spettro regolabile risultante dalla somma di diverse componenti quasi-monocromatiche, da usare poi per illuminare ciò che è necessario; inoltre, per rendere il sistema il più utile e versatile possibile, si vorrebbe uno spettro ampio, in modo da coprire la banda da circa 300 a circa 1000 nm, oltre che uniforme ma anche variabile a piacimento. Tali studi e sviluppi proseguono fino a che non viene trovata una soluzione sufficientemente efficiente per realizzarlo in maniera completa fisicamente.

A questo proposito va subito aperta una parentesi per dire che in commercio esistono già dispositivi che hanno più o meno il funzionamento del sistema che si vuole realizzare: essi sono assemblati con già all'interno un certo numero di LED con potenza e lunghezza d'onda configurabili in fase di acquisto, la cui luce viene combinata tramite un sistema di lenti e specchi dicroici e poi portata fuori dal dispositivo con una fibra ottica collegabile ad una porta standard SMA; è chiaro che se l'obiettivo è sviluppare e studiare un certo sistema, allora non ha alcun senso comprarne uno già pronto all'uso e anche facendolo non si avrebbe mai esattamente ciò che si cerca, infatti:

- i LED al suo interno hanno sì potenza e lunghezza d'onda configurabili ma fino ad un certo punto, quindi se si avessero esigenze particolari in questi due parametri potrebbe essere che nessuna delle configurazioni disponibili sia adatta per soddisfarle;
- il numero di LED è configurabile ma comunque limitato ad un massimo e questo potrebbe costituire un problema se si desiderano determinate caratteristiche di spettro che richiedono necessariamente un numero minimo di LED superiore a tale massimo, come per esempio, in questo caso, una banda che vada da circa 300 nm a circa 1000 nm con salti di lunghezza d'onda di circa 30 nm tra un LED e l'altro.

Infine, c'è da aggiungere anche che il costo di questi dispositivi non è certamente contenuto, infatti a seconda di come vengono configurati può raggiungere anche la decina di migliaia di euro.

Chiusa la parentesi, si può passare ora ad esporre le idee avute inizialmente per realizzare il sistema suddetto le quali, a causa dei vari problemi che le caratterizzano, sono state accantonate in favore di quelle illustrate nel paragrafo successivo; oltretutto, in una di quelle che stanno per essere presentate si usa un monocromatore con LED policromatico mentre in un'altra si usano dei laser come sorgenti invece che LED, entrambe cose non conformi rispetto alla richiesta esplicita che il sistema metta insieme la luce proveniente da diversi LED monocromatici.

La prima idea è utilizzare un monocromatore, nonostante sia già stato fatto notare nell'introduzione della tesi che non è una buona soluzione; tale dispositivo è composto da un elemento dispersivo, come un prisma o un reticolo di diffrazione, e due fenditure, una d'ingresso e una d'uscita: la luce di una sorgente policromatica, per esempio quella di un LED bianco, entra nella fenditura d'ingresso e a seconda di come è posizionato l'elemento dispersivo si ha la riflessione e l'uscita attraverso la seconda fenditura della luce di una certa lunghezza d'onda. Quest'idea presenta alcuni vantaggi ma anche molti svantaggi; tra i vantaggi si hanno:

- spettro continuo, nel senso che si riesce ad avere in uscita una qualsiasi lunghezza d'onda compresa tra quelle emesse dalla sorgente, senza alcun "buco";
- una FWHM che varia a seconda della larghezza delle fenditure insieme ad altri parametri;

invece, tra gli svantaggi si hanno:

- il fatto che non si possa avere uno spettro multiwavelength con più lunghezze d'onda arbitrarie presenti contemporaneamente ma solamente una per volta, questo perché alla fenditura di uscita usando l'elemento dispersivo si può avere una sola lunghezza d'onda per volta (o al massimo una ristretta banda attorno ad essa, a seconda di vari fattori);
- per ovviare allo svantaggio precedente si potrebbe allora pensare di alternare le componenti velocemente muovendo altrettanto velocemente l'elemento dispersivo,

tuttavia questo non è possibile, infatti un altro svantaggio di questo sistema è che l'operazione di spostamento dell'elemento dispersivo risulta piuttosto lenta;

- l'intensità con un monocromatore è di difficile regolazione e, cosa ancora più importante, è alquanto bassa, come già era stato fatto notare nell'introduzione della tesi.

I grossi e numerosi svantaggi portano a dover scartare questa prima idea.

Un'altra idea è quella di utilizzare una particolare fibra prodotta da SCHOTT che, partendo con un unico grosso diametro, ad un certo punto si dirama in più fibre di piccolo diametro; la fibra in questione si può vedere in figura 3.1.1.a. Per realizzare il sistema desiderato si potrebbero porre i singoli LED che compongono l'illuminazione multiwavelength di fronte alle singole fibre di piccolo diametro ed accoppiarli ad esse con delle ottiche, in modo da trovarsi poi con la loro luce miscelata in uscita sul lato dal grosso diametro. Tuttavia, anche questa soluzione presenta numerosi problemi che fanno sì che venga scartata a priori:

- per prima cosa, avere una fibra di grosso diametro (~1 cm) significa che si dovrà fare poi un ulteriore accoppiamento in modo che la luce in uscita possa finire nella fibra dal diametro desiderato, in questo caso di 1 mm, con grossi limiti legati ad etendue ed apertura numerica, che portano a perdite di efficienza notevoli;
- ponendo una sorgente luminosa di prova davanti ad una sola fibra d'ingresso come in figura 3.1.1.b oppure davanti a tutte le fibre d'ingresso come in figura 3.1.1.c, si può osservare che la luce in uscita è miscelata in maniera poco uniforme, quindi andranno presi provvedimenti anche da questo punto di vista;
- nel caso della fibra di figura 3.1.1 si nota che il numero totale di fibre di piccolo diametro è inferiore al numero totale di LED che sono stati selezionati per essere utilizzati, ciò significa che per completare il sistema sarà necessaria un'ulteriore fibra realizzata in questo modo, con ulteriori accoppiamenti per combinare la luce in uscita dalle due e di conseguenza altre perdite di efficienza; un'alternativa, non senza difficoltà, sarebbe quella di cercare una fibra che si dirami maggiormente ma in questo modo, quasi certamente, il lato in uscita avrebbe un diametro ancora maggiore, ribadendo e aumentando il problema di cui si è parlato nel primo punto.



Figura 3.1.1 a) fibra di grosso diametro che si dirama in più fibre di piccolo diametro; b) uscita ponendo una sorgente luminosa davanti ad una sola fibra d'ingresso; c) uscita ponendo una sorgente luminosa davanti a tutte le fibre d'ingresso

Un'altra idea molto simile alla precedente è quella di utilizzare diversi accoppiatori ad albero (o anche a Y o T), come per esempio quello di Optostar [26] in figura 3.1.2, in modo da avere esattamente come prima tante fibre sul lato d'ingresso, accoppiate tramite ottiche ad altrettanti LED, e un'unica fibra in uscita; i problemi che portano a scartare anche questa soluzione sono:

- trovare accoppiatori che siano compatibili con la banda di lunghezze d'onda di interesse, aspetto non banale;
- sfogliando i datasheet, si nota che questi dispositivi hanno una loro apertura numerica (e ovviamente anche un'etendue) di solito non molto alta, cosa che potrebbe andare a limitare la luce che si riesce ad immettere in essi con un LED;
- è possibile trovare accoppiatori ad albero che hanno rapporto 32x1, cioè con 32 fibre di ingresso e 1 di uscita (che chiaramente potrebbero diventare 1 di ingresso e 32 di uscita a seconda dell'uso che se ne deve fare), quindi si riuscirebbero ad accoppiare tutti i LED del sistema in un solo step, senza bisogno di più dispositivi in cascata o in parallelo come capitava nella soluzione precedente; tuttavia, va considerato che, per come sono fatti, questi dispositivi presentano diversi fenomeni di perdita e aumentare il numero di fibre in cui essi si ramificano non fa altro che peggiorare questo aspetto.



Figura 3.1.2 Accoppiatore ad albero 8x1 prodotto da Optostar [26]

Un'ulteriore idea è quella di saldare i LED che sono stati selezionati per essere utilizzati tutti molto vicini tra di loro su un'unica PCB, posizionando sopra di essi un'unica grossa lente oppure un grosso riflettore in modo da focalizzare tutta la loro luce verso la fibra di diametro 1 mm; questa soluzione condivide gli stessi vantaggi di quella con monocromatore, cioè si hanno spettro continuo (purché tra i LED selezionati non ci siano grossi buchi) e FWHM variabile, ma rispetto alla stessa si ha una potenza radiante sicuramente maggiore e meglio controllabile, con lo spettro che può avere più lunghezze d'onda arbitrarie presenti contemporaneamente. Tuttavia si hanno tre grossi problemi:

- mettere tutti i LED molto vicini non è di certo ottimale sotto l'aspetto della dissipazione del calore prodotto da essi, con conseguenze più o meno gravi a seconda del tipo di PCB utilizzata e dell'eventuale presenza di un dissipatore aggiuntivo; per dare un'idea delle possibili conseguenze, tra quelle meno gravi si trova il fenomeno del Red-shift, di cui si è già discusso, mentre tra quelle più gravi c'è il danneggiamento dei LED stessi e della scheda su cui sono saldati.
- I LED, che sono posizionati molto vicini tra di loro, possono essere visti come un'unica sorgente, che ha però un'area di emissione molto grande se comparata all'area della faccetta d'ingresso della fibra ottica; questo porta conseguentemente ad una grossa differenza di etendue che provoca ingenti perdite.
- I LED non sono tutti uguali; inoltre ognuno di loro, a seconda del punto della PCB dove è saldato, si trova ad una differente distanza rispetto all'asse ottico dell'ipotetica lente o riflettore usati. Le due cose fanno sì che otticamente si comportino ognuno in maniera leggermente diversa, cioè che non tutti siano focalizzati allo stesso modo.

Per come è stata pensata la geometria del sistema, gli ultimi due problemi sono irrisolvibili e questa cosa obbliga a scartare anche questa soluzione.

Un'ultima idea è nata prendendo spunto dalla tecnologia DLP di Texas Instruments [27] sviluppata per TV a schermo laser e della quale si ha il diagramma semplificato in figura 3.1.3.

Il funzionamento base del sistema è di semplice comprensione ma di difficile realizzazione: dei laser sono utilizzati come sorgente luminosa e la loro luce viene manipolata attraverso una serie di specchi e di ruote rotanti in fosforo in modo da ottenere la luce del colore desiderato in uscita, la quale arriva focalizzata in un certo modo per la presenza di alcune lenti. Anche questa soluzione è stata poi esclusa perché presenta diversi problemi:

- i laser richiedono permessi ulteriori per poter essere maneggiati rispetto ai LED e la loro potenza ottica risulta probabilmente anche eccessiva per lo scopo del sistema;
- riuscire a realizzare delle ruote rotanti in fosforo è complicato e riuscire a controllarle ed a sincronizzarle correttamente lo è ancora di più.

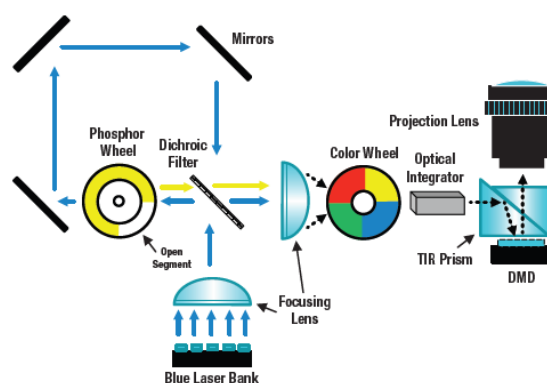


Figura 3.1.3 Diagramma semplificato della tecnologia DLP di Texas Instruments [27]

3.2 Sistemi effettivamente sviluppati

In questo paragrafo vengono presentate le idee che poi sono state effettivamente portate avanti, seppur in misura diversa, per realizzare il sistema finale; in seguito, nei capitoli successivi, per ognuna di esse verranno presentati nei dettagli il principio di funzionamento, lo sviluppo, le modifiche e i risultati ottenuti simulando a PC e fisicamente.

La prima idea trae ispirazione da quanto visto nel sistema già assemblato e acquistabile a livello commerciale. Infatti, l'intenzione è quella di prendere degli specchi diecrici di diverse lunghezze d'onda di taglio (il cui funzionamento sarà spiegato nei dettagli nel capitolo successivo) e porli in fila ad una certa distanza l'uno dall'altro, rivolti verso il punto dove si trova la fibra e inclinati come da condizione di utilizzo tipica (suggerita dal produttore nel datasheet) ovvero a 45°; con questa configurazione si riesce a miscelare la luce emessa da LED posti sotto un determinato specchio con quella proveniente dallo specchio precedente e a portare il risultato della loro miscelazione allo specchio successivo, così da avere in uscita dall'ultimo specchio della fila, cioè quello più vicino alla fibra ottica, la luce miscelata di tutti i LED. Ogni LED è accoppiato con una lente, la quale è posizionata in modo da far arrivare la luce nella maniera più focalizzata possibile sulla faccetta d'ingresso della fibra ottica.

La seconda idea è quella di utilizzare dei light pipe homogenizing rods (di cui si parlerà nel dettaglio nel capitolo dedicato) per miscelare e trasmettere la luce dei LED; la faccia o le facce sulle quali posizionare la faccia emissiva dei LED sono argomento di studio, poiché in teoria tutte sarebbero utilizzabili, sia le facce laterali, ovvero quelle lunghe, sia le basi, cioè quelle più piccole. La scelta di utilizzare un rod prende spunto dalla tecnologia ColorSpark di Philips [28] usata all'interno di alcuni suoi proiettori, con la differenza che, mentre nel sistema da realizzare i rod sono semplicemente di un materiale vetroso, in questa tecnologia vengono usati dei rod speciali contenenti al loro interno particelle di fosforo per convertire il colore della luce che li attraversa.

La terza idea è nata dopo aver eseguito simulazioni sulla seconda e consiste nell'utilizzare una guida di luce ottenuta stampando un modello 3D su misura e rivestendolo di una lamina metallica estremamente riflettente. Rispetto all'idea precedente consente molte più libertà dal punto di vista della forma e delle dimensioni, visto che il tutto dipende dal modello 3D, il quale può essere modificato a piacimento; ovviamente queste libertà sono un'arma a doppio taglio, questo perché ogni errore fatto nelle fasi di disegno e di stampa porta successivamente ad avere delle perdite nella guida, fasi di cui invece non ci si deve preoccupare con i light pipe homogenizing rods visto che vengono direttamente comprati ed hanno caratteristiche in qualche modo garantite.

3.3 Metodologia di sviluppo e analisi dei sistemi

Prima di parlare del procedimento seguito per sviluppare e analizzare le idee viste nel paragrafo precedente, occorre fare una piccola digressione per parlare di cos'è OptisWorks e di cosa è in grado di fare, vista l'importanza fondamentale che esso ha per la realizzazione del sistema.

OptisWorks è un software che integra ciò che è in grado di fare SolidWorks, ovvero disegno e progettazione 3D, con funzionalità riguardanti l'ottica, in modo da poter globalmente progettare, analizzare e ottimizzare sistemi ottici. Dal punto di vista della progettazione i disegni degli elementi ottici possono essere realizzati partendo da zero, ma nella maggior parte dei casi è possibile, e può risultare più comodo, importarli scaricando i loro modelli 3D, i quali di solito sono presenti nei siti dei produttori. Invece, dal punto dell'analisi e dell'ottimizzazione, è possibile fare simulazioni e misurazioni di tipo radiometrico, fotometrico e colorimetrico, ma anche simulazioni di tipo ray tracing, le quali consentono di verificare il comportamento dei raggi luminosi all'interno di un sistema ottico.

Va notato inoltre che la capacità di disegnare in 3D con il programma risulta utile anche nel momento in cui si debba stampare un qualche supporto per un elemento del sistema, con l'opportunità di partire direttamente dal disegno 3D dell'elemento stesso.

Conclusa la digressione su OptisWorks si può passare ad illustrare il procedimento standard che a grandi linee si è seguito per tutti i tipi di sistema:

- 1) Selezionare i componenti necessari, disegnarli su OptisWorks (LED compresi) e metterli assieme per realizzare un "sistema base", prototipo del sistema completo, che utilizzi un insieme ristretto di LED;
- 2) fare simulazioni per capire l'efficienza della soluzione, cioè quanta potenza radiante si ha effettivamente in uscita (in un'area di 1 mm^2 che rappresenta ed approssima la faccetta d'ingresso della fibra ottica) rispetto a quella totale immessa all'ingresso del sistema dai LED;
- 3) modificare la posizione dei LED e degli elementi ottici ed eventualmente cambiare quest'ultimi in favore di altri finché simulando non si trova, per ogni sistema base, la soluzione ottimale per quanto riguarda l'efficienza;
- 4) confrontare quanto ottenuto dai vari tipi di sistema e realizzare anche fisicamente la soluzione ottimale (le soluzioni ottimali) che ha (hanno) le prestazioni più convincenti secondo le simulazioni svolte, comprando i componenti necessari e cercando di costruire il sistema nel modo più fedele possibile a quanto simulato;
- 5) fare misurazioni anche sulla soluzione ottimale (sulle soluzioni ottimali) fisicamente realizzata (realizzate), utilizzando lo stesso insieme ristretto di LED che si era usato al

simulatore ottico, per confrontare l'efficienza ottenuta realmente con quella ottenuta simulando al PC;

A questo punto si può trarre conclusione su quale tipologia di sistema alla fine abbia realmente la migliore soluzione ottimale del sistema base e quindi risulti la più adeguata per costruire in seguito il sistema completo fisicamente.

Nel punto 1), come è già stato anticipato parlando di OptisWorks, si possono eventualmente scaricare ed importare i modelli 3D dei componenti ottici se sono presenti nei siti dei produttori, così da evitare di doverli disegnare da zero.

Nel punto 3) l'implementazione di diverse configurazioni ottiche è stata ottimizzata al fine di migliorare le caratteristiche delle stesse o eventualmente per diversificarle. Sempre nel punto 3), per "soluzione ottimale" si intende la soluzione per quel tipo di sistema che, per quanto riguarda l'efficienza, si è rivelata la migliore rispetto alle simulazioni eseguite, il che non vuol dire che sia in assoluto la migliore possibile per quel tipo di sistema; a questo proposito, allargando il discorso, occorre specificare che anche i tre tipi scelti per realizzare il sistema potrebbero non essere i migliori in assoluto, ma sono semplicemente quelli più convincenti tra quelli che sono stati pensati.

Il punto 4) comprende anche la progettazione delle PCB su cui saldare i componenti elettronici (eseguita con il software Autodesk EAGLE) e la loro stampa, ma anche il disegno e la stampa 3D degli eventuali supporti per gli elementi ottici.

Capitolo 4

Sistema con specchi dicroici

In questo capitolo viene inizialmente illustrato il funzionamento teorico del tipo sistema con specchi dicroici; per farlo, è necessario parlare preliminarmente del funzionamento degli specchi stessi. Successivamente, viene presentato il sistema base, che è una sorta di prototipo del sistema al completo che però utilizza un solo specchio e un insieme ristretto di LED; di esso vengono visti nei dettagli i componenti ottici che sono stati scelti per realizzarlo. Dopodiché, vengono mostrate tutte le numerose simulazioni e misurazioni che sono state svolte su tale sistema base per arrivare alla sua soluzione ottimale. Infine, vengono tratte alcune osservazioni e conclusioni riguardanti questo tipo di sistema.

4.1 Principio di funzionamento

Gli specchi dicroici sono dispositivi in grado di separare la luce riflettendola o trasmettendola in funzione della lunghezza d'onda. Essi vengono categorizzati a seconda del numero di lunghezze d'onda di taglio e del comportamento che hanno al di sotto e al di sopra di esse:

- longpass = riflessione e trasmissione sono separate da una lunghezza d'onda di taglio, al di sopra della quale lo specchio trasmette e al di sotto della quale lo specchio riflette;
- shortpass = riflessione e trasmissione sono separate da una lunghezza d'onda di taglio, al di sopra della quale lo specchio riflette e al di sotto della quale lo specchio trasmette, al contrario del precedente tipo;
- multi-band = sono presenti più bande di riflessione e di trasmissione che si alternano, separate ogni volta da una determinata lunghezza d'onda di taglio; a patto che sia disponibile la lunghezza d'onda di taglio di interesse, quest'ultimo tipo potrebbe essere usato in sostituzione di uno dei due precedenti visto che ne combina le funzioni.

Questi specchi sono in grado di separare la luce, tuttavia essi possono essere usati anche per combinarla, a seconda di come vengono utilizzati. Infatti, supponendo che lo specchio sia sempre inclinato come da condizione di utilizzo tipica (suggerita dal produttore nel datasheet), cioè di 45° rispetto alle sorgenti, si può avere:

- luce che si separa, se si ha una sola sorgente con uno spettro di emissione collocato dove c'è la lunghezza d'onda di taglio dello specchio, con parte dello spettro che viene

riflessa in una direzione mentre la restante parte viene trasmessa in un'altra, come in figura 4.1.1.a;

- luce che si combina, se si pone una sorgente (o più) con uno spettro al di sotto della lunghezza d'onda di taglio davanti ad una faccia ed un'altra sorgente (o più) con uno spettro al di sopra della lunghezza d'onda di taglio davanti all'altra faccia, a 90° rispetto alla precedente, con la luce in uscita dallo specchio che è la somma dei due spettri, come in figura 4.1.1.b.

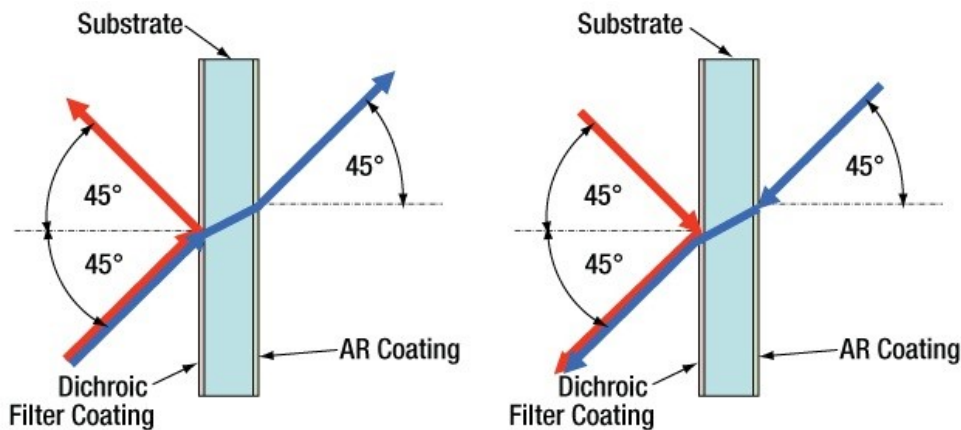


Figura 4.1.1 a) specchio usato per separare la luce; b) specchio usato per combinare la luce [29]

Nel caso del sistema da realizzare la luce proveniente da dei LED va combinata e per farlo si è scelto di utilizzare degli specchi dichroici della tipologia longpass; equivalentemente si sarebbe potuto giungere agli stessi risultati invertendo l'ordine dei LED e utilizzando dei shortpass.

Gli specchi vengono scelti in modo da avere un determinato intervallo di lunghezza d'onda di taglio tra uno e l'altro, che è sempre intorno ai 50-100 nm. Le lunghezze d'onda degli specchi sono importanti per due motivi: il primo è che, come già detto nel capitolo 2, costituiscono un ulteriore vincolo nella fase di scelta dei LED, visto che le loro lunghezze d'onda dominanti devono trovarsi sufficientemente distanti dalle lunghezze di taglio degli specchi per evitare tagli indesiderati negli spettri e quindi comportamenti non voluti; il secondo è che una volta scelti i LED essi vengono suddivisi in dei gruppi, ognuno formato da tutti i LED con lunghezza d'onda compresa tra una lunghezza d'onda di taglio e quella successiva.

Nella tabella 4.1.1 si osservano i gruppi che si formano, con le righe bianche che si riferiscono ai LED, con lunghezza d'onda dominante, produttore e nome, mentre quelle rosse si riferiscono agli specchi dichroici, con lunghezza d'onda di taglio. Gli specchi e le relative lunghezze d'onda di taglio sono stati presi inizialmente e come riferimento dai longpass dichroic mirror/beamsplitter di Thorlabs [29].

λ [nm]	Produttore e nome del LED
980	Roithner, SMB1N - 980D
950	
940	Osram, OSOLON P1616 Lens - SFH 4181S
910	Roithner, SMB1N - 910D
900	
880	Roithner, SMB1N - 880D
850	Osram, OSOLON P1616 Lens - SFH 4171S
810	Roithner, SMB1N - 810D
805	
760	Roithner, SMB1N - 760D
735	
730	Lumileds, LUXEON C Color Line - Far Red
700	Roithner, SMB1N - 700
680	Roithner, SMB1N - 680D
660	Lumileds, LUXEON C Color Line- Deep Red
650	
640	Osram, OSOLON Square - GH CSSRM4.24
621	Osram, OSOLON Pure 1010 - GR VJLPE1.F3
605	
590	Roithner, SMB1N - 590
570	Osram, OSOLON Pure 1010 - GG VJLPE1.F3
560	Osram, OSTAR Projection Compact - KP CSLNM1.F1
550	
525	Osram, OSOLON Pure 1010 - GT VJLPE1.13
505	
490	Osram, OSOLON Pure 1010 - GC VJLPE1.13
470	Osram, OSCONIQ P 3030 - GB QSSPA1.13
453	Osram, OSOLON Pure 1010 - GD VJLPE1.14
425	
420	Roithner, SMB1N - 420H
395	Roithner, SMB1N - 395V
365	Roithner, SMB1N - 365V
275	Osram, OSOLON UV 3636 - SU CULDN1.VC

Tabella 4.1.1 Lista dei LED e degli specchi diecrici utilizzati

Nella tabella 4.1.1 vanno osservate due cose:

- la prima è che in alcuni casi c'è una distanza di soli 5 nm tra la lunghezza d'onda di taglio dello specchio e quella dominante del LED più vicino; questa è stata una scelta forzata e dovuta al fatto che in quei casi o non erano disponibili altri LED che fossero più distanti da quello specchio, nel senso delle lunghezze d'onda, rispetto a quello scelto in tabella, oppure perché anche se erano disponibili sarebbero stati inutilmente ed eccessivamente vicini ai LED che li precedevano o seguivano, il che avrebbe generato degli spettri praticamente sovrapposti.
- La seconda è che non tutti i gruppi hanno lo stesso numero di LED, infatti alcuni ne hanno quattro mentre altri solo uno.

Ora, parlando della geometria e del funzionamento di questo tipo di sistema, l'idea è quella di realizzare quanto introdotto in breve nel paragrafo 3.2, di cui si possono osservare delle illustrazioni esemplificative (il numero di LED non corrisponde con quanto detto precedentemente) nelle figure 4.1.2 e 4.1.3.

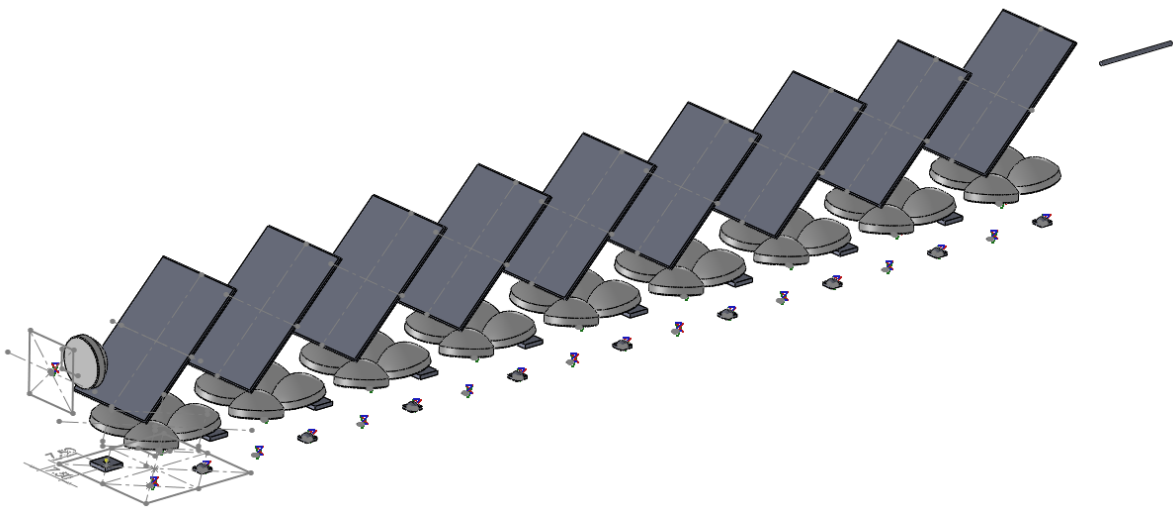


Figura 4.1.2 *Illustrazione esemplificativa del sistema da realizzare, vista in prospettiva*

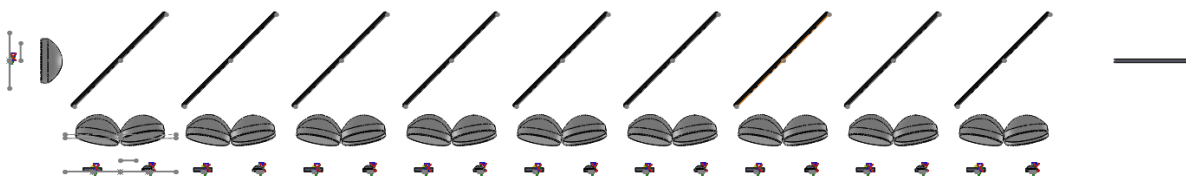


Figura 4.1.3 *Illustrazione esemplificativa del sistema da realizzare, vista laterale*

Ribadendo e addentrandosi nei dettagli di quanto detto in precedenza, questo tipo di sistema è costituito da un “treno” di specchi dicroici, nove ad essere precisi, posti in fila rivolti verso la

fibra ottica (sulla destra nelle figure 4.1.2 e 4.1.3), inclinati a 45° , che con le loro lunghezze d'onda di taglio fanno sì che i LED vengano suddivisi in piccoli gruppi, ognuno dei quali è posizionato al di sotto di uno specifico specchio. Gli specchi diecrici, che sono di tipo longpass, fanno in modo che la luce con lunghezza d'onda superiore alla lunghezza d'onda di taglio possa essere trasmessa attraverso di essi, mentre quella con lunghezza d'onda inferiore venga riflessa, quindi l'idea è quella di mettere gli specchi in ordine decrescente di lunghezza d'onda di taglio mano a mano che si va verso la fibra, con al di sotto ognuno di essi il gruppo di LED con lunghezze d'onda con valori compresi tra quella di taglio di quello specchio e quella di taglio del successivo, così ad ogni specchio si ha una situazione in cui la luce proveniente dal gruppo di LED sotto di esso viene riflessa e contemporaneamente combinata con quella proveniente dallo specchio precedente, visto che quest'ultima viene trasmessa, con la luce risultante che va verso lo specchio successivo. La situazione è più facilmente comprensibile spiegando concretamente cosa si ha: guardando la tabella 4.1.1, si ha il primo specchio, il più distante di tutti rispetto alla fibra ottica (nelle figure 4.1.2 e 4.1.3 sarebbe quello più a sinistra), con la lunghezza d'onda di taglio di 950 nm, con il gruppo di LED formato da quello a 980 nm posto in verticale e rivolto verso lo specchio (nelle figure esemplificative 4.1.2 e 4.1.3 sarebbe il LED in verticale sulla sinistra) e con il gruppo di LED formato da quelli a 910 e 940 nm posto al di sotto dello specchio; con questa configurazione la luce proveniente dalle due direzioni viene combinata grazie allo specchio che per il suo funzionamento e posizionamento direziona la luce risultante in uscita verso lo specchio successivo, cioè quello con il taglio a 900 nm, che a sua volta combina questa luce con quella del gruppo di LED formato da quelli a 810, 850 e 880 nm posto al di sotto di esso, e così via fino all'ultimo specchio dal quale esce la luce di tutti i LED sovrapposta. Come si vede sempre dalle figure esemplificative 4.1.2 e 4.1.3, ogni singolo LED è accoppiato con una lente che fa in modo che la luce arrivi sulla faccetta della fibra ottica, ma soprattutto che essa sia focalizzata il più possibile; la fibra ottica in questione va posta ad una certa distanza rispetto all'ultimo specchio e allineata rispetto al centro dello stesso, come si può vedere sempre nelle due figure 4.1.2 e 4.1.3.

4.2 Prototipo di sistema e componenti ottici utilizzati per realizzarlo

Il prototipo (chiamato anche sistema base) per questo tipo di sistema è costituito da un solo specchio e due gruppi di LED, uno in verticale e l'altro posto al di sotto di esso, come se questo specchio fosse il primo della fila; in particolare si è scelto di usare lo specchio con lunghezza d'onda di taglio a 505 nm, con in verticale il gruppo formato dal LED a 525 nm, mentre al di

sotto di esso il gruppo formato dai LED a 420, 453, 470 e 490 nm, con ogni LED ovviamente abbinato ad una lente; va subito notato che secondo la tabella 4.1.1 il LED a 420 nm apparterebbe al gruppo di LED posto sotto lo specchio a 425 nm, cioè il successivo della fila, tuttavia per questo sistema base si è scelto di metterlo insieme a quelli a 453, 470 e 490 nm in modo da avere un gruppo di quattro LED così da rappresentare un esempio anche per i gruppi più numerosi che, sempre osservando la tabella 4.1.1, sono formati appunto da quattro LED. I cinque LED nominati vanno a formare “l’insieme ristretto” di LED menzionato nel procedimento presente al paragrafo 3.3.

Il sistema base appena descritto è osservabile in figura 4.2.1, con il puntino azzurro sulla destra che indica il punto dove si dovrebbe trovare il centro della faccetta della fibra ottica e dove quindi sono posizionati i sensori per fare le misurazioni, sia quello nel software che quello fisico.

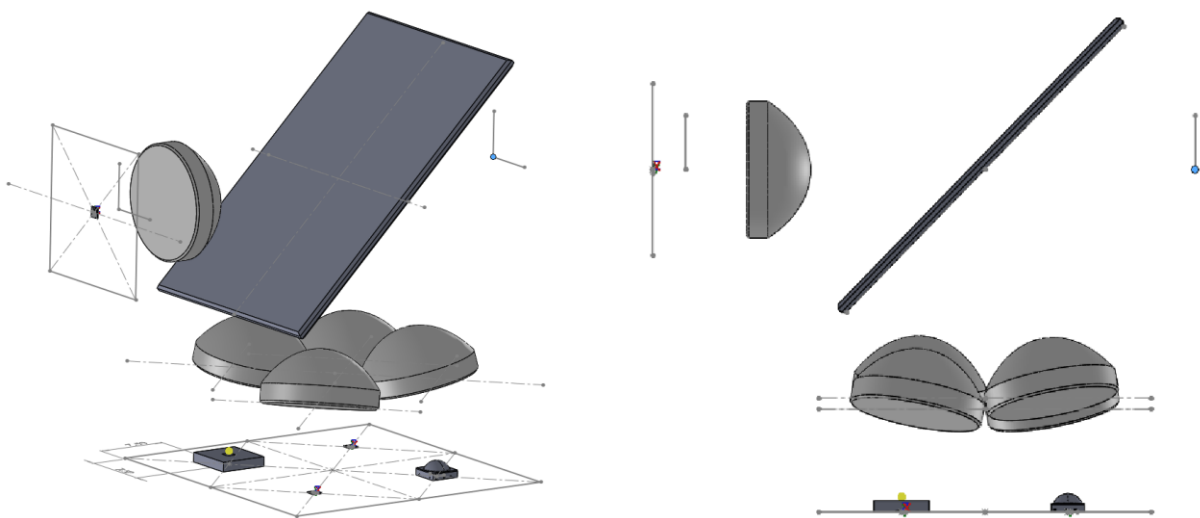


Figura 4.2.1 Sistema base per questo tipo di sistema: a) vista in prospettiva, b) vista laterale

Parlando dei singoli componenti ottici, lo specchio dichroico utilizzato in questo sistema base è il longpass dichroic mirror/beamsplitter DMLP505R di Thorlabs [29] mostrato nella figura 4.2.2.



Figura 4.2.2 Specchio dichroico longpass DMLP505R di Thorlabs [29]

Nella figura 4.2.3 si possono osservare i grafici di trasmissione e riflessione al variare della lunghezza d'onda con luce non polarizzata, mentre nella 4.2.4 tutte le specifiche dello specchio DMLP505R.

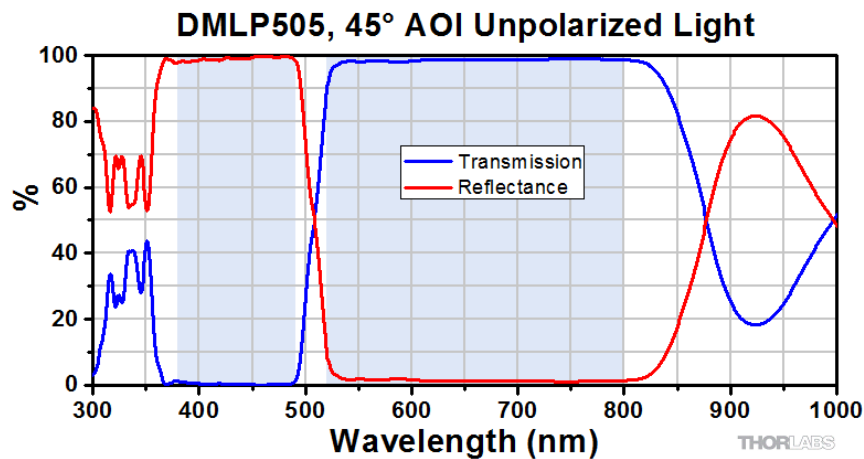


Figura 4.2.3 Trasmissione e riflessione dello specchio DMLP505R in funzione della lunghezza d'onda con luce non polarizzata [29]

Specifications	
Type	Longpass
Cut-On Wavelength	505 nm
Transmission Band ^a	520 - 800 nm
Reflection Band ^b	380 - 490 nm
AR Coating Range ^c	400 - 800 nm
Size	25 mm x 36 mm
Clear Aperture	>22.5 mm x 32.4 mm
Thickness	1.0 mm
Incident Angle	45°
Surface Quality	40-20 Scratch-Dig
Transmitted Wavefront Error	$\lambda/4$ @ 633 nm Over Clear Aperture
Damage Threshold	1.50 J/cm ² (532 nm, 10 Hz, 10 ns, \varnothing 250 μ m)
Substrate Material	UV Fused Silica

- a. The absolute transmission over the transmission band is greater than 85%.
 b. The absolute reflection over the reflection band is greater than 90%.
 c. Over the AR coating range, R < 2% on the AR-coated surface.

Figura 4.2.4 Specifiche dello specchio DMLP505R [29]

Come già preannunciato in precedenza si è cercato di tenere la lunghezza d'onda dominante dei LED lontana da quella di taglio degli specchi, giustificando questa scelta con il fatto che altrimenti parte dello spettro del LED verrebbe in un certo senso “tagliato” e avrebbe un comportamento indesiderato, ma con questo non si intende solamente che esso avrebbe una riflessione al posto di una trasmissione o viceversa, infatti la figura 4.2.3 mostra che la faccenda è più complessa: il passaggio da riflessione a trasmissione e viceversa è tutt'altro che istantaneo rispetto alla lunghezza di taglio, quindi l'eventuale parte di spettro che si trovi in questa banda

di transizione avrebbe un comportamento intermedio tra riflessione e trasmissione, generando quindi qualcosa di poco prevedibile.

Inoltre, dalle figure 4.2.3 e 4.2.4 si notano altri tre importanti aspetti:


- Nella figura 4.2.4 sono indicate le bande di trasmissione e riflessione dello specchio per le quali è garantito che le prestazioni soddisfino le specifiche dichiarate, mentre al di fuori di esse le prestazioni variano da lotto a lotto e non sono garantite; le stesse bande sono ombreggiate in blu nella figura 4.2.3.
- Nella figura 4.2.3, al di fuori delle bande di trasmissione e riflessioni appena citate ed escludendo la banda di transizione di cui si è già discusso, si ha un comportamento tutt'altro che ideale, nel senso che idealmente uno si aspetterebbe al di sopra della lunghezza di taglio solo trasmissione e al di sotto di essa solo riflessione, invece si ha qualcosa di molto irregolare che causa molti problemi se si usano LED con lunghezze d'onda estremamente distanti dalla lunghezza di taglio; per esempio, nel sistema completo questo specchio non ha grossi problemi a riflettere la luce del gruppo di LED al di sotto di esso, che sono a 453, 470 e 490 nm, ma nel momento in cui esso deve andare a trasmettere la luce miscelata da tutti gli specchi precedenti, che contiene lunghezze d'onda ben oltre gli 800 nm e che si spingono in particolare fino a 980 nm, si hanno problemi enormi visti i grafici di trasmissione e riflessione a lunghezze d'onda elevate, quindi si può giungere alla conclusione che il modello di specchio in questione è sicuramente adatto per realizzare il sistema base ma che per il sistema completo se ne devono cercare altri che abbiano bande più ampie e costanti.
- Nella figura 4.2.4 è indicata la banda del rivestimento antiriflesso (AR coating), infatti lo specchio ha una delle due facce rivestita con questo speciale trattamento; tale faccia è riconoscibile perché è quella dove è inciso il nome dello specchio ed in questo sistema, anche se non lo si può vedere dalle figure, è la faccia superiore.

Parlando degli unici altri elementi ottici presenti in questo sistema base, sono state scelte delle lenti condensatrici asferiche in vetro B270 uguali per tutti i LED, in particolare il modello ACL1210U di Thorlabs [30] illustrato in figura 4.2.5.



Figura 4.2.5 Lente condensatrice asferica ACL1210U di Thorlabs [30]

Le caratteristiche di questa lente sono riassunte in figura 4.2.6.

Item #	Diameter (mm)	Focal Length (mm) ^a	Focal Shift (Raw Data)	f/# ^b	Clear Aperture (mm)	Back Focal Length (mm)	Numerical Aperture ^c	Center Thickness (mm)	Edge Thickness (mm)	Non-Aspheric Surface
ACL1210U	12.0	10.5		0.97	>10.8	7	0.54	5.8	1.9	Piano

a. These lenses have a focal length tolerance of $\pm 8\%$. This is a manufacturing tolerance and not the wavelength dependent focal shift.

b. $f/\#$ is defined as the focal length divided by the clear aperture of the lens.

c. Numerical Aperture (NA) is calculated from the sine of the marginal ray angle. Due to the thickness of the lens, the paraxial approximation is not valid to determine the path of the marginal ray.

Figura 4.2.6 Caratteristiche della lente ACL1210U di Thorlabs [30]

Tra le caratteristiche più di interesse oltre al diametro si notano l'apertura numerica ma soprattutto la lunghezza focale e la lunghezza focale posteriore della lente; per questi ultimi si fa riferimento al disegno in figura 4.2.7.

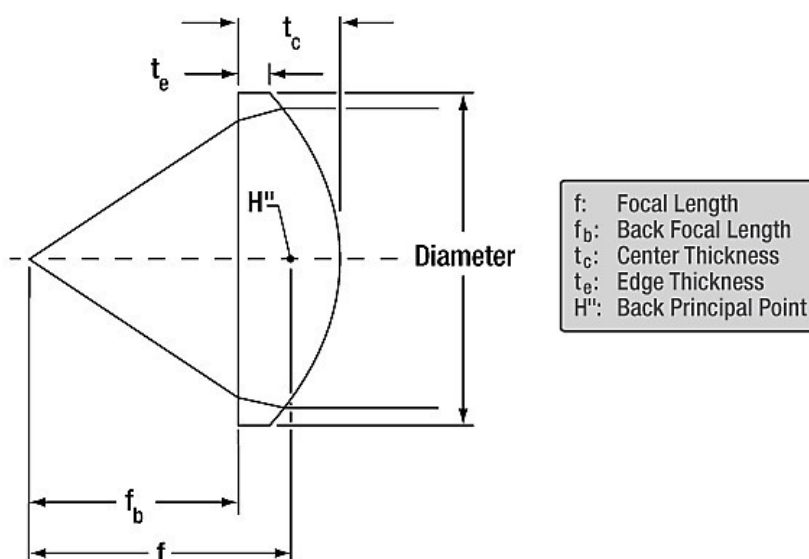


Figura 4.2.7 Disegno di riferimento per le distanze e punti notevoli della lente ACL1210U [30]

Va notato che i LED idealmente sono pensati come sorgenti puntiformi e quindi se posti alla lunghezza focale della lente la loro luce dovrebbe essere perfettamente collimata; tuttavia, nella realtà essi hanno determinate dimensioni e quindi non sono esattamente puntiformi e se posti alla lunghezza focale la loro luce non viene collimata in modo perfetto.

Inoltre, tra le caratteristiche in figura 4.2.6 è indicata la “focal shift”, ovvero una variazione della lunghezza focale rispetto alla lunghezza d’onda della luce utilizzata; non è necessario riportarne il grafico poiché in ogni caso questo effetto non verrà considerato nelle prove fatte nel paragrafo successivo dato che i cinque LED in questione hanno lunghezze d’onda talmente vicine che la differenza reciproca in lunghezza focale sarebbe praticamente nulla. Infine, c’è da sottolineare il fatto che la “U” finale nel nome della lente indica che il modello è “uncoated”, nel senso che la lente non è rivestita con alcun trattamento antiriflesso ma è composta di puro

vetro B270, il quale ha la caratteristica di trasmissione illustrata in figura 4.2.8; questa caratteristica anticipa ed evidenzia che parte della luce proveniente dal LED viene persa dalla lente a causa del materiale stesso di cui è composta.

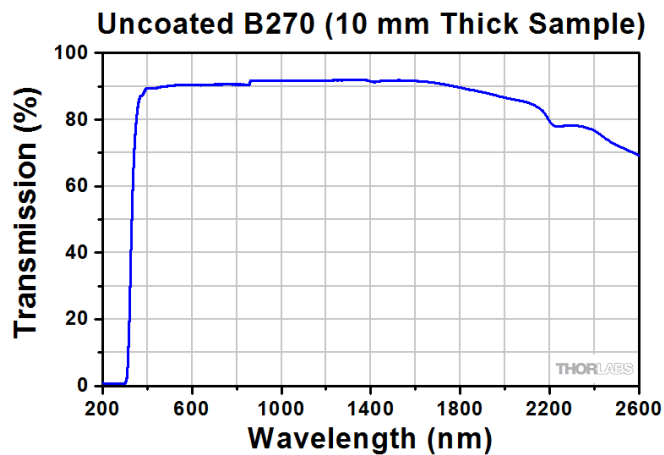


Figura 4.2.8 Percentuale di trasmissione della luce al variare della lunghezza d'onda di un campione di spessore 10mm di vetro B270 [30]

4.3 Simulazioni svolte e risultati ottenuti

Per arrivare alla soluzione ottimale per il sistema base si è proceduto per gradi: inizialmente, si è costruito un sistema senza specchio diecrico, in modo da poter studiare più liberamente il comportamento che le lenti hanno con l'insieme di LED scelto (420, 453, 470 e 490 nm) nel momento in cui esse vengono mosse, con una situazione di luce collimata; dopodiché, il sistema è stato aggiornato aggiungendo lo specchio e il LED laterale mancante (a 525 nm), in modo tale da avere praticamente il sistema base; successivamente, si è studiato il comportamento delle lenti con luce focalizzata; infine, si è sfruttato quanto appreso per focalizzare al meglio la luce dei LED sul punto di interesse e quindi si è giunti alla soluzione ottimale.

Per prima cosa sono stati scaricati i modelli 3D dei LED di Osram direttamente dal sito del produttore ed importati in OptisWorks; insieme ai modelli 3D sono stati scaricati ed importati i rispettivi rayfile, ovvero speciali file, forniti sempre dal produttore, contenenti il modello di emissione dei raggi del LED, la sua lunghezza d'onda, la sua potenza radiante e altre informazioni ottiche. Una volta importati i modelli 3D insieme ai rispettivi rayfile si ha una riproduzione abbastanza fedele del comportamento ottico che i LED hanno nella realtà. A questo punto, dell'insieme di LED, è rimasto da riportare su Optisworks solo quello a 420 nm di Roithner, del quale però non sono presenti modelli 3D e rayfile nel sito del produttore, perciò

esso è stato disegnato e impostato otticamente partendo da zero, basandosi sulle informazioni presenti nel datasheet.

Per le lenti tutto è risultato più semplice in quanto è stato sufficiente scaricare ed importare il modello 3D fornito sul sito di Thorlabs ed impostare come materiale della lente il vetro B270. Nella figura 4.3.1 è possibile vedere uno schema semplificato del sistema realizzato in questa prima fase per studiare il comportamento delle lenti.

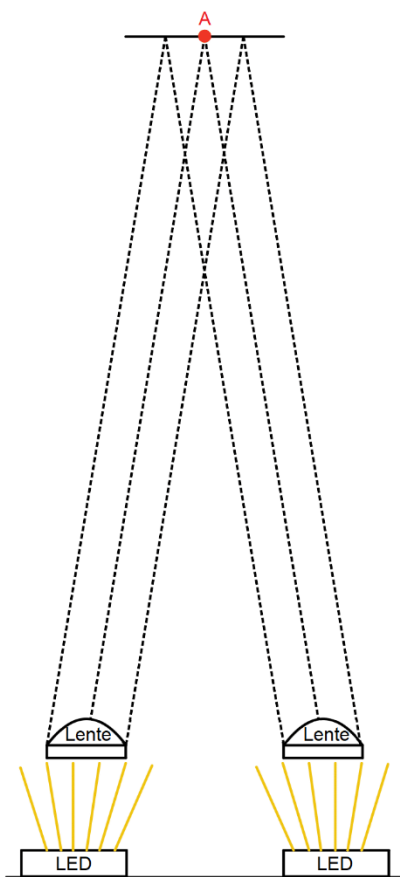


Figura 4.3.1 Schema semplificato del sistema realizzato in questa prima fase per studiare il comportamento delle lenti

In pratica si posizionano i LED ad una certa distanza reciproca e sopra di essi si mettono le lenti in modo da collimare la luce e direzionarla visivamente su un punto “A” posizionato ad una certa altezza. È importante sottolineare che per “direzionare visivamente” si intende che non interessa direzionare in maniera precisa facendo misure ma è sufficiente farlo “a occhio” basandosi solo sulle immagini della luce che giunge sul punto di interesse, cioè su un sensore, giusto per capire come essa varia in relazione alla posizione delle lenti e studiando di conseguenza il comportamento di quest’ultime. La figura 4.3.2 mostra ciò che è stato effettivamente realizzato in OptisWorks.

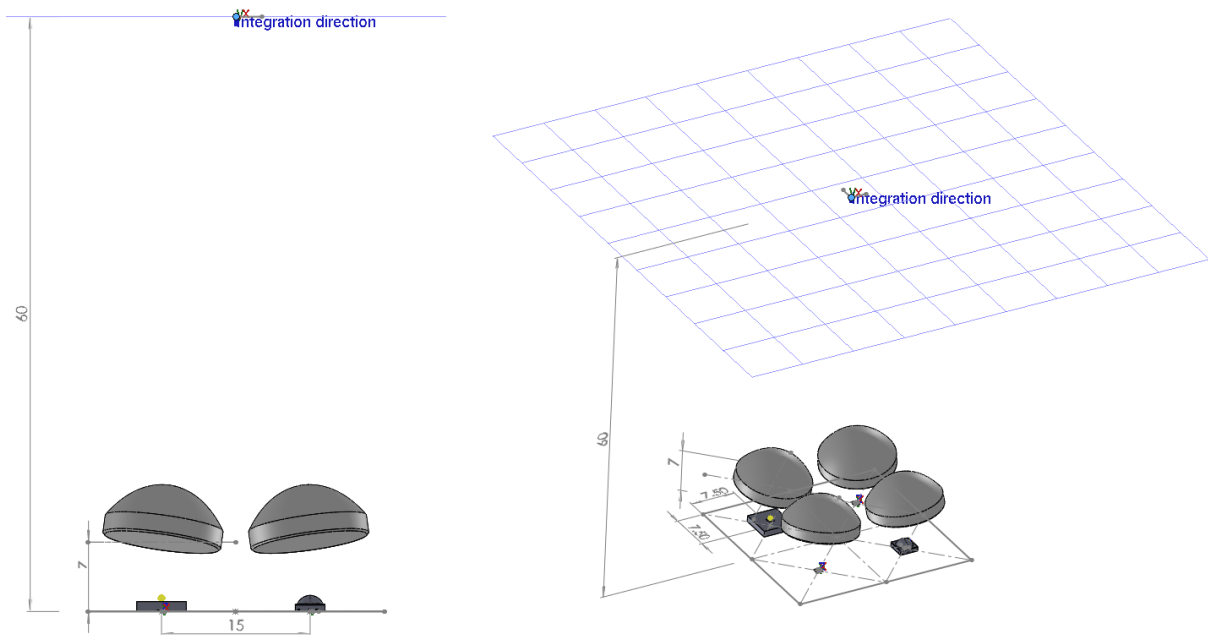


Figura 4.3.2 Sistema per studiare il comportamento delle lenti in questa prima fase: a) vista laterale, b) vista in prospettiva

Guardando nei dettagli la geometria del sistema, è disegnata una base quadrata di 30 mm x 30 mm, la quale è divisa in quattro quadrati più piccoli di 15 mm x 15 mm, al centro di ognuno dei quali è posizionato uno dei LED (420, 453, 470 e 490 nm); essere al centro significa per un LED avere il proprio asse a 7.5 mm dai lati di quel quadrato e contemporaneamente avere lo stesso asse a 15 mm da quelli dei due LED nei quadrati con cui confina, come si vede in figura 4.3.2.a. Sopra i LED sono posizionate le lenti, spostate o inclinate in qualche modo, ma con il centro della loro faccia piana che rimane tipicamente a 7 mm di altezza rispetto alla base disegnata, cioè alla lunghezza focale posteriore. Infine, è presente un sensore 80 mm x 80 mm; il suo centro corrisponde al punto A dove direzionare la luce ed è allineato con il centro della base disegnata sotto i LED ed a 60 mm di altezza da esso.

Il sensore appena nominato, essendo comunque qualcosa di virtuale, è in grado di fare misure di diverse grandezze ottiche, sia radiometriche che fotometriche. Una cosa importante da dire è che essendo che ci si affida alle immagini che il sensore mostra per capire come la luce è direzionata, è importante che la luce proveniente da ogni LED sia distinguibile da quella degli altri, ma lasciando i LED in questione con i parametri assoluti (potenza, irradianza, ecc.) indicati nei datasheet e nei rayfile, alcuni LED scomparirebbero visivamente nelle immagini del sensore perché troppo poco potenti in confronto ad altri, di conseguenza si è deciso di portare la potenza radiante di tutti i LED usati nelle prove svolte da qui in avanti a $\Phi_{e,LED} = 1W$. Quindi, le potenze che ad un certo punto si andranno a leggere nei dati ottenuti saranno relative a questa scelta e non quelle assolute che si avrebbero nella realtà; tuttavia, questo discorso non vale quando si parla dell'efficienza, che è la stessa se ottenuta tramite le potenze relative o quelle assolute.

La prima prova è stata eseguita lasciando il centro della faccia piana delle lenti perfettamente allineato rispetto al centro dei rispettivi LED ma inclinando le lenti tutte con un certo angolo rispetto al proprio asse, rivolte verso l'immaginario asse che passa per il centro della base disegnata sotto i LED, come mostra per esempio la figura 4.3.2. Inizialmente l'intero sistema di lenti inclinate, raggi, assi e punti è stato trattato in maniera semplificata come un sistema geometrico e pertanto si è provato a calcolare empiricamente l'inclinazione che avrebbero dovuto avere le lenti; con tale calcolo si è trovato l'angolo di inclinazione di 11.3148° . Alcuni dei risultati ottenuti con questa configurazione sono illustrati nelle figure 4.3.3 e 4.3.4.

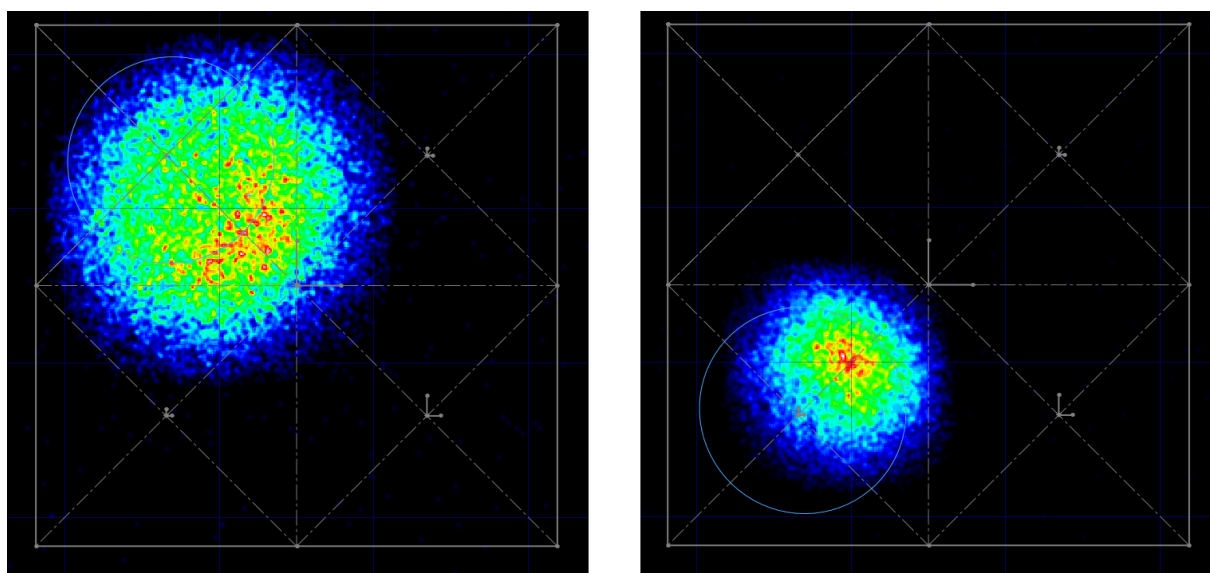


Figura 4.3.3 Lenti inclinate a 11.3148° , luce di alcuni LED accesi singolarmente: a) 420 nm, b) 490 nm

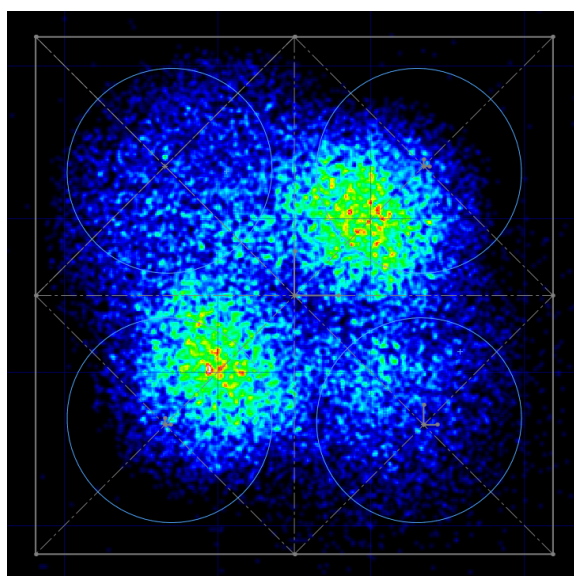


Figura 4.3.4 Lenti inclinate a 11.3148° , luce di tutti i quattro LED sulla base accesi insieme (420, 453, 470 e 490 nm)

Analizzando quanto ottenuto appare chiaro che questo tentativo empirico ha portato a risultati errati, infatti la luce non è affatto al centro del sensore, ovvero nel punto A. Nella semplificazione geometrica utilizzata il principale errore che è stato commesso è pensare che inclinando le lenti queste avrebbero avuto lo stesso comportamento che avevano quando erano parallele rispetto ai LED, con la semplice differenza che avrebbero portato la luce in una direzione diversa, ma questo non è affatto corretto, come verrà discusso più avanti. Mantenendo comunque l'idea di inclinare le lenti, si è continuato a simulare per angoli diversi fino a quando si è trovato che a 27° di inclinazione la luce è ben direzionata al centro del sensore, come mostrato dalle figure 4.3.5 e 4.3.6; dalle stesse figure si nota anche visivamente la differenza di inclinazione delle lenti rispetto a prima, infatti le loro sagome in azzurro sono diventate molto ovali mentre prima erano praticamente tonde.

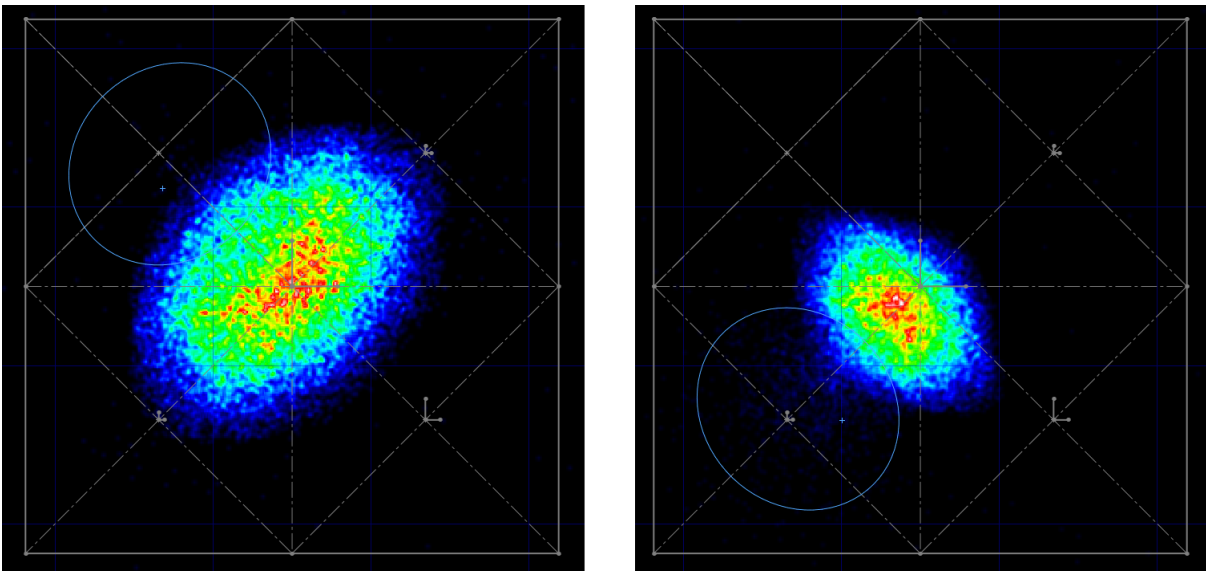


Figura 4.3.5 Lenti inclinate a 27° , luce di alcuni LED accesi singolarmente: a) 420 nm, b) 490 nm

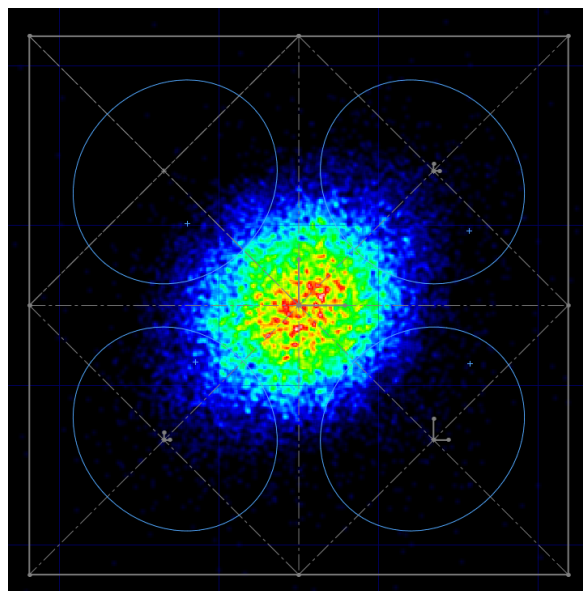


Figura 4.3.6 Lenti inclinate a 27° , luce di tutti i quattro LED sulla base accesi insieme (420, 453, 470 e 490 nm)

Successivamente, le lenti sono state riportate parallele, con il centro della faccia piana delle lenti sempre perfettamente allineato rispetto al centro dei rispettivi LED; da questa posizione di perfetto allineamento è stato provato l'effetto che ha uno spostamento delle lenti verso l'immaginario asse che passa per il centro della base disegnata sulla luce invece che un'inclinazione verso di esso come fatto in precedenza. Lo spostamento è di pochi millimetri e per forza di cose è anche limitato perché ad un certo punto le lenti si vanno a toccare. Si è trovato che per uno spostamento di 2 mm la luce è ben direzionata al centro del sensore, come si può osservare nelle figure 4.3.7 e 4.3.8; dalle stesse figure, si nota inoltre quanto le lenti siano reciprocamente vicine con questo spostamento, infatti le loro sagome in azzurro quasi si toccano.

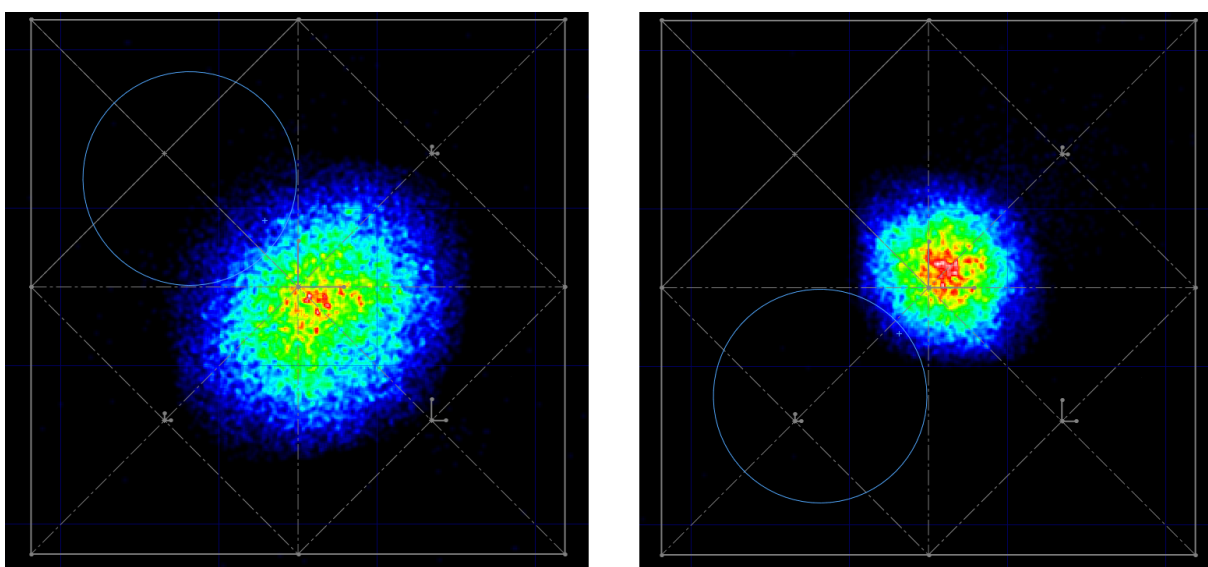


Figura 4.3.7 Lenti spostate di 2 mm, luce di alcuni LED accesi singolarmente: a) 420 nm, b) 490 nm

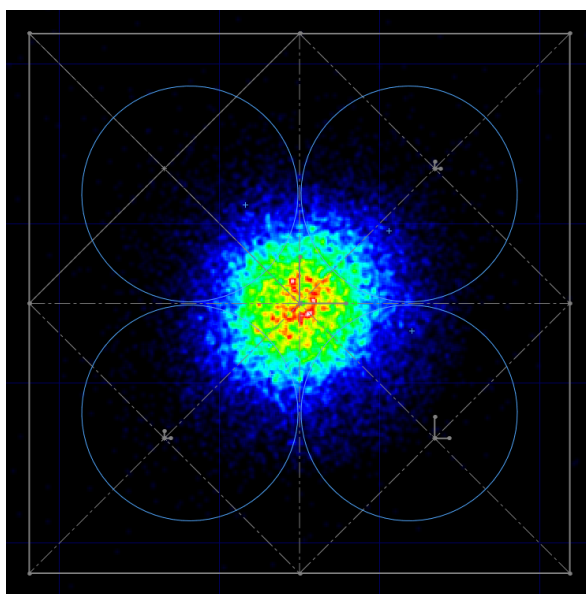


Figura 4.3.8 Lenti spostate di 2 mm, luce di tutti i quattro LED sulla base accesi insieme (420, 453, 470 e 490 nm)

Come anticipato prima, non si può semplificare pensando che le lenti una volta inclinate abbiano lo stesso comportamento che avevano quando erano parallele rispetto ai LED con la semplice differenza che portano la luce in una direzione diversa; infatti, le lenti sono oggetti di materiale vetroso che hanno una certa forma, di conseguenza la luce subisce delle determinate riflessioni al suo interno e poi esce, quindi cambiare l'angolo di ingresso dei raggi, come accade appunto quando la lente passa da essere parallela ad essere inclinata, contribuisce certamente a cambiare il modo in cui i raggi escono.

Ogni movimento eseguito con la lente causa effetti differenti, infatti anche se visivamente i risultati che si sono ottenuti inclinando le lenti e quelli ottenuti spostandole sembrano essere simili, in realtà non è esattamente così e questo lo si nota meglio utilizzando un simulatore in 2D presente in rete [31]. Nelle figure 4.3.9, 4.3.10 e 4.3.11 il simulatore mostra una sorgente puntiforme, una lente ideale e un blocker che rappresentano rispettivamente LED, lente ACL1210U e spot (cioè la direzione) dove puntare.

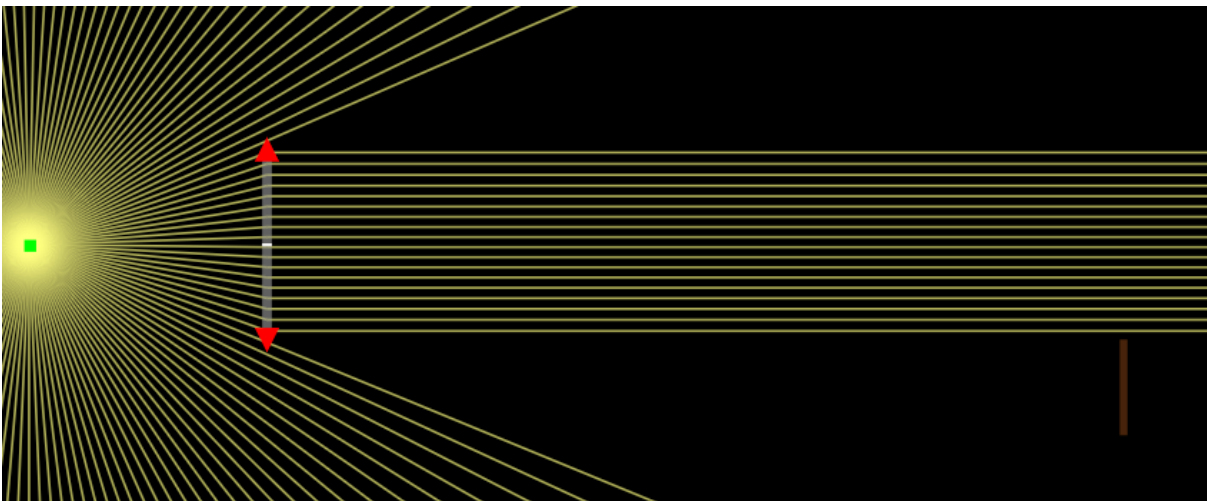


Figura 4.3.9 Luce perfettamente collimata con lente alla distanza focale e centrata; luce perpendicolare rispetto alla lente

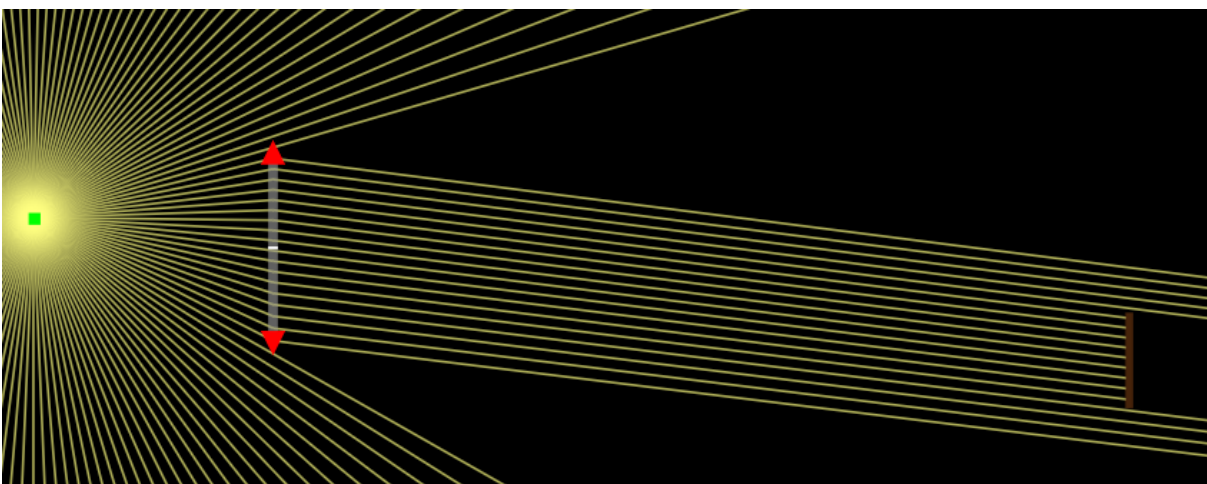


Figura 4.3.10 Luce perfettamente collimata con lente alla distanza focale ma spostata; luce che punta lo spot d'interesse

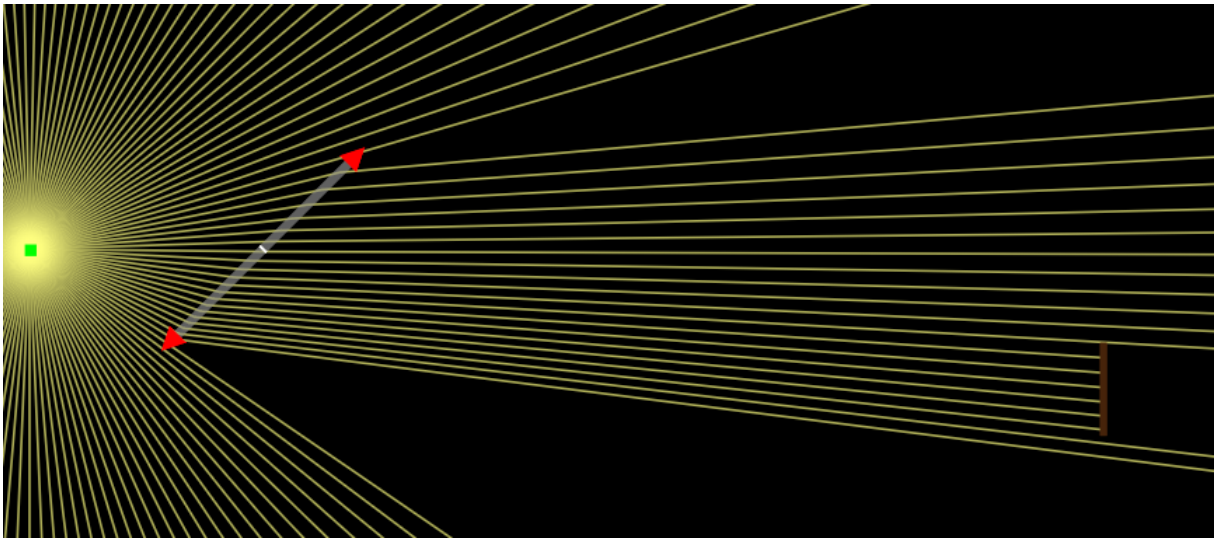


Figura 4.3.11 Luce non collimata perché con lente inclinata solo un punto è alla distanza focale, il centro della lente in questo caso; luce che punta lo spot d'interesse

Le figure 4.3.9, 4.3.10 e 4.3.11 estremizzano e spiegano ciò che si è visto su OptisWorks: vincolando la lente alla distanza focale e spostandola lungo quel piano si ottiene che la luce è sempre collimata ma punta verso uno spot d'interesse; diversamente, se si inclina la lente rispetto al suo centro, che resta alla distanza focale, verso uno spot, si ottiene che la luce non è più collimata ma osservando bene si nota anche che lo spot d'interesse viene illuminato con maggior densità di raggi rispetto al resto, quindi sembra che la luce illumini in quella direzione. Ancora più evidenti e complessi sono gli effetti che hanno gli stessi movimenti della lente quando la luce, invece di essere collimata come in partenza, è focalizzata, come in effetti interesserebbe avere sulla faccetta della fibra ottica, ma questo verrà visto in seguito.

Ora, proseguendo lo studio, si modifica il sistema utilizzato finora aggiungendo lo specchio dicroico e il LED posto a lato (525 nm), andando a completare il sistema base.

Uno schema semplificato del sistema che si utilizza per studiare le lenti in questa seconda fase (mancherebbe il LED a 525 nm) si ha in figura 4.3.12. Nel momento in cui viene aggiunto lo specchio, la luce, ad esclusione di quella del 525 nm, segue prima il percorso tratteggiato fino allo specchio e poi prosegue a destra con quello continuo, con quest'ultimo che si nota essere perfettamente simmetrico rispetto allo specchio in confronto a quello che farebbe senza di esso; in altre parole, prendendo come riferimento il punto "O" corrispondente al centro dello specchio, si può dire che in assenza dello specchio la luce collimata è direzionata sul punto "A", mentre con lo specchio è direzionata sul punto "B", con le distanze OA e OB che sono uguali, quindi ci si aspetta di ottenere i medesimi risultati di prima ma sul punto B.

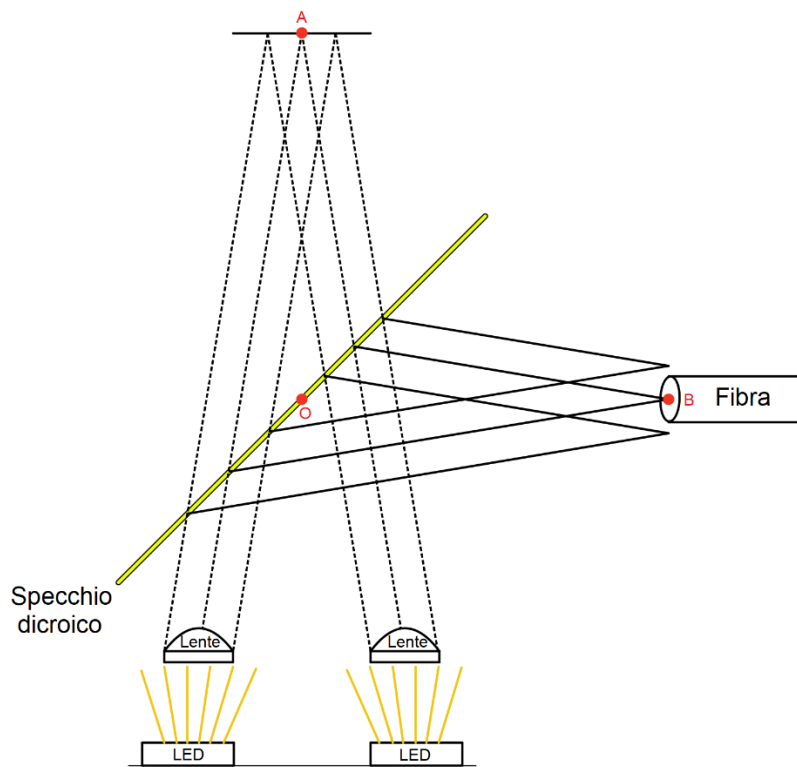


Figura 4.3.12 Schema semplificato del sistema realizzato in questa seconda fase per studiare il comportamento delle lenti

La figura 4.3.13 mostra ciò che si ha effettivamente realizzato in OptisWorks, ricordando che oltre allo specchio è stato aggiunto anche il LED posto a lato (525 nm).

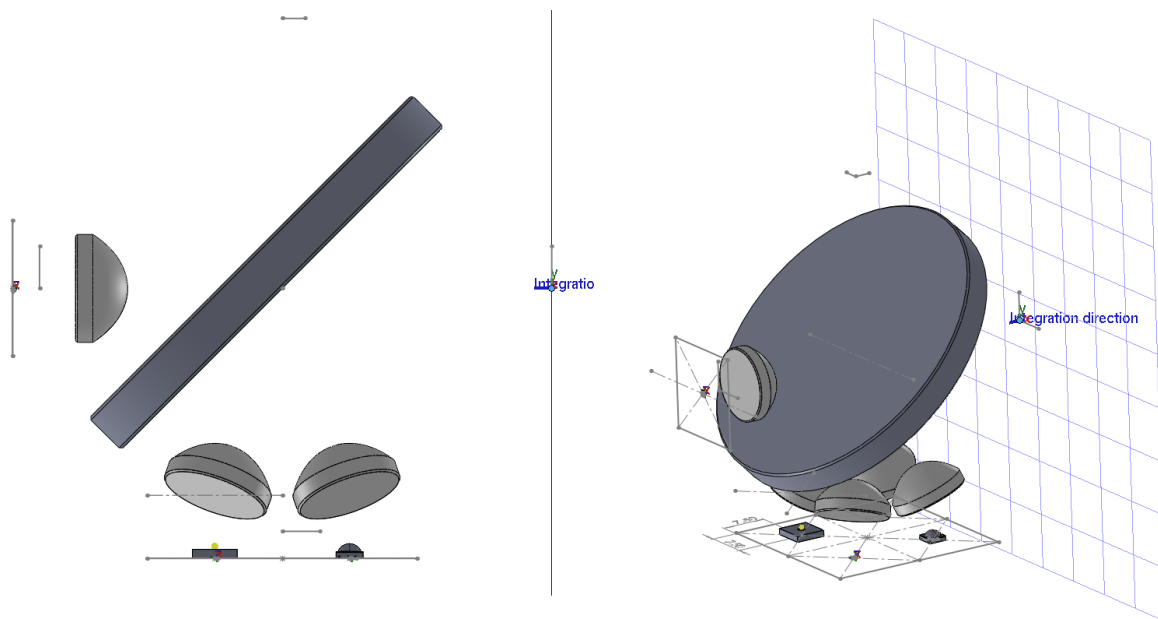


Figura 4.3.13 Sistema per studiare il comportamento delle lenti in questa seconda fase: a) vista laterale, b) vista in prospettiva

Il centro della faccia inferiore dello specchio, che è il punto O nominato prima, è posto a 30 mm di altezza, cioè a metà altezza tra il punto A e la base, in questo modo si ha anche la distanza $OA = 30 \text{ mm}$, che per quanto spiegato prima è uguale a OB . Si nota subito che lo specchio

utilizzato non è quello selezionato e di cui si è parlato in precedenza ma a livello funzionale è perfettamente identico ad esso, infatti appartiene alla stessa serie DMLP505, cambiano solo la forma e le dimensioni; nelle prime prove è stata fatta questa scelta per essere più conservativi, nel senso che non sapendo esattamente né l'area totale occupata dai coni di luce proiettati dalle lenti sullo specchio né la posizione precisa degli stessi, si è deciso di usare uno specchio di area maggiore. Dello specchio in questione, come per quello selezionato, si è importato il modello 3D fornito da Thorlabs e successivamente è stata creata "manualmente" la superficie diecrica usando il tool dedicato su OptisWorks insieme ai dati su riflessione e trasmissione presenti in un raw file sempre trovato nel sito di Thorlabs. Il LED a 525 nm è posizionato praticamente come quelli sulla base ma lateralmente, cioè è appoggiato a 30 mm di distanza dal centro della faccia inferiore dello specchio, solo che in questo caso può essere posizionato direttamente anche in asse con esso e con il punto B da illuminare, essendo l'unico LED a lato. A questo punto, con la presenza dello specchio e del LED laterale, possono essere ripetute le simulazioni con lenti a 27° di inclinazione e con lenti spostate di 2 mm, che danno i risultati nelle figure 4.3.14, 4.3.15, 4.3.16 e 4.3.17.

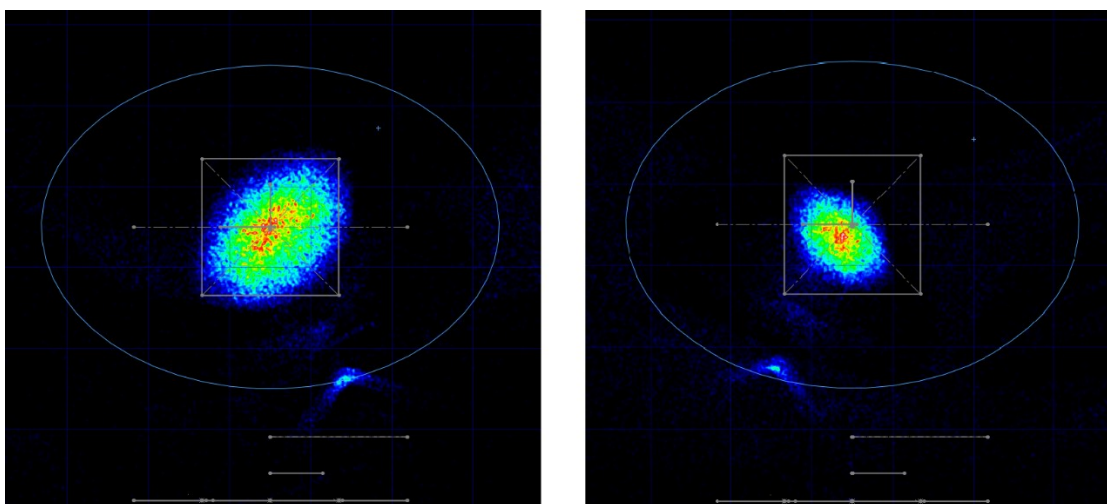


Figura 4.3.14 Lenti inclinate a 27°, luce di alcuni LED accesi singolarmente e riflessa dallo specchio: a) 420 nm, b) 490 nm

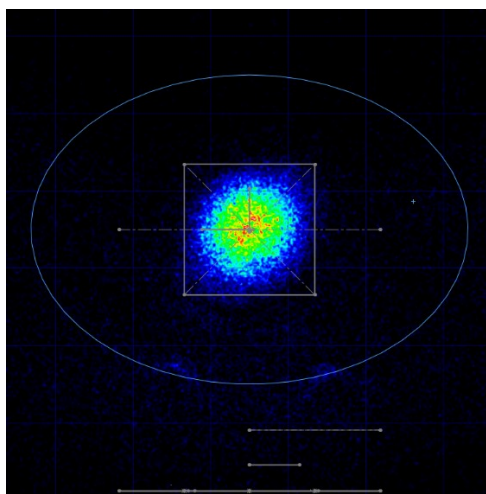


Figura 4.3.15 Lenti inclinate a 27°, luce di tutti i cinque LED accesi insieme con lo specchio (420, 453, 470, 490 e 525 nm)

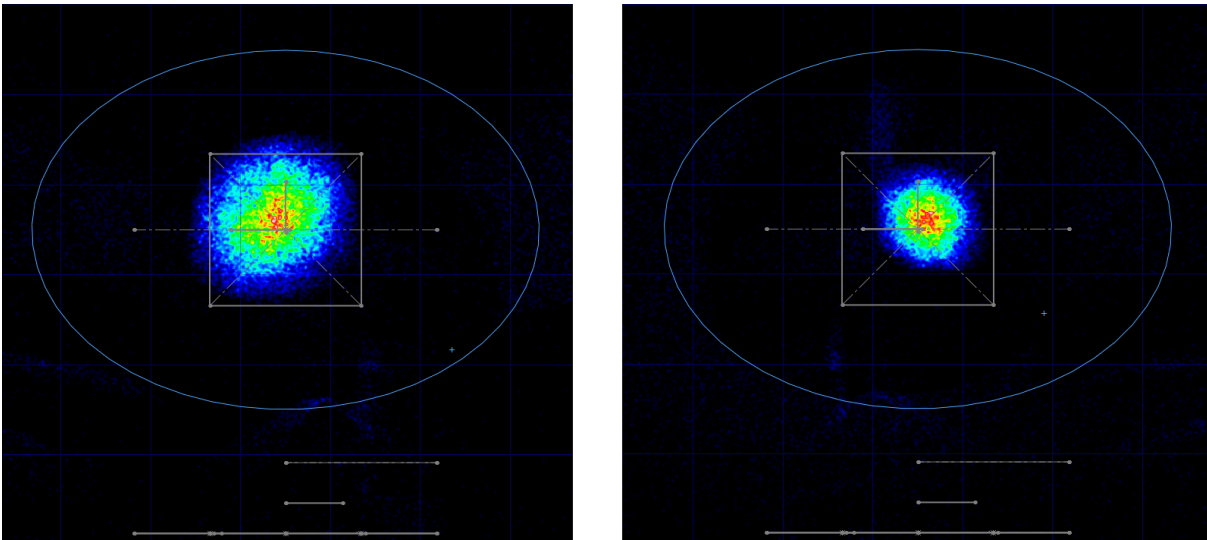


Figura 4.3.16 Lenti spostate di 2 mm, luce di alcuni LED accesi singolarmente e riflessa dallo specchio: a) 420 nm, b) 490 nm

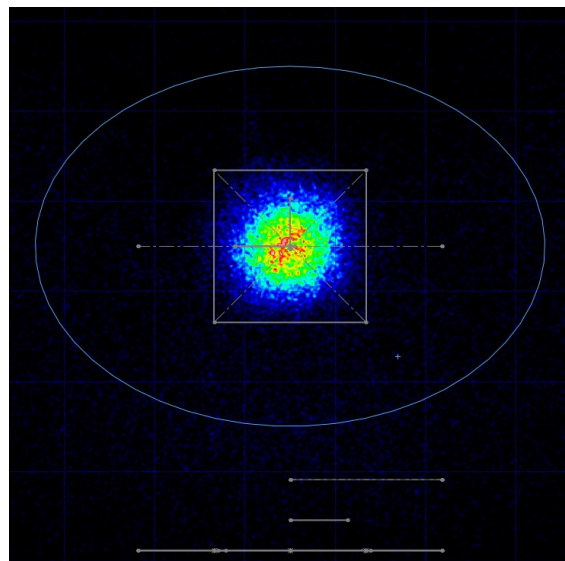


Figura 4.3.17 Lenti spostate di 2 mm, luce di tutti i cinque LED accesi insieme con lo specchio (420, 453, 470, 490 e 525 nm)

Quanto si è visto nello schema di figura 4.3.12 è effettivamente verificato nelle simulazioni: visivamente si ottiene praticamente ciò che si era ottenuto senza specchio, con la luce collimata e direzionata allo stesso modo ma che arriva però nel punto laterale B.

Si notano diversi puntini blu che rappresentano una sorta di luce di fondo, questa è presente probabilmente perché il sensore è posto lateralmente rispetto alle lenti e contemporaneamente è molto grande, quindi viene captata parte della luce dei LED che entra nelle lenti ma lo fa con un angolo troppo ampio e quindi esce in una maniera non prevedibile, ma anche parte di quella che non entra proprio in esse.

Una volta chiaro qual è il comportamento delle lenti nel momento in cui esse vengono mosse in una situazione di luce collimata ed una volta visto che mettere o non mettere lo specchio cambia visivamente solo il punto su cui la luce viene direzionata, si può procedere studiando il

comportamento delle lenti nel momento in cui esse vengono mosse in una situazione di luce focalizzata. Per capire cosa accade nelle diverse situazioni si è preferito usare direttamente il simulatore in 2D presente in rete [31] perché lo studio basato sulle immagini ottenute nel sensore in OptisWorks in questo caso risulterebbe troppo complicato e laborioso. Per prima cosa occorre focalizzare la luce e per farlo è necessario modificare la distanza sorgente-lente, in particolare:

- ad una distanza minore della lunghezza focale la luce diventa divergente;
- ad una distanza maggiore della lunghezza focale la luce diventa convergente, ovvero è focalizzata.

In entrambi i casi più si spinge con la rispettiva modifica della distanza e più forte è l'effetto che si ottiene: nel primo caso più la lente si avvicina alla sorgente e più la luce diverge fino ad arrivare al punto limite in cui la lente è talmente vicina che la luce praticamente diverge come farebbe normalmente senza lente, rendendo quest'ultima inutile; nel secondo caso più la lente si allontana e più la luce focalizza vicina rispetto alla lente, questo con un determinato limite legato alle caratteristiche della lente stessa.

Di seguito si osserva nelle figure 4.3.18, 4.3.19, 4.3.20 e 4.3.21 ciò che si è ottenuto simulando.

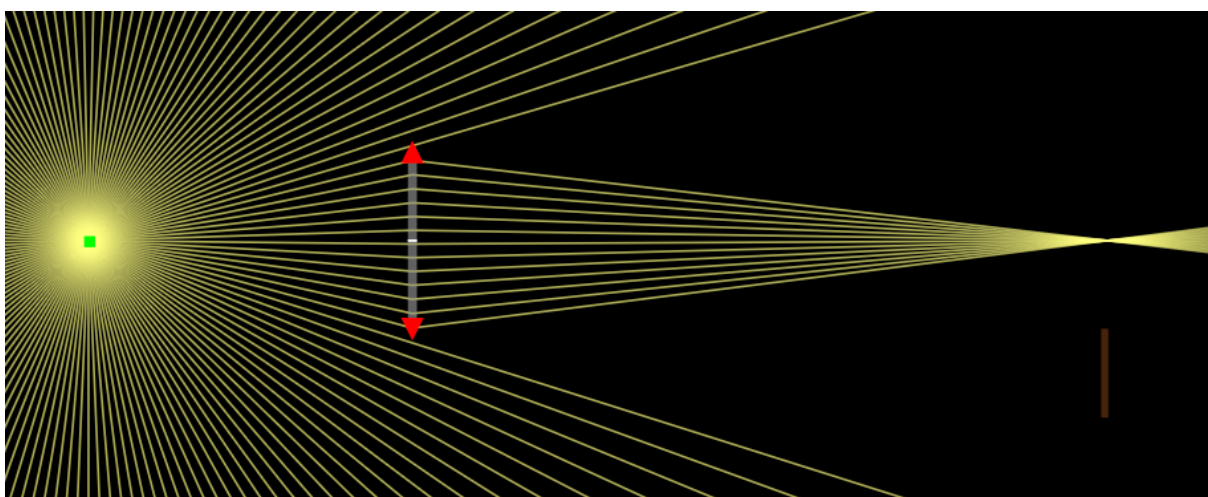


Figura 4.3.18 Luce focalizzata con lente centrata e ad una distanza tale che il fuoco si trova alla stessa distanza dello spot d'interesse

In figura 4.3.18 si osserva che ponendo la lente alla giusta distanza dalla sorgente si ottiene luce focalizzata con il fuoco alla stessa distanza dello spot d'interesse; ora non resta che muovere il fascio rispetto all'asse y in modo che arrivi nell'esatto punto desiderato.

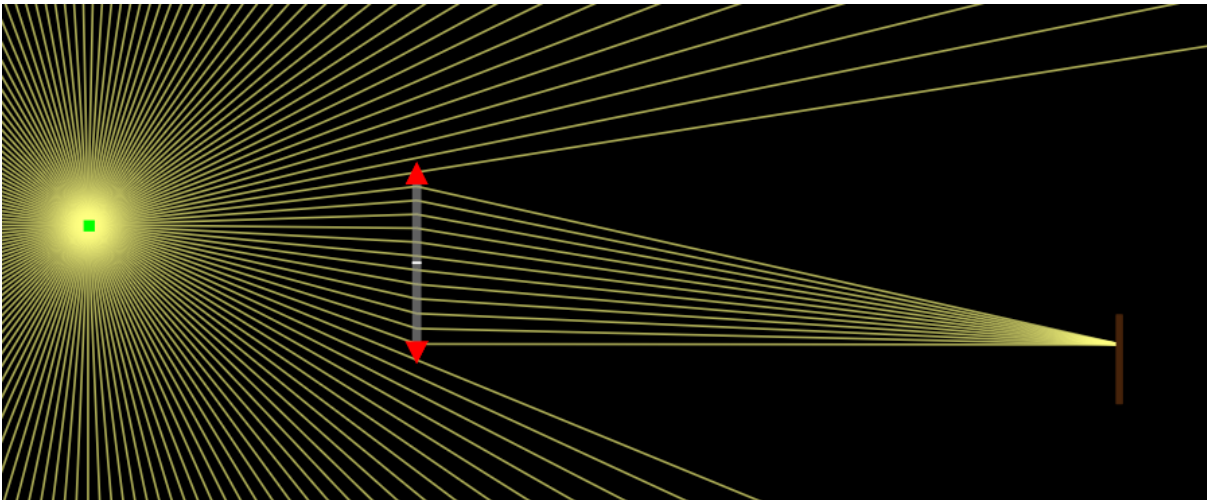


Figura 4.3.19 La lente è stata spostata rispetto a prima leggermente verso il basso spostando il fascio sul punto d'interesse

In figura 4.3.19 si nota che mantenendo la lente alla stessa distanza di prima ma spostandola lungo l'asse y , in questo caso, verso il basso si ottiene che il fuoco ha la stessa coordinata x di prima ma si è spostato lungo l'asse y insieme alla lente e ora si trova esattamente nel punto d'interesse; si ha quindi un comportamento molto simile a quanto visto nel caso di luce collimata nel senso che in entrambi i casi con lo spostamento eseguito la luce è rimasta collimata o focalizzata com'era ed è solo cambiata la direzione in cui era diretta.

Più difficile da analizzare è il caso con lente inclinata, come si vede nelle figure 4.3.20 e 4.3.21.

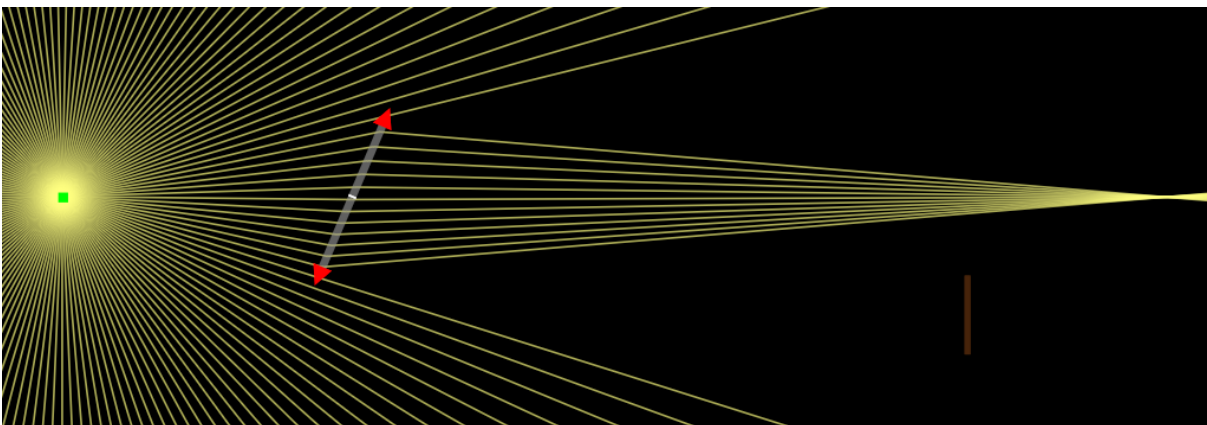


Figura 4.3.20 Il centro della lente si trova alla stessa distanza che aveva nella figura 4.3.18 ma la lente è stata inclinata e come conseguenza è cambiata la distanza del punto in cui la luce focalizza

È evidente dalla figura 4.3.20 che ponendo il centro della lente alla stessa distanza della figura 4.3.18 ma inclinando la lente, il punto in cui la luce focalizza, nonostante sia sempre sullo stesso asse di sorgente e centro della lente, ora si trova ad una distanza maggiore e non più quindi alla stessa distanza dello spot d'interesse. Inoltre, nella figura 4.3.21 si nota maggiormente anche un secondo effetto dovuto all'inclinazione della lente.

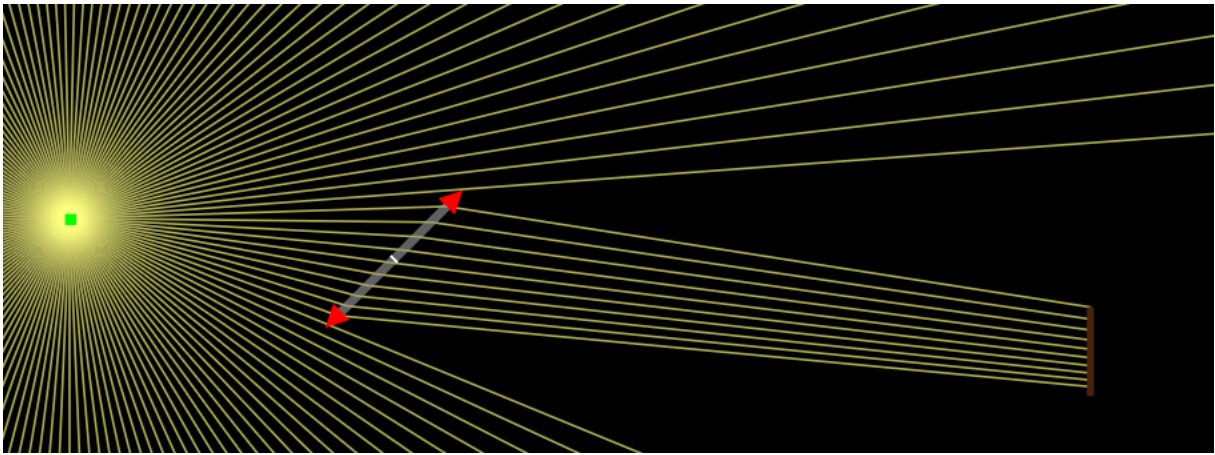


Figura 4.3.21 Dalla situazione di figura 4.3.19 si è inclinata la lente, cambiando la distanza di focalizzazione e anche leggermente la coordinata y

Nella figura 4.3.21 si vede che, partendo da come la lente è posizionata nella figura 4.3.19, si è mantenuto il suo centro nel medesimo punto ma si è inclinata un po' la lente: è evidente che, come visto anche nella figura 4.3.20, il punto in cui la luce focalizza si troverebbe più distante rispetto allo spot; meno evidente è il fatto che si ha avuto anche un leggero spostamento lungo l'asse y della luce, nel senso che, come nel caso con luce collimata, si ha una differenza di densità dei raggi che fa sembrare che la luce arrivi più in basso rispetto al punto d'interesse visto sempre in figura 4.3.19.

Riassumendo quanto trovato nel caso di luce focalizzata (riferendosi ad una situazione 2D):

- avvicinare/allontanare la lente rispetto alla sorgente ha l'effetto di modificare la distanza alla quale la luce viene focalizzata;
- spostare la lente lungo l'asse y non modifica la coordinata x del punto di focalizzazione ma lo sposta lungo l'asse y insieme alla lente;
- inclinare la lente, in generale, cambia la distanza di focalizzazione e anche leggermente la coordinata y della focalizzazione stessa rispetto al punto d'interesse.

Nel momento in cui si cerca di focalizzare al meglio la luce per ottenere maggiore potenza radiante sul punto desiderato, è necessario considerare e gestire tutti e tre questi movimenti: per quanto visto si potrebbe pensare che per focalizzare la luce su un punto qualunque sia sufficiente posizionare la lente ad una certa altezza dal LED e spostarla di qualche millimetro, ma bisogna considerare anche che nella realtà l'azione di spostamento non è libera, anzi ha spesso limiti fisici ben precisi, nel caso del sistema in questione, per esempio, ci sono le altre lenti, cioè nella realtà esse al massimo possono toccarsi nel momento in cui si spostano ma di certo non possono sovrapporsi o passarsi attraverso reciprocamente come invece può avvenire al simulatore; per risolvere la situazione è sufficiente diminuire il valore dello spostamento e aggiustare la focalizzazione usando appunto anche il terzo movimento, l'inclinazione.

Compresi anche gli effetti che hanno i vari movimenti delle lenti in condizione di luce focalizzata, si può procedere nel cercare di raggiungere la soluzione ottimale per questo sistema base.

Proprio per gli studi fatti finora è evidente la questione che focalizzare la luce su un'area di 1 mm x 1 mm posta ad una certa distanza con la maggiore potenza radiante possibile è un'operazione tutt'altro che banale e lineare: sicuramente è possibile calcolare matematicamente a priori qual è la posizione ottimale per le lenti, ma farlo è certamente un'operazione molto complessa in cui vanno considerate moltissime variabili; risulta più conveniente, piuttosto, procedere per analisi sperimentali successive, sfruttando lo studio appena svolto sugli effetti che hanno i vari movimenti.

Visti i molti gradi di libertà, conviene toglierne uno decidendo preliminarmente a che distanza si vuole effettivamente focalizzare la luce; allora si mantiene il sistema come mostrato in figura 4.3.13 e come descritto sotto di essa, con le sole differenze che:

- ora la distanza OB si è scelta di 19 mm invece che 30 mm;
- si ha lo specchio rettangolare selezionato, DMLP505R;
- la posizione delle lenti è determinata mediante le prossime prove.

Si ottiene ciò che è illustrato in figura 4.3.22.

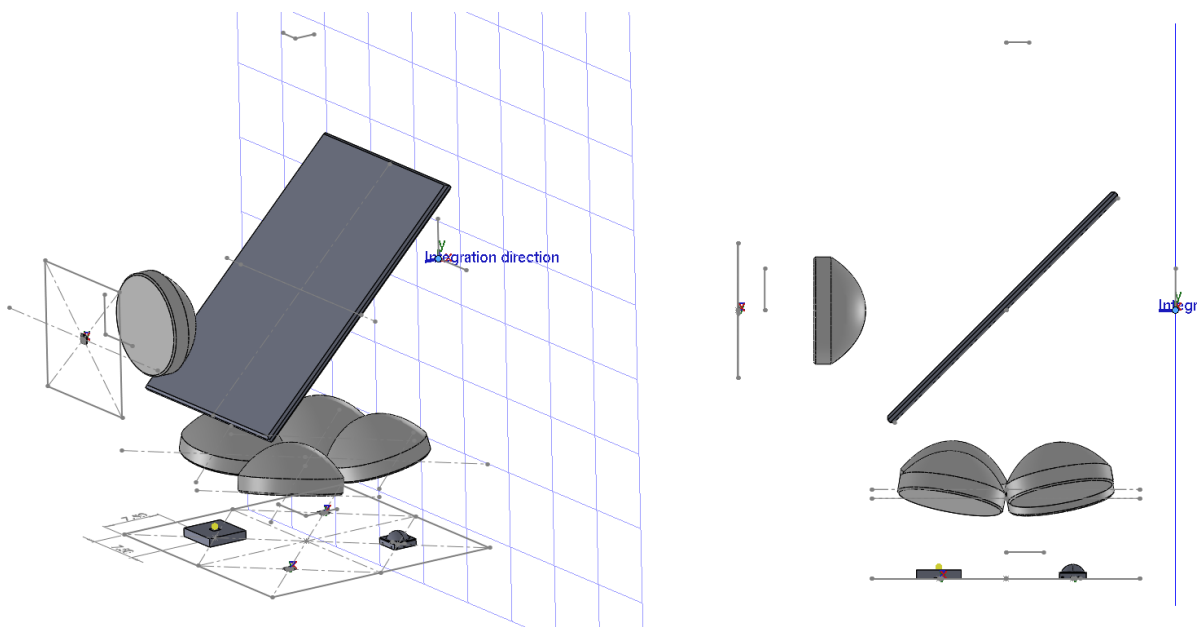


Figura 4.3.22 Sistema che una volta aggiustato (posizione delle lenti) costituisce la soluzione ottimale: a) vista in prospettiva, b) vista laterale

Scegliere $OB = 19$ mm significa scegliere che la luce dei LED focalizzi a $30+19$ mm = 49 mm di distanza perché, come già spiegato in precedenza, la presenza dello specchio modifica solo la direzione in cui viaggia la luce ma non le distanze; va notato che con questa scelta il punto

B si trova al limite dell'essere sotto lo specchio, ma questa vicinanza è necessaria perché teoricamente così facendo, per un discorso anche legato all'etendue della lente, la luce arriva sullo spot con un'apertura angolare maggiore ma allo stesso tempo con un'area minore, in questo modo ci si avvicina al valore dell'area della faccetta della fibra e si cerca di perdere così meno luce, ma è ovvio anche che si debba mantenere un certo equilibrio e non avvicinarsi troppo: va ricordato che anche la fibra ha la sua etendue, con l'area della sua faccetta e il cono di accettazione, quindi potrebbe essere inutile raggiungere con la luce focalizzata la stessa area se poi si ottenesse che essa ha un'apertura angolare molto più grande del cono di accettazione e quindi comunque delle perdite.

Alla distanza di focalizzazione citata, dopo numerose prove per ogni singolo LED, la massima potenza radiante in un'area di 1 mm^2 nel punto B è stata trovata con le lenti nelle posizioni indicate nella tabella 4.3.1: la prima colonna dice a quale lente ci si riferisce riportando la lunghezza d'onda del corrispettivo LED che la illumina; la seconda riporta a quale altezza (o distanza) si trova il piano immaginario dove la lente appoggia rispetto alla base dove è posizionato il corrispettivo LED; la terza e la quarta mostrano lo spostamento e l'inclinazione che la lente ha, entrambi fatti nelle stesse direzioni delle prove già viste in precedenza (verso l'asse immaginario che passa per il centro della base disegnata su cui poggiano i LED). Per il LED a 525 nm non c'è bisogno di fare nessuno spostamento o inclinazione perché essendo il solo posto a lato è ovviamente già posizionato in modo che il proprio centro sia allineato con il punto B da illuminare, come già detto in precedenza.

λ [nm]	Altezza [mm]	Spostamento [mm]	Inclinazione [°]
420	10	2.1	10
453	9	1.8	15
470	10	1.9	15
490	9	1.8	15
525	8.5	---	---

Tabella 4.3.1 Posizione delle lenti per le quali si è ottenuta la massima potenza radiante in un'area di 1 mm^2

Nella figura 4.3.23 è mostrato che potenza radiante il sensore posto in B ha misurato nell'area di 1 mm^2 con le lenti posizionate come detto in precedenza; inoltre, si può notare anche lo spot totale che effettivamente viene illuminato. Come si vede chiaramente nel riquadro rosso, il flusso (potenza) radiante $\Phi_{e,sistema}$ ottenuto è:

$$\Phi_{e,sistema} = 0.102 \text{ W} \quad , \quad (4.3.1)$$

ciò significa che, avendo impostato ogni singolo LED con $\Phi_{e,LED} = 1 \text{ W}$, l'efficienza di questo sistema risulta:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{5 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.102 \text{ W}}{5 \text{ W}} \cdot 100 \cong 2 \% . \quad (4.3.2)$$

Viste tutte le modifiche e le numerose prove fatte su questo sistema base, si può pensare che la potenza che è stata ottenuta nell'area di 1 mm^2 (a distanza di 49 mm), e quindi l'efficienza, siano le massime possibili per tale sistema base così come è stato concepito; quindi, si può concludere che si è trovata la soluzione ottimale per il sistema base in questione, cioè quello che si riferisce al tipo di sistema con specchi diecrici.

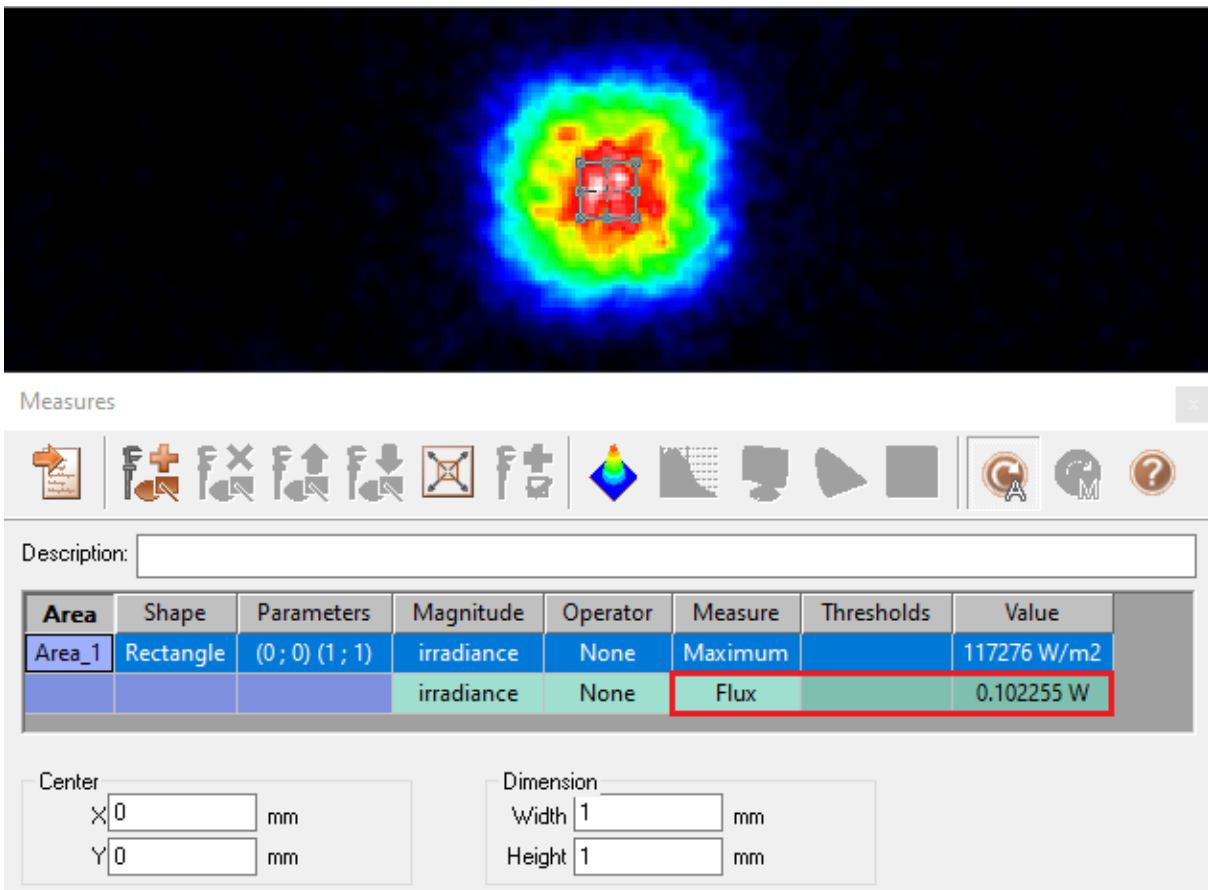


Figura 4.3.23 Potenza radiante massima in 1 mm^2 che è stata ottenuta e luce sullo spot

Infine, in tabella 4.3.2 è mostrato quanto ottenuto in uscita su 1 mm^2 con ogni singola componente spettrale; con gli stessi dati si è costruito in figura 4.3.24, in maniera molto approssimata, lo spettro complessivo della radiazione ottica in uscita su 1 mm^2 .

λ [nm]	O.P. [W]	Eff
420	0.026	2.6 %
453	0.025	2.5 %
470	0.014	1.4 %
490	0.019	1.9 %
525	0.018	1.8 %
	O.P. tot [W]	Eff media
	0.102	2 %

Tabella 4.3.2 Risultati ottenuti in uscita con ogni singola componente spettrale

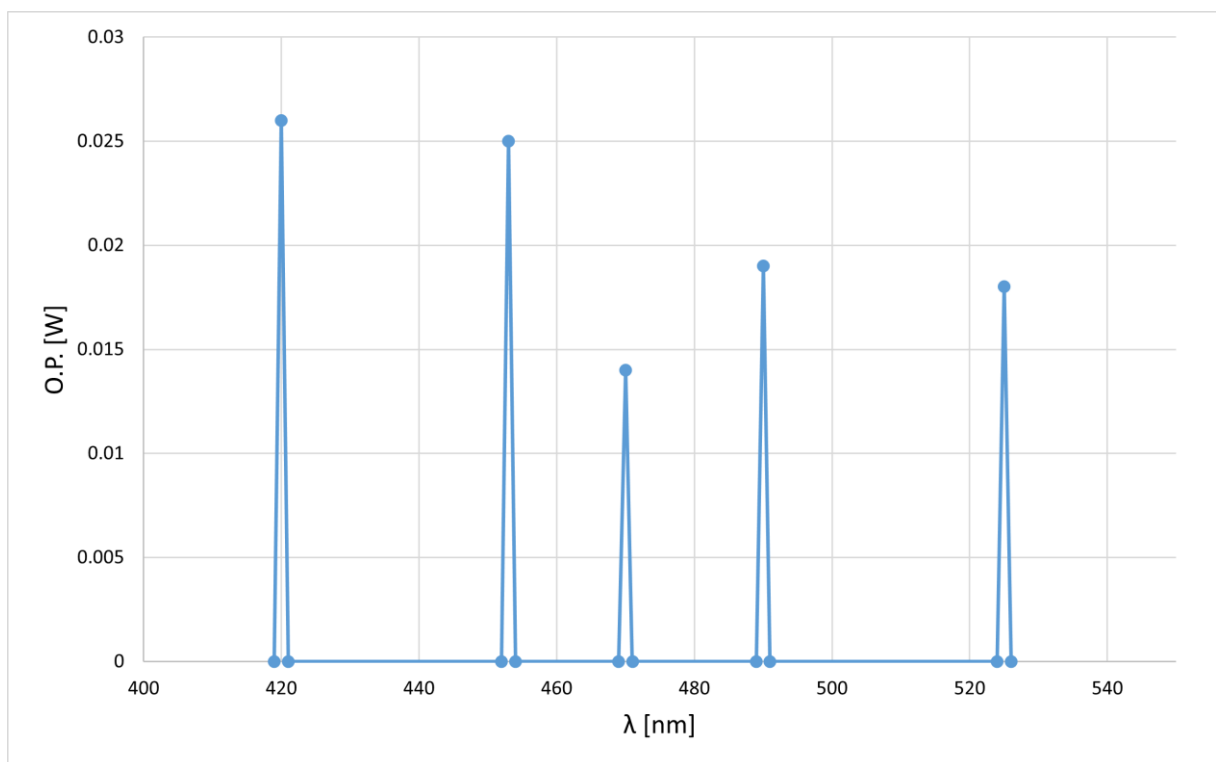


Figura 4.3.24 Spettro complessivo (molto approssimato) della radiazione ottica in uscita

4.4 Osservazioni e conclusioni

L'efficienza del 2% trovata non è affatto bassa come si potrebbe pensare e verrà utilizzata come metro di paragone per gli altri due tipi di sistema. Alla fine, questo valore è frutto delle perdite di luce e quindi di potenza che si hanno all'interno del sistema dovute a vari fattori, tra i quali:

- le caratteristiche delle lenti, tra cui la differenza di etendue che c'è rispetto a quella dei LED, non permettono di catturare tutta la luce emessa dai LED;

- il fatto di allontanare le lenti dai LED per mettere a fuoco la luce ad una certa distanza contribuisce a far perdere ulteriore luce diretta dai LED alle lenti;
- spostare sempre più le lenti dalla posizione in cui sono perfettamente centrate rispetto ai LED significa catturare luce via via meno intensa dagli stessi, invece inclinarle vuol dire ridurre l'area efficace con la quale le lenti catturano la luce dei LED (“coprono” un'area inferiore sopra i LED), in entrambi i casi si riducono la luce e la potenza in uscita;
- lo specchio, come già discusso e visto dai grafici, è tutt'altro che ideale, nel senso che esso ha una riflessione e trasmissione che non sono del 100 % oltre che una certa banda di transizione attorno a 505 nm, tutte cose che fanno perdere luce tramite il suo utilizzo;
- le lenti sono fatte di vetro B270 e come visto nel paragrafo precedente, al grafico di figura 4.2.8, questo materiale consente di trasmettere circa il 90% della luce entrante, perdendo il restante 10%;
- è stato detto che il centro del LED a 525 nm è stato posto in asse con il centro della faccia inferiore dello specchio, ovvero il punto O, e il punto B, ma in realtà per correttezza sarebbe stato da porre leggermente più in alto in quanto lo specchio con il suo substrato ha causato una piccola deflessione in basso della luce che lo ha attraversato e di conseguenza con questo LED non si ha avuto il fuoco centrato esattamente nel punto desiderato ma leggermente più in basso, quindi una perdita, seppur minima, c'è stata anche per questo motivo.

Si può affermare che le prove fatte sul sistema base si siano rivelate utili ed esplicative rispetto al funzionamento dello stesso, facendo nascere spontaneamente diverse osservazioni.

La prima osservazione riguarda la questione che tutti i quattro LED del gruppo sotto allo specchio sono posizionati in maniera simmetrica rispetto al punto dove devono focalizzare la propria luce, ciononostante le lenti sono ognuna in una posizione diversa nella soluzione ottimale: questo molto probabilmente è dovuto al fatto che ogni LED è diverso sia per forma che per dimensioni, quindi per ottenere lo stesso effetto le lenti devono essere messe ad altezze e in posizioni diverse per ognuno, eccetto che per il 453 e 490 che infatti sono fisicamente e otticamente identici.

Un'altra osservazione è che, come mostrato nella figura 4.3.23, lo spot della luce in uscita è superiore a 1 mm^2 , infatti approssimativamente risulta $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, il che è perfettamente accettabile perché comunque lo scopo come già spiegato e motivato non era ottenere un'area illuminata di 1 mm^2 , ma semplicemente massimizzare la potenza e quindi l'efficienza all'interno di 1 mm^2 al di là dell'area totale illuminata e questo è stato fatto. In ogni caso, come già detto in precedenza, si è cercato comunque di focalizzare e avvicinarsi con l'area della luce

al valore dell'area della fibra, ma cercando allo stesso tempo di non esagerare per mantenere un certo equilibrio con l'angolo con il quale i raggi arrivano sullo spot, altrimenti, dato il cono di accettazione della fibra, si perderebbe comunque della luce: in realtà non è stata eseguita alcuna prova per misurare con che angolo effettivamente arrivino i raggi sullo spot, ma è possibile calcolarlo matematicamente nel momento in cui si conoscono esattamente la posizione e dimensioni della lente e la posizione e dimensioni dello spot di arrivo della luce; senza riportarne i conti si può dire di essere tranquillamente ben all'interno del cono di accettazione.

Un'ulteriore osservazione, questa volta un aspetto negativo, riguarda la questione che il sistema completo è formato da numerosi specchi e LED: essendo che ovviamente ogni specchio si trova ad una distanza diversa rispetto alla fibra, la distanza di focalizzazione cambia per ogni gruppo di LED e oltretutto, contemporaneamente, va ricordato che i LED non sono tutti uguali tra di loro; tutto questo porta all'avere posizioni e altezze delle lenti diverse per ogni singolo LED e quindi per ognuno di essi vanno ripetute tutte le numerose prove per tentativi fatte con il sistema base e, anche se le azioni da fare sono ogni volta più o meno le stesse, tutto ciò richiede molto tempo.

Per concludere, va ricordato che per il sistema completo, se si vuole mantenere la geometria così come pensata, vanno trovati degli specchi con delle bande di trasmissione e riflessione più ampie e costanti rispetto a quello utilizzato fino ad ora, altrimenti come è già stato spiegato si avrebbero grossi problemi nel riuscire a miscelare la luce di tutti i LED del sistema.

Capitolo 5

Sistema con light pipe homogenizing rods

In questo capitolo viene inizialmente illustrato il funzionamento teorico del tipo sistema con light pipe homogenizing rods. Successivamente, viene presentato il sistema base, che è una sorta di prototipo del sistema al completo che però utilizza solo un insieme ristretto di LED; di esso viene mostrato in particolare il rod che è stato utilizzato per realizzarlo, con le sue specifiche. Dopodiché, vengono mostrate tutte le numerose modifiche, simulazioni e misurazioni che sono state svolte su tale sistema base per arrivare alla sua soluzione ottimale. Infine, vengono tratte alcune osservazioni e conclusioni riguardanti questo tipo di sistema.

5.1 Principio di funzionamento

Il funzionamento di questo tipo di sistema è concettualmente semplice: i rods fanno viaggiare la luce al proprio interno per riflessione interna totale grazie alla differenza di indice di rifrazione che c'è tra il loro materiale e l'aria all'esterno, quindi semplicemente ponendo i LED davanti ad una o più facce si ottiene che la loro luce viaggia all'interno del rod ed esce fuori miscelata in un certo modo da un'altra faccia, alla quale si pone di fronte la fibra ottica. Se nel tipo di sistema con specchi diecrici l'idea su come costruire il sistema completo è apparsa chiara fin da subito, qui non lo è affatto, infatti è stata data una spiegazione molto generica del funzionamento; se nel caso precedente si è partiti proprio dall'idea di sistema completo per estrarne un sistema base, qui in sostanza si è fatto il contrario, cioè prima si è assemblato e studiato il sistema base trovandone la soluzione ottimale e poi si è deciso come costruire il sistema completo.

L'unica cosa certa nel sistema completo è che si utilizzano i rods per miscelare e portare alla fibra la luce dei LED, invece i punti da chiarire attraverso lo studio del sistema base sono:

- il numero, la forma e le dimensioni dei rods da usare;
- la faccia o le facce del/i rod/s da usare, perché in linea di principio sono utilizzabili tutte le facce, sia quelle laterali che le due basi;
- L'utilizzo di lenti oppure no.

5.2 Prototipo di sistema e componenti ottici utilizzati per realizzarlo

Nel sistema con specchi diecrici, la soluzione ottimale non differiva molto dal suo sistema base, semplicemente il sensore era posto ad una distanza diversa e le lenti erano posizionate in modo da massimizzare la potenza su 1 mm^2 ; questa è una conseguenza del fatto che il sistema base è stato costruito in una maniera ben precisa partendo dal sistema completo. Invece, come già detto nel paragrafo precedente, per il tipo di sistema con rods c'è molta libertà progettuale per la realizzazione del sistema completo, di conseguenza il sistema base è realizzato praticamente da zero ed in maniera molto generale e semplice, come mostrato dalla figura 5.2.1, pertanto potrebbe essere che la soluzione ottimale trovata differisca molto da questo: si ha un rod esagonale che ha davanti ad una delle sue due basi il gruppo di LED scelto, mentre davanti all'altra, che si intende trattare come uscita, ha un sensore per misurare qual è la potenza radiante su 1 mm^2 e rappresentante la fibra ottica.

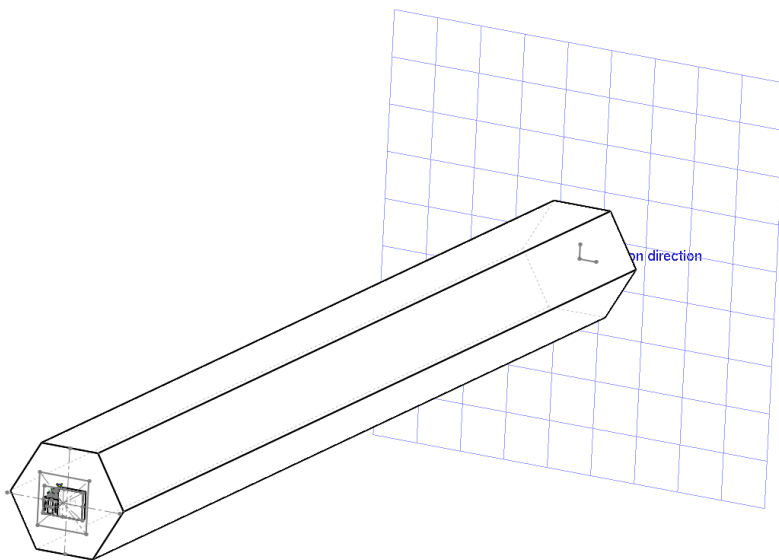


Figura 5.2.1 Sistema base per questo tipo di sistema

Guardando meglio come è costruito il sistema base, l'insieme di LED scelto è lo stesso del sistema con specchi diecrici, cioè i LED a 420, 453, 470, 490, 525 nm e sempre impostati ad 1 W ognuno, così da confrontare al meglio le prestazioni dei due sistemi in maniera indipendente dai LED usati, visto che sono gli stessi. I LED del gruppo sono posizionati per occupare meno area possibile, come in figura 5.2.2, in modo che siano più facili da accoppiare con la base del rod; saldarli fisicamente così vicini è fattibile, anche se chiaramente complicato, però ciò che bisogna sempre ricordare è che in questa situazione va ben gestito il calore prodotto

dagli stessi se si vogliono limitare i meccanismi di non idealità e se si vuole evitare di danneggiare loro stessi e la PCB sulla quale sono saldati.

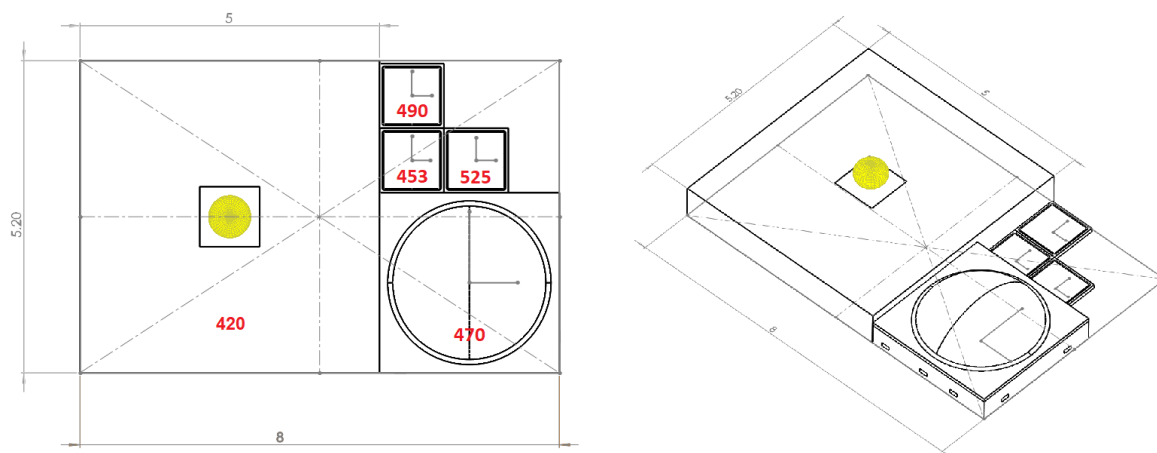


Figura 5.2.2 Come sono posizionati i LED del gruppo scelto: a) vista da sopra, b) vista in prospettiva

Il rod utilizzato è tra quelli con substrato in vetro N-BK7 e base esagonale di Edmund Optics [32], in particolare quello con apertura di base (due volte l'apotema) di 20 mm e lunghezza del rod di 200 mm. L'aspetto che ha questo genere di rod è mostrato in figura 5.2.3, mentre le specifiche del modello utilizzato in questo sistema base sono a figura 5.2.4.

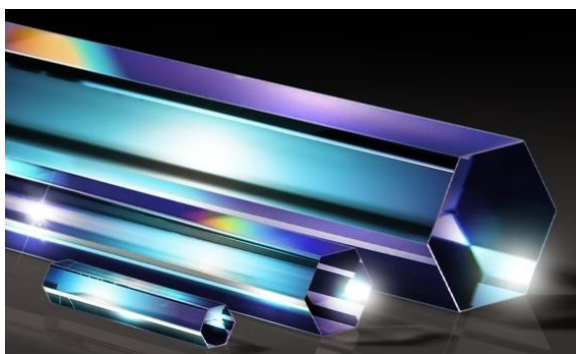


Figura 5.2.3 Light pipe homogenizing rods di vetro N-BK7 e base esagonale di Edmund Optics [32]

Entrance and Exit Aperture (mm):	20.0	Parallelism (arcmin):	5.00
Length Tolerance (mm):	±0.3	Aperture Tolerance (mm):	±0.10
Image Orientation:	Light Homogenization	Light Source NA:	Standard
Wavelength Range (nm):	350 - 2200	Surface Flatness:	5λ
Coating:	Uncoated	Substrate:	N-BK7
Length (mm):	200.00	Surface Quality:	60-40
Type:	Light Pipe		

Regulatory Compliance

RoHS 2015:	Compliant	Reach 209:	Compliant
------------	-----------	------------	-----------

Figura 5.2.4 Specifiche del rod con apertura 20 mm e lunghezza 200 mm [32]

Nella figura 5.2.4 contenente le specifiche si nota che questo rod è adatto per lunghezze d'onda nella banda da 350 a 2200 nm, e se nel sistema base non si hanno problemi da questo punto di vista, lo stesso non si può dire per il sistema completo visto che c'è anche un LED a 275 nm, quindi questo è sicuramente un aspetto su cui fare attenzione.

5.3 Simulazioni svolte e risultati ottenuti

Partendo dal sistema base, la prima simulazione è svolta con il gruppo di LED perfettamente centrato rispetto alla base d'ingresso del rod e con il sensore posizionato esattamente sulla base di uscita il quale misura su 1 mm² la potenza $\Phi_{e,sistema} = 0.011 \text{ W}$, come mostrato in figura 5.3.1.

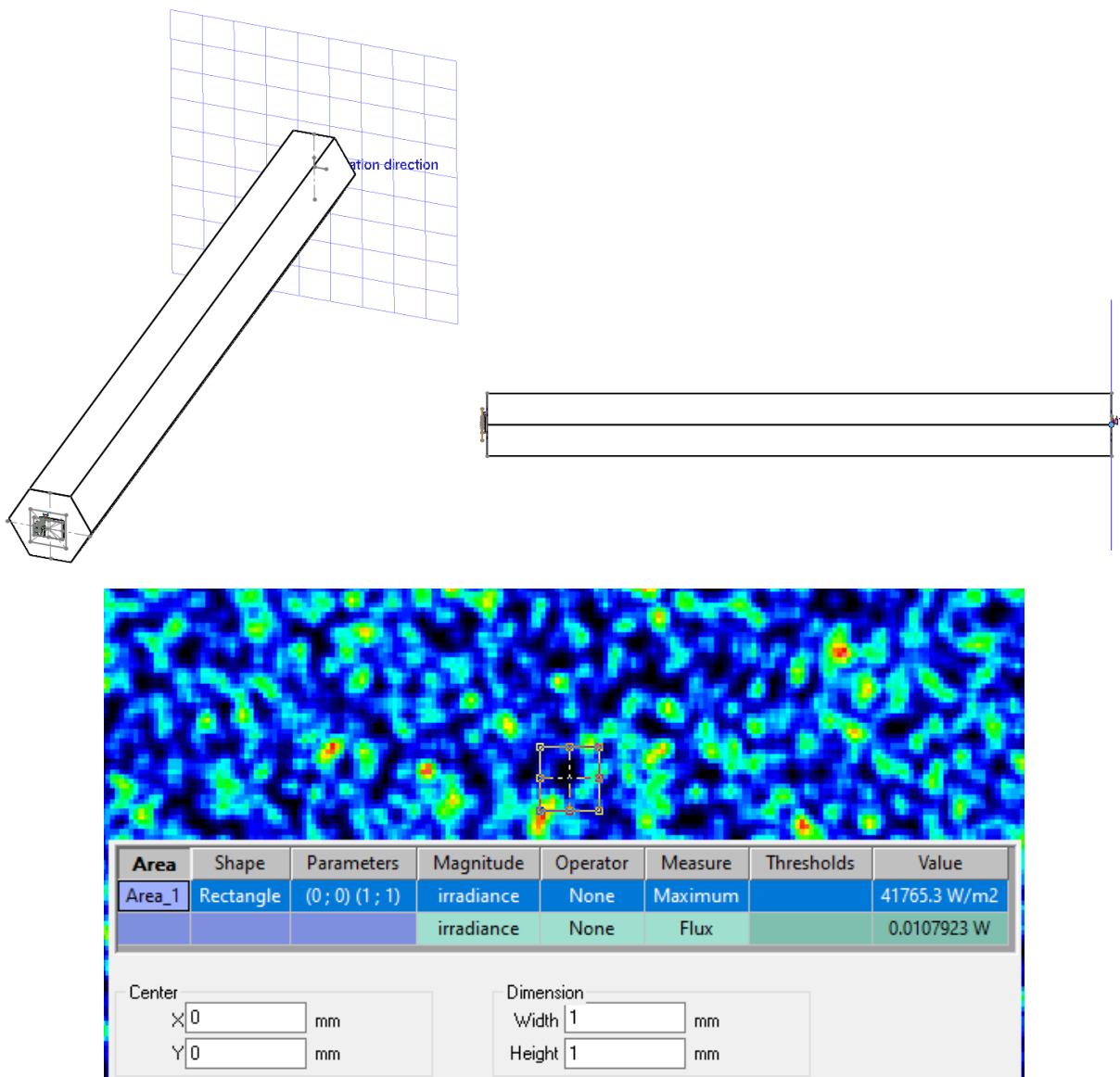


Figura 5.3.1 a) e b) come è configurato il sistema per questa prima simulazione; c) misura della potenza sull'area di 1 mm²

Evidentemente c'è ancora molto da provare e migliorare considerando il fatto che si è ottenuta una potenza quasi dieci volte inferiore rispetto al sistema con specchi diecrici e con gli stessi LED.

Allora, con il gruppo di LED posizionato come prima, è stata aggiunta una lente in uscita al rod posta ad una certa distanza, come in figura 5.3.2.a e 5.3.2.b. Le lenti si è deciso di prenderle sempre dalla serie a cui appartiene quella del sistema con specchi diecrici, cioè dalle lenti condensatrici asferiche in vetro B270 di Thorlabs [30], qualunque sia la dimensione da usare; in particolare, per questa simulazione, si è presa la lente ACL50832U con diametro 2 pollici (cioè 50.8 mm) e lunghezza focale posteriore di 17 mm, posizionata dalla base di uscita ad distanza maggiore di 17 mm per poter focalizzare la luce. Il problema è che nonostante la lente in questione sia abbastanza grande, come si vede sempre dalle figure 5.3.2.a e 5.3.2.b, non si può certo trattare la base del rod come una sorgente puntiforme, di conseguenza in questa situazione è complicato focalizzare la luce in uscita. Il meglio che si riesce ad ottenere con questa configurazione è nella figura 5.3.2.c, con la lente ed il sensore posti rispettivamente ad una distanza di 27 mm e 80 mm dalla base d'uscita del rod: il risultato è una potenza su 1 mm² pari a $\Phi_{e,sistema} = 0.008 \text{ W}$, addirittura peggiore della configurazione senza lente.

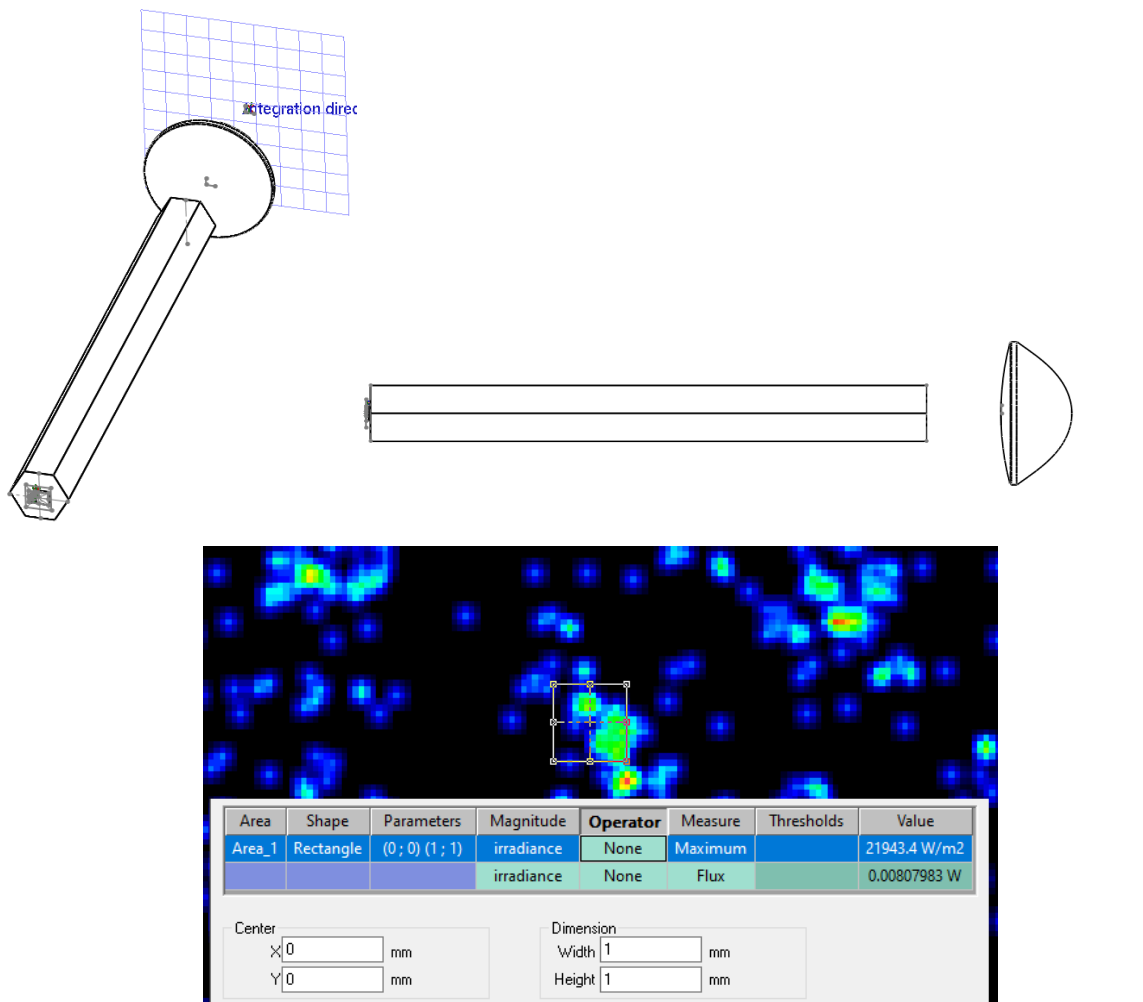


Figura 5.3.2 a) e b) come è configurato il sistema con lente; c) misura della potenza sull'area di 1 mm²

A questo punto, visti gli scarsi risultati appena ottenuti, si è pensato di invertire la lente rispetto il suo utilizzo abituale, come in figura 5.3.3.a e 5.3.3.b: il ragionamento è che una piccola parte dei raggi ha un angolo rispetto all'asse del rod talmente piccolo da riuscire ad attraversarlo direttamente senza riflessioni e da far pensare di approssimarli come raggi collimati; quindi, in questa situazione, se si inverte la lente la si usa praticamente al contrario, con questi raggi quasi collimati che entrano dalla faccia tonda della lente ed escono da quella piana focalizzati circa in un punto, secondo la lunghezza focale. Per questa prova si è utilizzata la lente ACL2520U con diametro 25 mm e lunghezza focale posteriore di 12 mm, posta attaccata alla base del rod con la faccia tonda. Teoricamente se i raggi fossero perfettamente collimati si otterrebbe la luce focalizzata ad una distanza dalla base del rod di 24 mm (12 mm di spessore della lente + 12 mm di lunghezza focale posteriore), ma siccome essi non lo sono, la focalizzazione avviene ad una distanza superiore, cioè a 26 mm, con una potenza su 1 mm² pari a $\Phi_{e,sistema} = 0.015 \text{ W}$, come mostrato nella figura 5.3.3.c, quindi meglio del risultato precedente e di quello senza lente ma sempre molto inferiore a quanto ottenuto con specchi diecrici. Inoltre, si può notare che la restante parte dei raggi, che hanno un angolo maggiore e rimbalzano all'interno del rod, formano tanti altri punti, ma questo effetto non è di interesse in questo momento.

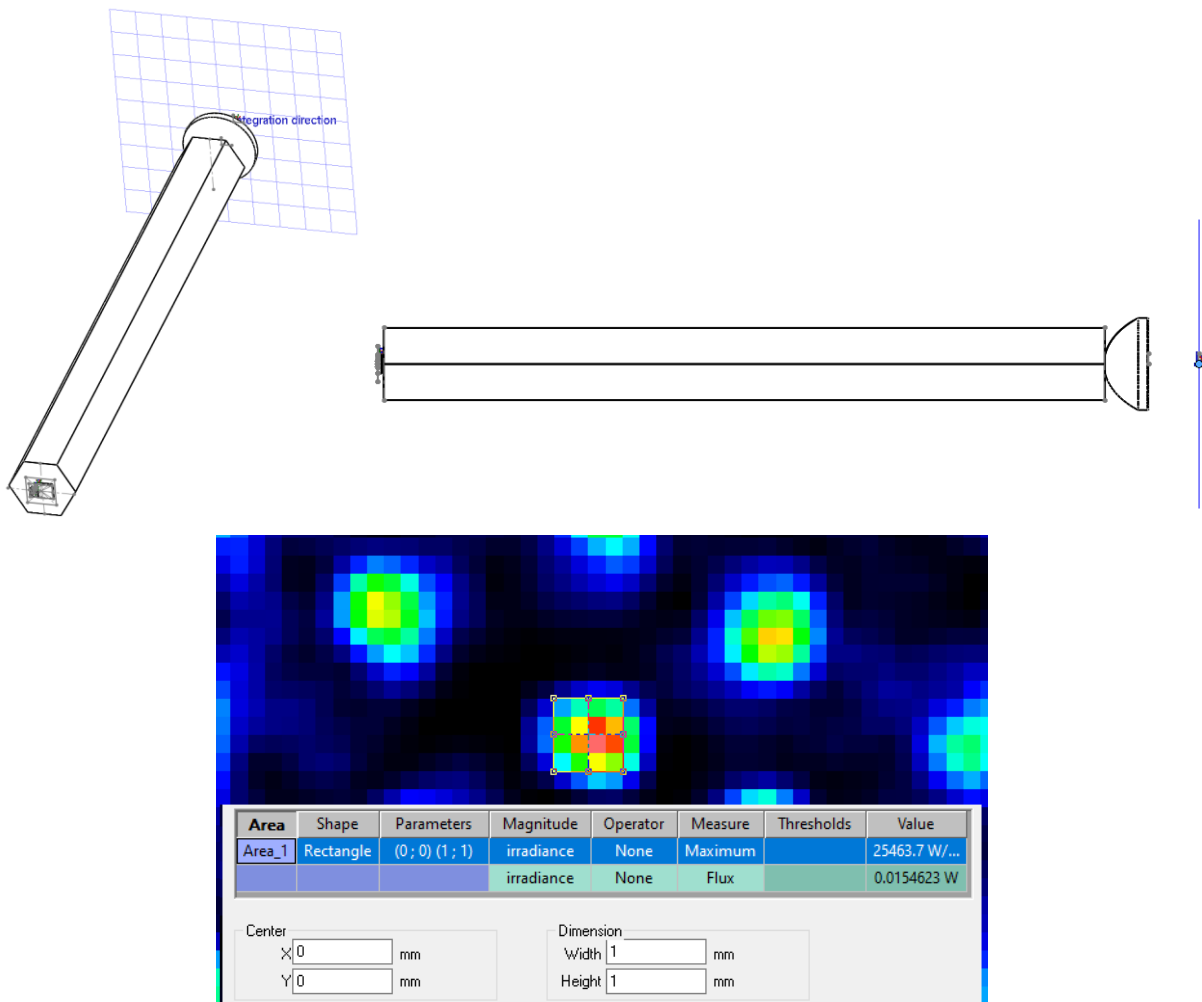


Figura 5.3.3 a) e b) come è configurato il sistema con lente al contrario; c) misura della potenza sull'area di 1 mm²

Ora, visto che i risultati ottenuti con il rod usato fin qui sono molto inferiori rispetto a quanto ottenuto in precedenza, si è provato a cambiarlo; si sono provati sia rods di misure diverse appartenenti sempre alla serie in N-BK7, che anche rods della serie con substrato di Fused Silica sempre di Edmund Optics [33]; quest'ultimi si differenziano dall'altra serie solo per le combinazioni apertura di base-lunghezza disponibili e ovviamente per il materiale del substrato, con quest'ultima cosa che permette di avere una banda di utilizzo più larga, da 200 a 2200 nm. Il risultato migliore, come si vede in figura 5.3.4, si è ottenuto con il rod della serie in N-BK7 con apertura di base 5 mm e lunghezza 120 mm, senza lenti e con gruppo LED centrato rispetto alla base d'ingresso e sensore posizionato esattamente sulla base d'uscita, proprio come all'inizio, con una potenza su 1 mm² pari a $\Phi_{e,sistema} = 0.086 \text{ W}$, vicina a quella con specchi dicroici. Probabilmente si sono ottenuti risultati migliori rispetto al rod 20 mm x 200 mm perché qui le basi sono più piccole: la base d'ingresso cattura così meno luce dai LED, ma questa perdita viene più che compensata dal fatto che anche la base d'uscita è più piccola e quindi la potenza sull'area di 1 mm² risulta essere una frazione maggiore di quella totale sulla base d'uscita rispetto a quanto lo fosse con l'altro rod.

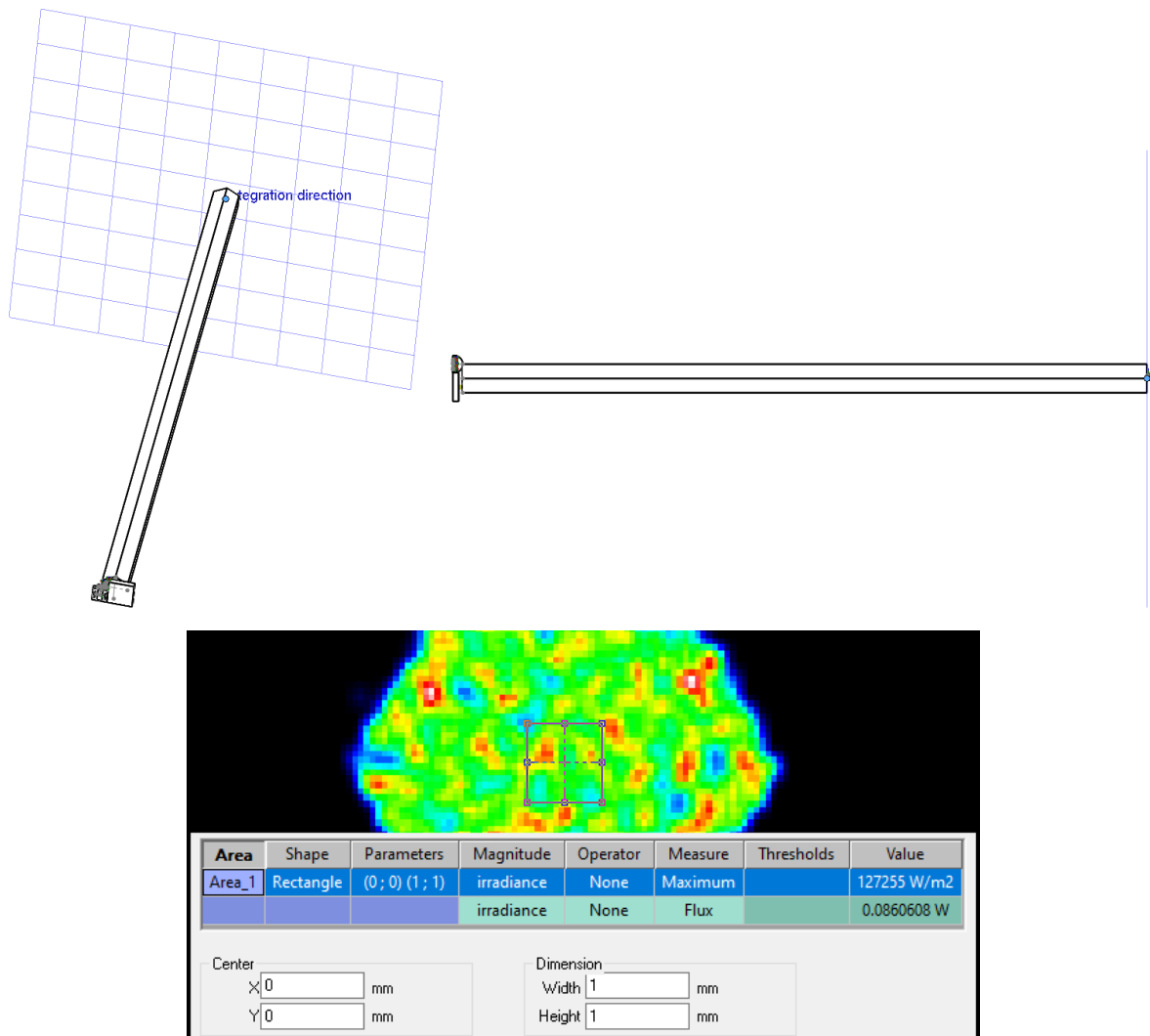


Figura 5.3.4 a) e b) come è configurato il sistema con rod 5 mm x 120 mm; c) misura della potenza sull'area di 1 mm²

Visto che anche quest'ultimo rod, nonostante i tentativi fatti con l'aggiunta di lenti, dà sempre risultati inferiori a quelli ottenuti nel sistema con specchi diecrici, è necessario cambiare strategia provando con rods di forma molto diversa: Edmund Optics offre anche i rods a base quadrata in vetro N-BK7 della serie denominata "tapered light pipe homogenizing rods" [34], fatti come in figura 5.3.5 e con le specifiche di figura 5.3.6.

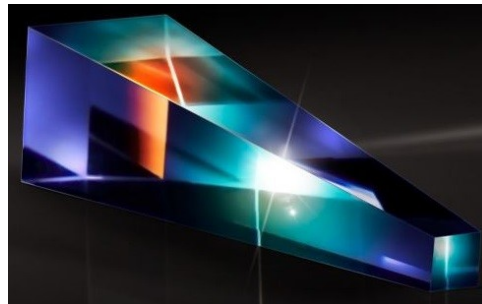


Figura 5.3.5 Tapered light pipe homogenizing rods di vetro N-BK7 di Edmund Optics [34]

Aperture Tolerance (mm):	±0.10	Coating:	Uncoated
Image Orientation:	Light Homogenization	Length Tolerance (mm):	±0.3
Parallelism (arcmin):	5.00	Substrate:	N-BK7
Surface Flatness:	1λ	Surface Quality:	60-40
Wavelength Range (nm):	350 - 2200		

Figura 5.3.6 Specifiche dei tapered light pipe homogenizing rods in vetro N-BK7 di Edmund Optics [34]

Essendo in vetro N-BK7 la banda di utilizzo torna ad essere da 350 a 2200 nm.

Questo tipo di rod normalmente è usato con la base più piccola come ingresso e con quella più grande come uscita; se si pone davanti alla base piccola una sorgente luminosa che emette con una certa apertura, per la forma che ha il rod e per le riflessioni che fanno i raggi all'interno di esso, sulla base grande in uscita si ha la stessa luce ma con un'apertura numerica inferiore.

Questi rod, per ogni valore d'area della base d'ingresso, sono disponibili di più lunghezze, 50 mm o 100 mm, e di più rapporti di ingrandimento, x2 o x3; per rapporto d'ingrandimento si intende il rapporto che c'è tra la misura dei lati della base di uscita rispetto a quelli della base di ingresso, per esempio il rod che ha base 2.5 mm x 2.5 mm è disponibile con base di uscita 5 mm x 5 mm oppure 7.5 mm x 7.5 mm.

Ci si sofferma un attimo considerando due rod di pari lunghezza. Il rapporto di ingrandimento sancisce quanto le pareti laterali siano inclinate rispetto all'asse del rod e questo a sua volta determina come i raggi vengano riflessi internamente; alla fine si ottiene che più il rapporto d'ingrandimento è alto e più le pareti sono inclinate e, di conseguenza, più l'apertura numerica della luce in uscita si riduce.

Ora, se al contrario ci si sofferma considerando due rod di pari rapporto di ingrandimento, si può notare che la lunghezza del rod sancisce quanto le pareti laterali siano inclinate rispetto all'asse del rod e questo a sua volta determina come i raggi vengano riflessi internamente; qui si ottiene che più il rod è corto e più le pareti sono inclinate e, di conseguenza, più l'apertura numerica della luce in uscita si riduce.

Visto che sono fornite diverse combinazioni tra lunghezze e rapporti di ingrandimento può essere scelto il rod più adatto per raggiungere l'effetto desiderato.

Tornando al sistema che si è interessati a sviluppare, qui si parte con un'area di emissione grande, data dai LED, e si cerca di arrivare in un'area piccola, che è quella della faccetta della fibra ottica, quindi l'idea è usare i rods in questione al contrario di quanto previsto normalmente, posizionando i LED di fronte alla base più grande del rod, mentre il sensore che rappresenta la fibra sulla base più piccola; questa scelta però non è esente da problemi, infatti usando il rod al contrario si potrebbe pensare che semplicemente, per quanto detto prima, la luce in uscita aumenti di apertura numerica rispetto a quella in ingresso invece di diminuire, ma purtroppo il discorso non è così semplice.

Si osserva cosa può accadere veramente con questa configurazione in figura 5.3.7, dove è rappresentato un generico raggio proveniente da una sorgente luminosa posta davanti alla base grande del rod.

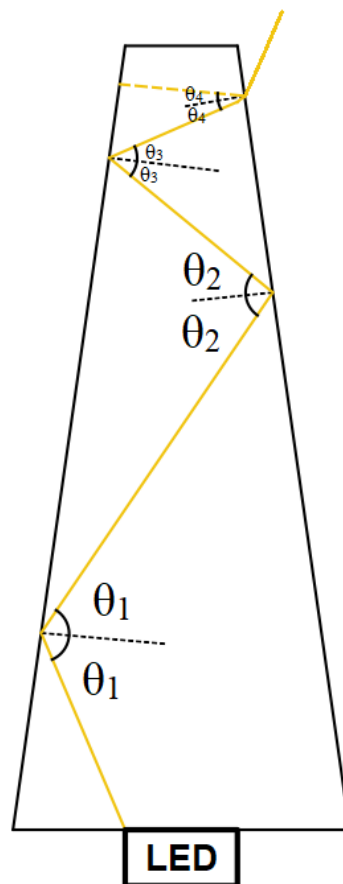


Figura 5.3.7 Riflessione di un raggio che dal LED entra nel tapered rod

Ciò che accade in figura 5.3.7 è che un raggio parte dal LED, entra nel rod, arriva sulla prima parete con un certo angolo rispetto alla sua normale e da qui viene riflesso specularmente rispetto alla stessa verso la parete successiva, solo che essendo le pareti inclinate si ottiene che progressivamente il raggio ha un angolo sempre minore fino a quando quest'ultimo diventa talmente piccolo da andare sotto l'angolo critico per la riflessione interna totale e da questo punto in poi il raggio ad ogni riflessione perde sempre più della sua potenza uscendo per trasmissione dal rod, fino a quando non resta più niente di esso. Alla fine, solo una piccola parte dei raggi dei LED ha un angolo d'ingresso adatto per riuscire ad arrivare fino alla fine del rod, tutti gli altri escono prematuramente e vengono persi; invece, nel funzionamento normale del rod le due quantità si invertono, cioè la maggior parte dei raggi riescono ad arrivare alla fine del rod mentre una piccola parte viene persa, infatti per come sono messe le pareti ad ogni riflessione si ottiene un angolo rispetto alla normale di quest'ultime via via sempre maggiore invece che minore, quindi è molto difficile che i raggi riescano ad uscire prematuramente. Entrambi i fenomeni possono essere verificati facendo una simulazione in ray tracing.

Con la configurazione che si è deciso di usare, nonostante le perdite che si hanno per il fenomeno appena descritto, si riesce a far entrare nel rod molta luce totale dai LED grazie all'area della base d'ingresso ampia e contemporaneamente, grazie all'area della base d'uscita piccola, la potenza sull'area di 1 mm^2 risulta essere una frazione grande di quella totale sulla base d'uscita.

Parlando di luce effettivamente uscente, attraverso la figura 5.3.7, anche se non è rappresentato il caso in questione, si può immaginare come anche i raggi che arrivano con successo alla fine del rod escano con un angolo di emissione sempre maggiore o uguale rispetto a quello d'ingresso; quindi, almeno parlando per i raggi effettivamente uscenti, accade il contrario rispetto al funzionamento normale, con l'apertura numerica della luce in uscita che aumenta rispetto a quella della corrispondente luce in ingresso.

Come nel funzionamento normale, va cercata la combinazione più adatta tra lunghezza del rod e rapporto di ingrandimento, perché dalle due cose dipende l'inclinazione che hanno le pareti e di conseguenza, in questo caso, l'intensità del fenomeno di perdita descritto prima; contemporaneamente va fatta una scelta anche per le dimensioni delle basi, trovando quelle più adatte per l'accoppiamento con i LED e con la fibra. I tapered rods forniti da Edmund Optics sono stati provati tutti, con il sensore sulla base più piccola e il gruppo di LED di fronte a quella più grande, sia in una posizione in cui quest'ultimo è centrato che in altre in cui è spostato più verso un lato. Alla fine, il risultato migliore è mostrato in figura 5.3.8 ed è stato ottenuto con il rod con base piccola $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, con rapporto di ingrandimento $\times 2$ cioè base grande $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, con lunghezza 100 mm e con gruppo di LED posizionato spostato di 0.6 mm verso

destra; la potenza su 1 mm^2 con questa configurazione è pari a $\Phi_{e,sistema} = 0.153 \text{ W}$, come mostrato in figura 5.3.8.c.

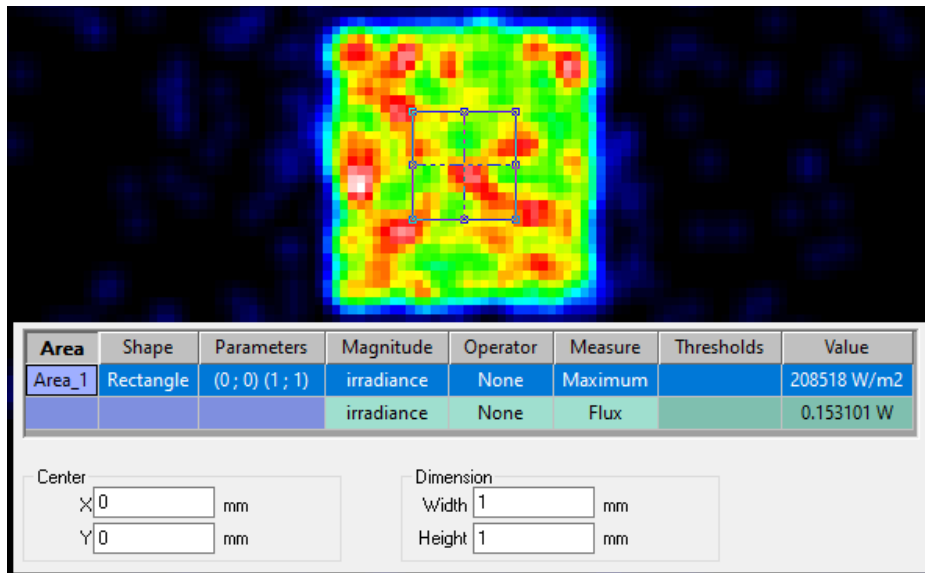
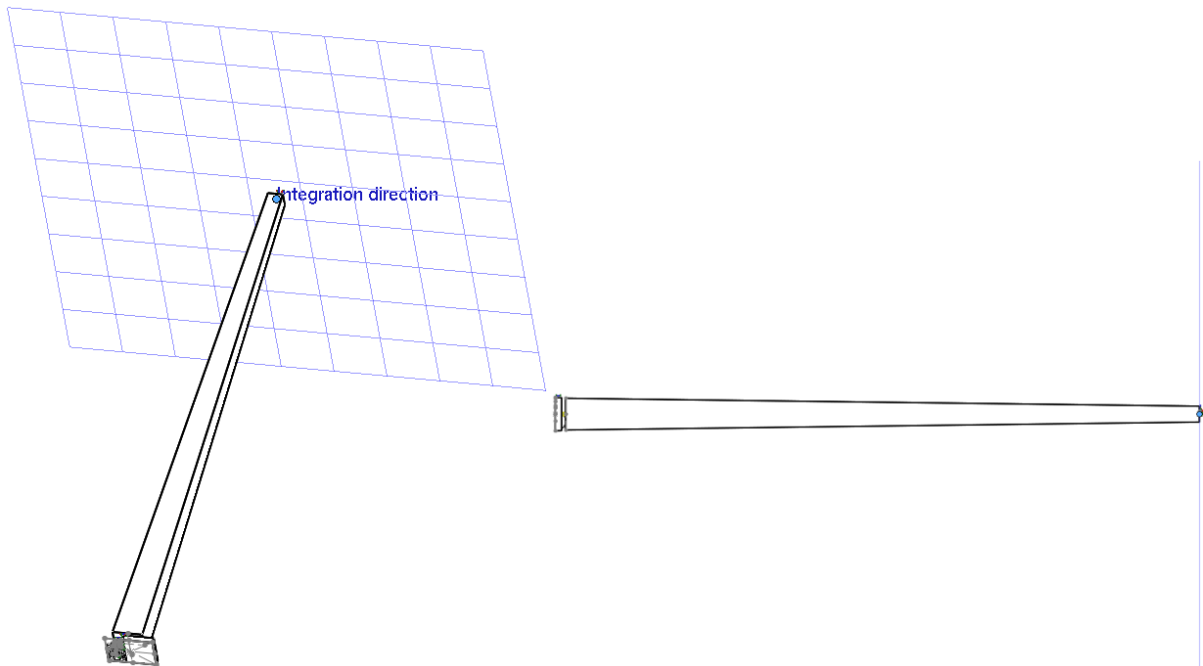


Figura 5.3.8 a) e b) come è configurato il sistema con rod (5 mm x 5 mm) x (2.5 mm x 2.5 mm) x 100 mm; c) misura della potenza sull'area di 1 mm^2

La potenza che si è ottenuta è addirittura superiore a quella del sistema con specchi diecrici; a questo punto si è provato anche con l'aggiunta di una lente in più configurazioni ma le prestazioni non sono migliorate, di conseguenza si può dire che con la configurazione mostrata in figura 5.3.8 si sono raggiunte le massime prestazioni per quanto riguarda il rod in questione ed essendo che queste sono superiori a quelle di tutti gli altri rods provati finora e che non ne

sono rimasti altri da provare, si può concludere che la stessa configurazione sia anche la soluzione ottimale per il sistema base in questione, cioè quello che si riferisce al tipo di sistema con rods, con un'efficienza pari a:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{5 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.153 \text{ W}}{5 \text{ W}} \cdot 100 \cong 3 \% . \quad (5.3.1)$$

Infine, come nel capitolo precedente, in tabella 5.3.1 è mostrato quanto ottenuto in uscita su 1 mm² con ogni singola componente spettrale; con gli stessi dati si è costruito in figura 5.3.9, in maniera molto approssimata, lo spettro complessivo della radiazione ottica in uscita su 1 mm².

λ [nm]	O.P. [W]	Eff
420	0.036	3.6 %
453	0.035	3.5 %
470	0.027	2.7 %
490	0.028	2.8 %
525	0.027	2.7 %
O.P. tot [W]		Eff media
0.153		3 %

Tabella 5.3.1 Risultati ottenuti in uscita con ogni singola componente spettrale

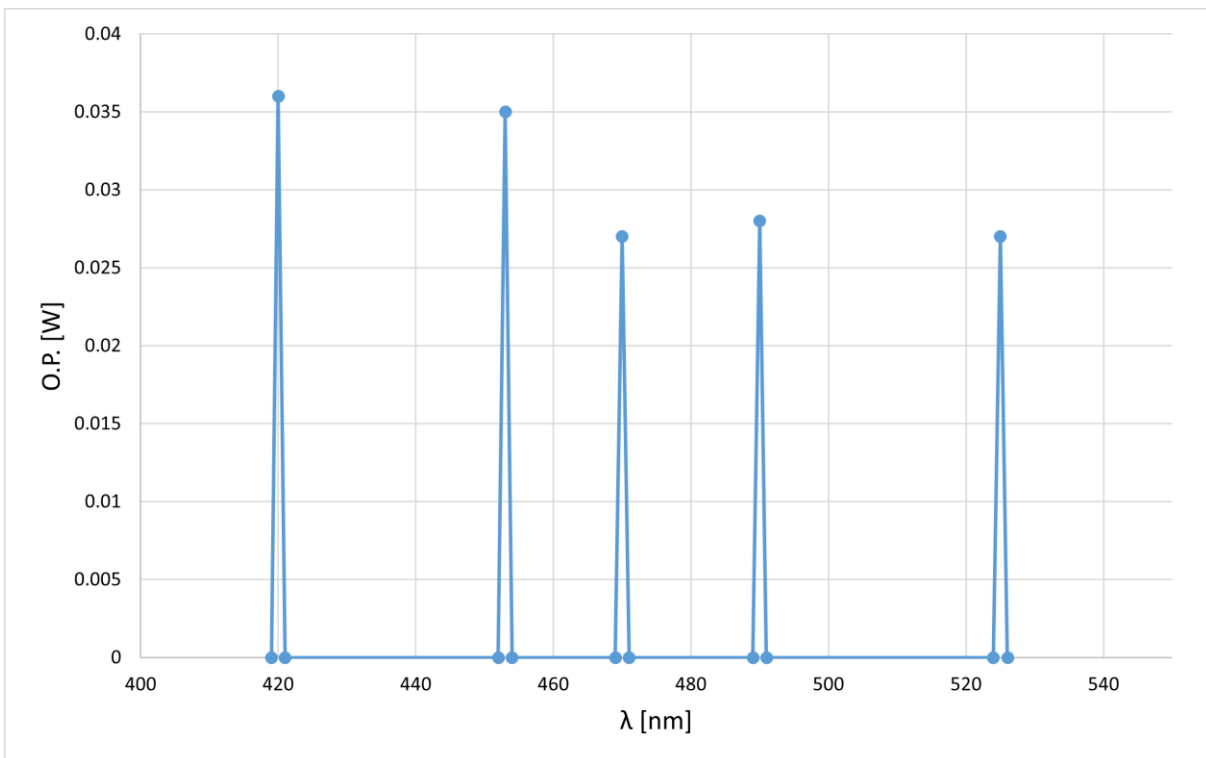


Figura 5.3.9 Spettro complessivo (molto approssimato) della radiazione ottica in uscita

5.4 Osservazioni e conclusioni

Un'efficienza del 3 % è certamente degna di nota, tuttavia ci sono diverse osservazioni che si possono fare sul sistema in questione.

La prima è che, come detto precedentemente, per la luce effettivamente uscente vale il fatto che la sua apertura numerica aumenta rispetto a quella della corrispondente luce in ingresso, quindi potrebbe essere che in quell'area da 1 mm² parte dei raggi che contribuiscono alla potenza misurata arrivi con angoli oltre il cono di accettazione della fibra, con la conseguente perdita di una parte della potenza effettivamente in fibra.

La seconda è che, anche se non lo si è verificato, in tutte le prove fatte sicuramente parte della luce dei LED inizia ad uscire prematuramente già dalla prima incidenza con una delle pareti inclinate del rod a causa sempre dell'angolo con il quale essa viene emessa ed entra nel rod; si potrebbe pensare di mettere una lente davanti ad ogni LED per ottimizzare la situazione, ma così si avrebbe un qualcosa di molto simile al sistema con specchi diecrici e oltretutto ogni LED singolarmente andrebbe ad occupare molto più spazio e questo darebbe sicuramente dei problemi nel momento in cui bisogna accoppiare al rod (o ai rod) tutti i 24 LED.

Un'altra osservazione nasce dalla questione che uno dei punti da chiarire attraverso lo studio sul sistema base era quale faccia o quali facce del rod utilizzare. Tutte le prove riportate nel paragrafo precedente sono fatte con i LED sulla base del rod, ma in realtà sono state eseguite delle prove anche con i LED su una delle facce laterali, sia con rod a base esagonale sia con i tapered; i risultati di tali prove non sono stati nemmeno riportati perché estremamente insoddisfacenti: ciò che succedeva è che praticamente nessun raggio riusciva ad arrivare in fondo al rod e si pensa sia dovuto al fatto che con i LED messi in questo modo probabilmente nessun loro raggio entrava attraverso la faccia laterale con un angolo al di sopra dell'angolo critico per la riflessione interna totale. Forse per tamponare il problema si potrebbe posizionare ogni LED leggermente inclinato rispetto alla faccia laterale, in modo da migliorare l'angolo di incidenza, ma poi fisicamente sarebbe veramente complicato se non impossibile saldare i LED in questo modo; l'unica altra alternativa sarebbe cambiare i LED in favore di altri con viewing angle maggiore, ma anche questa opzione non è possibile perché i LED in questa fase sono già stati decisi irreversibilmente.

Un'ultima osservazione riguarda la questione che con il sistema base si doveva anche indagare su quale fosse il numero di rod da usare, soprattutto in vista della costruzione del sistema completo. Nella soluzione ottimale si è ottenuta una buona efficienza, il problema è che bisogna trovare il modo di replicare tale risultato anche quando i LED in gioco sono 24. Di certo non si può usare soltanto il rod della soluzione ottimale, perché sarebbe impossibile porre davanti alla

sua base tutti i 24 LED allo stesso modo dei cinque del gruppo senza avere enormi perdite: semplicemente occuperebbero un'area troppo ampia e quindi pochissimi di essi riuscirebbero ad emettere raggi che finirebbero dentro il rod. Dunque, bisogna aumentare il numero di rods e provando a mettere tutti i LED attaccati, cosa che come già detto ha diverse conseguenze nella realtà, si vede che quattro tapered rods (8 mm x 8 mm) x (4 mm x 4 mm) x 100 mm posti anch'essi attaccati sarebbero sufficienti; poi, in cascata ad essi sarebbe da posizionare il rod della soluzione ottimale, il (5 mm x 5 mm) x (2.5 mm x 2.5 mm) x 100 mm, in modo da avvicinarsi di più all'area della fibra. Il sistema completo così costruito è mostrato in figura 5.4.1.

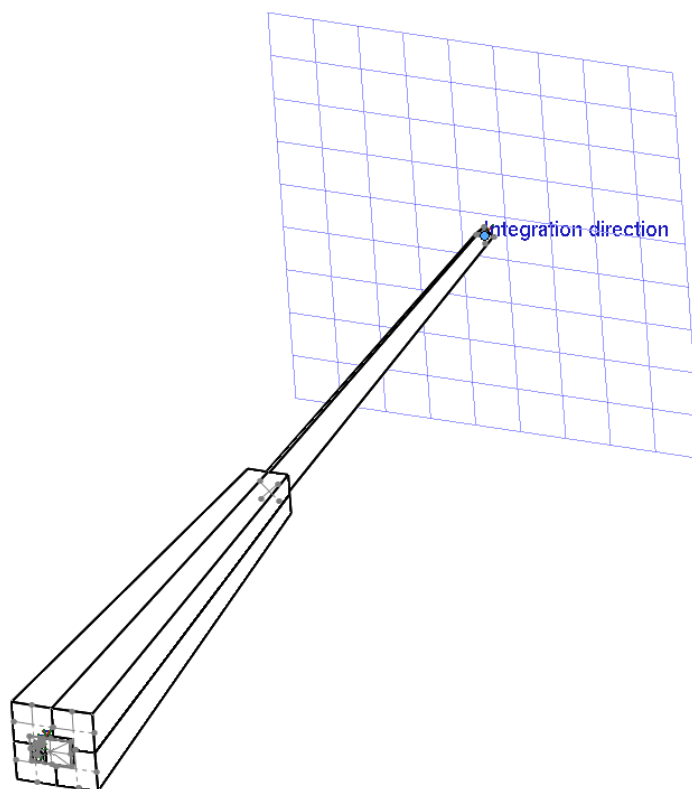


Figura 5.4.1 Come potrebbe essere composto il sistema completo

Tuttavia, in questo modo, si ottiene un'efficienza molto bassa, infatti basandosi sulle prove fatte precedentemente con il gruppo di cinque LED sui due tipi di rod si sa che:

- l'efficienza nel passare da un'area di 8 mm x 8 mm a una di 4 mm x 4 mm con lunghezza del rod di 100 mm è del 20 %, quindi dovrebbe essere circa la stessa anche mettendo 4 di questi rod insieme, passando da un'area di 16 mm x 16 mm a una di 8 mm x 8 mm sempre in una lunghezza di 100 mm;
- l'efficienza all'interfaccia tra i due blocchi, passando da un'area di 8 mm x 8 mm a una di 5 mm x 5 mm, dovrebbe essere circa $\frac{25}{64} \cdot 100 = 40 \%$;

- l'efficienza nel passare da un'area di 5 mm x 5 mm a una di 1 mm x 1 mm con lunghezza del rod di 100 mm è, come visto nella soluzione ottimale, circa del 3 %;

quindi ci si aspetta che complessivamente il sistema abbia efficienza:

$$Eff = 20 \% \cdot 40 \% \cdot 3 \% \cong 0.24 \% \quad . \quad (5.4.1)$$

Facendo simulazioni in OptisWorks sul sistema completo così costruito usando per semplicità solo il solito gruppo di cinque LED, come si vede sempre in figura 5.4.1, si ha la conferma che l'efficienza è praticamente quella calcolata per via teorica, quindi molto bassa. Inoltre, bisogna sempre ricordare che si ha il problema della banda di lunghezze d'onda utilizzabili nel rod, che in questo caso è da 350 a 2200 nm, quindi il LED a 275 nm non sarebbe utilizzabile.

Tutto questo porta alla conclusione che nonostante si sia ottenuta una buona efficienza a livello di soluzione ottimale del sistema base (che comunque nasconde l'incognita dell'angolo di arrivo dei raggi sulla fibra), non si riescono a replicare affatto tali prestazioni nel momento in cui si va a costruire il sistema completo, di conseguenza, sapendo ciò a priori, è meglio fermare qui lo sviluppo di questo sistema invece di arrivare alle prove in laboratorio, puntando piuttosto sugli altri due tipi di sistema.

Capitolo 6

Sistema con guida di luce

In questo capitolo viene inizialmente illustrato il funzionamento teorico del tipo sistema che utilizza una guida di luce. Successivamente, come nei capitoli precedenti, si procede con la presentazione del sistema base, che è una sorta di prototipo del sistema al completo che però utilizza solo un insieme ristretto di LED; di esso vengono analizzate le caratteristiche del modello stampato in 3D e della lamina metallica riflettente utilizzata per rivestirlo. Dopodiché, vengono mostrate tutte le numerose modifiche, simulazioni e misurazioni che sono state svolte su tale sistema base per arrivare alla sua soluzione ottimale. Infine, vengono tratte alcune osservazioni e conclusioni riguardanti questo tipo di sistema.

6.1 Principio di funzionamento

Il funzionamento di questo tipo di sistema è concettualmente ancora più semplice dei precedenti: un supporto 3D composto di materiale plastico è stampato a forma di guida e le sue pareti interne vengono rivestite di una lamina metallica estremamente riflettente che va a costituire la guida di luce vera e propria; all'interno di essa si fa viaggiare e miscelare la luce dei LED verso la fibra ottica in uscita. Come già anticipato nel paragrafo 3.2 l'idea per questo tipo di sistema è nata dopo aver svolto le simulazioni sul sistema con rods e infatti si nota come il funzionamento sia abbastanza simile, solo che al posto della riflessione interna totale data dal rod sfrutta la riflettività della lamina metallica; il sistema corrente, però, ha molte più libertà costruttive dal punto di vista di forma e dimensioni, visto che dipende quasi tutto dal modello 3D che viene disegnato a piacimento, quindi si pensa di poter migliorare le prestazioni ottenute finora. Nuovamente, come già anticipato, tutte queste libertà sono un'arma a doppio taglio perché se da un lato si possono ottenere guide dalle forme e dimensioni più disparate, dall'altro si ha il problema che ogni errore fatto in fase di disegno o imprecisione durante la fase di stampa, porta direttamente ad avere perdite nella guida; diversamente i rods hanno caratteristiche e forme limitate ma queste perlomeno vengono certificate in qualche modo dal produttore.

Come per il tipo di sistema precedente, o forse anche più, è complicato immaginare a priori come realizzare il sistema completo e infatti anche qui è stata data una spiegazione molto

generica sul suo funzionamento, senza menzionare per esempio la forma che ha la guida o dove sono posizionati i LED; anche stavolta quindi si è cominciato assemblando e studiando il sistema base fino a trovarne la soluzione ottimale e solo in seguito si è deciso come costruire il sistema completo.

6.2 Prototipo di sistema e componenti ottici utilizzati per realizzarlo

Anche in questo caso, come nel sistema della tipologia precedente, non si sa fin da subito come realizzare il sistema completo, quindi il sistema base viene costruito senza il suo riferimento ed in maniera semplice, di conseguenza anche in questo caso potrebbe essere che la soluzione ottimale differisca molto rispetto ad esso. L'idea è di partire copiando la configurazione che ha dato la soluzione ottimale ed i migliori risultati nel capitolo precedente, cioè quella con il rod (5 mm x 5 mm) x (2.5 mm x 2.5 mm) x 100 mm, come mostrato in figura 6.2.1, sfruttando la libertà che offre questa tipologia di sistema, in modo da vedere se con essa si ottengono almeno le prestazioni della precedente: il sistema base ha gli stessi LED raccolti e posizionati allo stesso modo, il sensore in uscita che rappresenta la fibra sempre nella stessa posizione, ma il tapered rod è sostituito da un supporto in plastica delle stesse dimensioni laminato internamente.

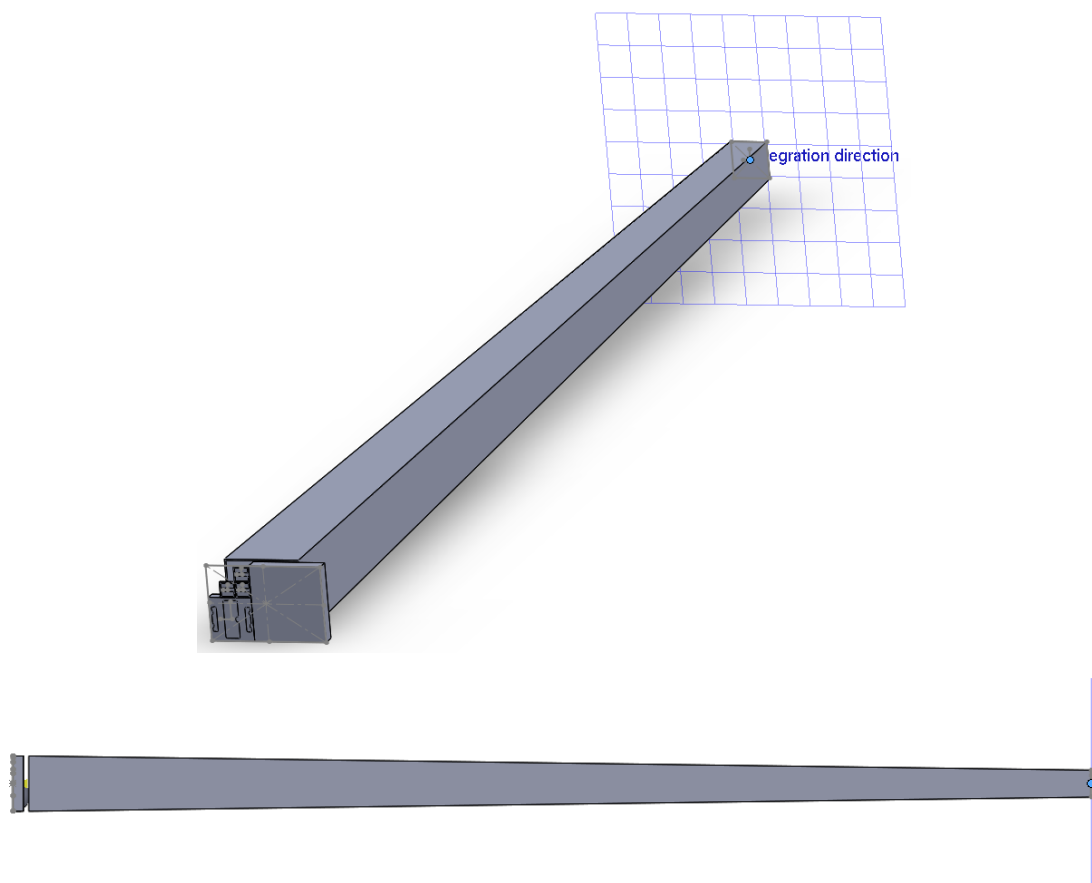


Figura 6.2.1 a) e b) sistema base per questo tipo di sistema in due viste differenti

Analizzando meglio ciò che differenzia questo sistema dal precedente, cioè la guida di luce, va detto che l'approccio più realistico, di cui in seguito si terrà conto per stampare il pezzo, sarebbe quello di disegnare una guida interna che riproduca perfettamente la lamina, cioè con le pareti dello spessore corretto e le superfici delle facce interne riflettenti, per poi disegnare intorno ad essa una guida in plastica che la contenga, che poi sarebbe il pezzo da stampare effettivamente; invece, in tutto questo capitolo la guida è disegnata in maniera semplificata, ovvero come un unico pezzo in cui le pareti interne hanno le dimensioni desiderate e vengono rese riflettenti modificando le impostazioni delle loro superfici. Infatti, in questo primo esempio, la guida è rappresentata come un unico pezzo con le pareti interne impostate riflettenti e delle dimensioni per riprodurre il rod, ovvero (5 mm x 5 mm) x (2.5 mm x 2.5 mm) x 100 mm, mentre quelle esterne (5.2 mm x 5.2 mm) x (2.7 mm x 2.7 mm) x 100 mm.

Visto che il materiale plastico che viene usato per stampare la parte esterna della guida non interessa otticamente, l'unico elemento ottico nuovo di cui parlare è la lamina metallica. Essa è di un materiale denominato MIRO-SILVER 27 prodotto da Alanod [35]; questo materiale è costituito principalmente di alluminio, poi per rendere una delle due facce particolarmente riflettente è presente un sottile strato d'argento insieme ad altri speciali trattamenti. Guardando il datasheet della lamina le caratteristiche d'interesse sono la riflettività $\geq 98\%$ e lo spessore di 0.5 mm [36]. La lamina viene fornita con un sottile film di plastica applicato sopra la faccia riflettente in modo da proteggerla dai graffi e che può essere comodamente tolto dopo aver tagliato, modellato e posizionato la lamina come si desidera. Nelle figure 6.2.2 e 6.2.3 si osservano gli strati di cui è composto il materiale e come si presenta la lamina nella realtà (senza il film protettivo di plastica); nella figura 6.2.3 non si riesce a mettere bene a fuoco la lamina proprio perché essa è estremamente riflettente.

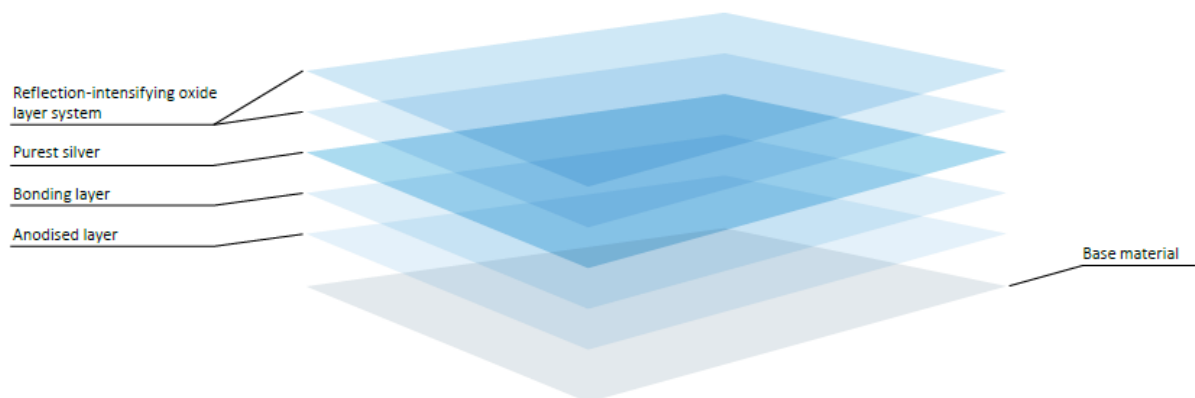


Figura 6.2.2 Strati di cui è composto il MIRO-SILVER 27 [35]



Figura 6.2.3 Pezzo di lamina nella realtà (senza film protettivo di plastica)

6.3 Simulazioni svolte e risultati ottenuti

Prima di svolgere la simulazione sul sistema base occorre specificare una cosa importante: se la luce viaggiante nella guida riuscisse a penetrare attraverso le superfici interne finendo dentro al substrato plastico, si avrebbero conseguenti e imprevedibili fenomeni di riflessioni all'interno di quest'ultimo, quindi per evitarlo si è deciso di impostare le superfici interne 100 % riflettenti invece che 98 %; questa scelta sembra indolore e inizialmente le si ha dato poco peso, ma durante le prove in laboratorio ci si accorgerà che la differenza c'è ed è notevole.

Simulando sul sistema base così come descritto nel paragrafo precedente si trova che il sensore in uscita misura una potenza su 1 mm^2 pari a $\Phi_{e,sistema} = 0.172 \text{ W}$, come si vede in figura 6.3.1.

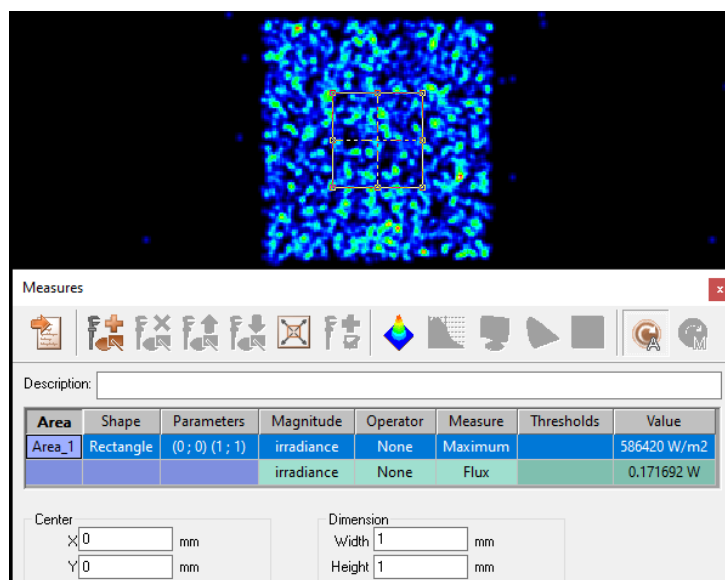


Figura 6.3.1 Misura della potenza sull'area di 1 mm^2

La potenza (e quindi l'efficienza) ottenuta è molto simile a quella ottenuta con il tapered rod, anzi leggermente superiore, però va riflettuto su una questione: è vero che questa guida ha la stessa forma del rod e che tecnicamente la luce viaggia in entrambi i casi per riflessione però, mentre nel rod avviene il fenomeno di perdita per trasmissione a causa dell'angolo d'incidenza della luce con le pareti inclinate raccontato nel capitolo precedente, qui ci si aspetta che non avvenga visto che le superfici interne sono perfettamente riflettenti e teoricamente non dovrebbero perdere nulla verso l'esterno; ma allora perché le prestazioni sono così simili? Lo sono perché anche se non avviene l'effetto di perdita raccontato accade comunque qualcosa di simile, ovvero i raggi, nel momento in cui entrano nella guida, viaggiano come nel rod solo che invece di non riuscire ad arrivare all'uscita perché nel frattempo vengono completamente trasmessi all'esterno a causa del loro angolo, non ci arrivano perché semplicemente sempre a causa del loro angolo restano intrappolati all'interno della guida, come si vede nella figura esemplificativa seguente 6.3.2, o addirittura a volte riescono a tornare indietro come si vede nella figura 6.3.3 ottenuta da una prova in ray tracing. In particolare, quest'ultimo tipo di prova mostra e ribadisce il fatto che alla fine i raggi che riescono ad uscire in fondo alla guida sono solo una piccola parte, infatti, nel caso specifico della simulazione riportata nella figura 6.3.3, di 10 raggi che sono immessi solo 1 ci riesce, tutti gli altri rimangono intrappolati o tornano indietro uscendo dal lato d'ingresso.

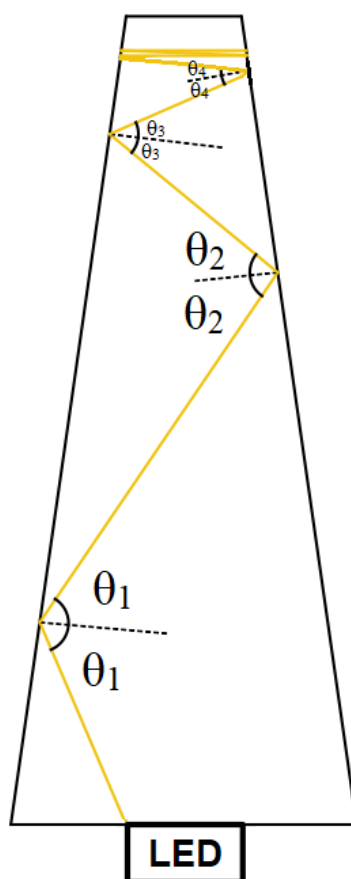


Figura 6.3.2 Riflessione di un raggio che dal LED entra nella guida di luce e rimane poi intrappolato

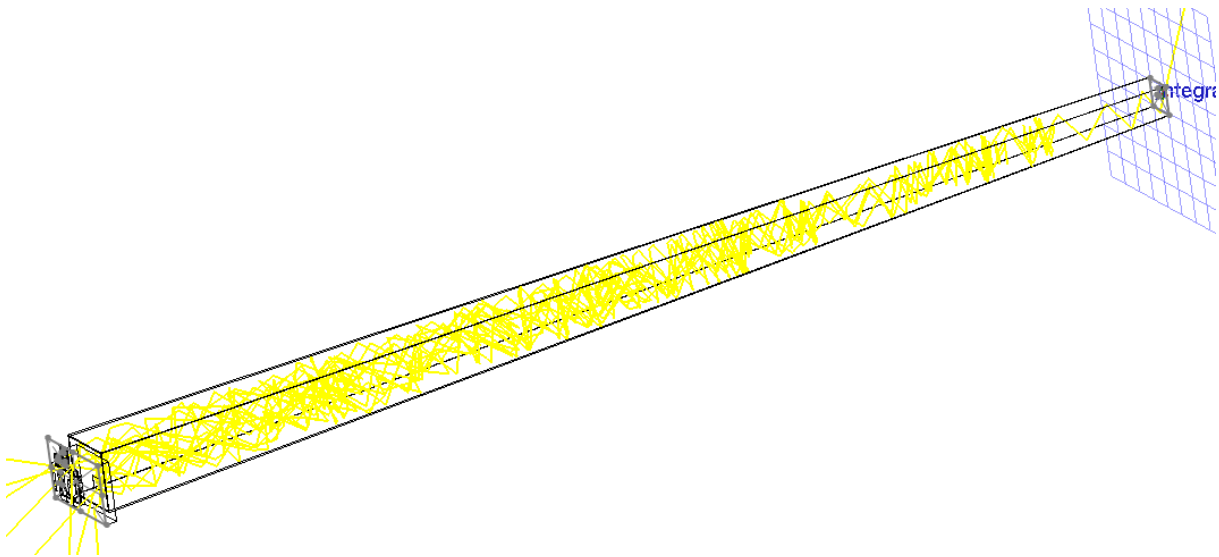


Figura 6.3.3 Prova in ray tracing per vedere come viaggiano i raggi all'interno della guida di luce

Comunque, al di là del modo in cui la si è ottenuta, ciò che interessa effettivamente qui è che la potenza e quindi l'efficienza sono simili (anzi di poco superiori) a quelle della soluzione ottimale del sistema con rods; ora, però, va cercato un modo per migliorarle.

La prima cosa che è venuta in mente è provare a proseguire la guida mantenendo la stessa inclinazione delle pareti fino ad arrivare ad avere un foro di uscita 1 mm x 1 mm, visto che questo tipo di sistema permette tale libertà; la potenza su 1 mm² non è migliorata anzi è peggiorata, probabilmente perché, nonostante in questo modo tutta la potenza uscente sia d'interesse visto che il foro è 1 mm², i raggi fanno ancora più fatica ad uscire con la guida così costruita.

Successivamente, si è riportata la guida come realizzata inizialmente e si è provato a chiuderla dalla parte del foro più largo, fare un foro su una parete laterale e mettere in quel punto il gruppo di LED: facendo così, visto che la guida è sempre inclinata, la luce dei LED entra con un angolo ancora peggiore rispetto alla configurazione iniziale e una parte ancora maggiore di essa non riesce ad uscire, peggiorando anche in questo caso la potenza su 1 mm² in uscita.

A questo punto si è provato a cambiare approccio distaccandosi dall'idea della guida con pareti inclinate e cercando di sfruttare tutte le libertà offerte da questo tipo di sistema. Si passa quindi ad usare guide con pareti dritte e i due fori uguali, come nella figura 6.3.4.

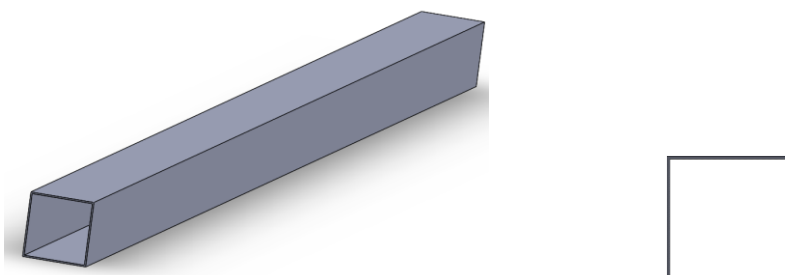


Figura 6.3.4 Guida con pareti dritte e i due fori uguali: a) vista in prospettiva, b) vista lungo l'asse

Ma in realtà anche questo tipo di guida ha dei problemi evidenti, infatti per utilizzarla i LED vanno posizionati davanti ad uno dei due fori sulle “basi” e questo significa che a seconda del numero e delle dimensioni dei LED che si usano la guida va necessariamente allargata se si desidera che tutta la luce delle sorgenti (o comunque buona parte) entri in essa. Pensando per esempio alla situazione in cui si usano tutti i 24 LED si ha che se essi sono posizionati tutti attaccati occupano una superficie circa 200 mm x 200 mm, quindi è necessario che anche la guida sia così larga e di sicuro così la potenza in uscita sull’area 1 mm x 1 mm non è buona perché è una frazione molto piccola di quella totale sull’area 200 mm x 200 mm; inoltre, con un’area totale così grande è più probabile che i raggi uscenti siano distribuiti in maniera poco uniforme, con magari sfortunatamente nessun raggio di un determinato LED nell’area di 1 mm² d’interesse.

La cosa più logica da fare è allora chiudere uno dei due fori, laminando la faccia di questo “coperchio” che dà verso l’interno della guida, e farne di più piccoli su una delle pareti laterali, in modo da posizionare in quei punti i LED, ottenendo la guida di figura 6.3.5.

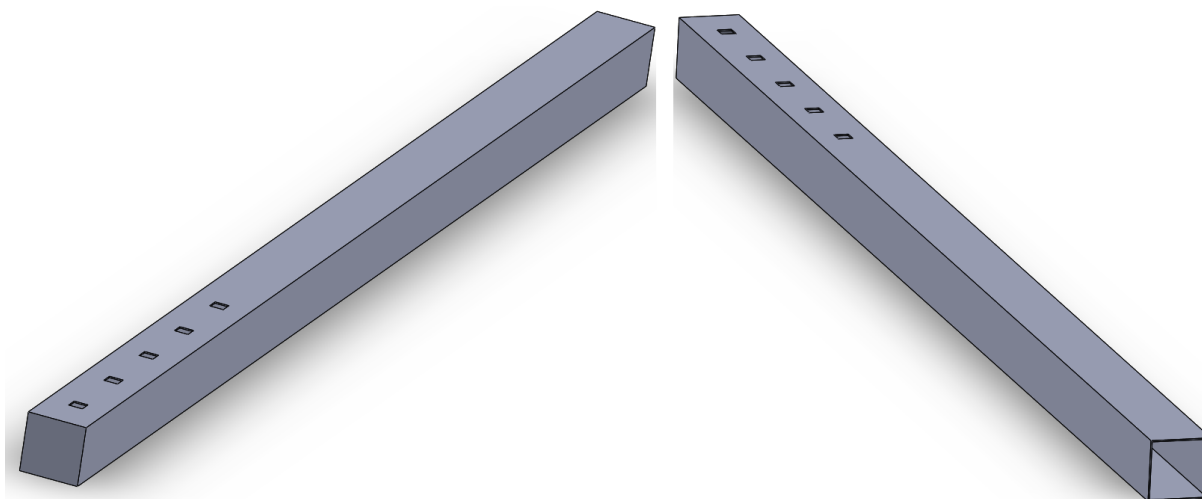


Figura 6.3.5 Guida che utilizza i LED su una delle pareti laterali vista da: a) inizio guida, b) fine guida

Con questa configurazione non si ha più il problema di dover allargare la guida per farci stare tutti i LED contemporaneamente ma al massimo la si deve allungare, cosa che, almeno teoricamente, non dovrebbe portare a peggioramenti. Idealmente la guida potrebbe avere qualunque dimensione se non si avessero i LED, infatti quest’ultimi costringono ad avere delle dimensioni minime. Banalmente la lunghezza deve essere tale da farci stare tutti i LED messi in fila e attaccati, nel miglior caso; mentre per quanto riguarda altezza e larghezza (e quindi il foro d’uscita), che vengono mantenute uguali per avere una guida a sezione quadrata, bisogna che siano abbastanza grandi da permettere alle pareti laterali di ospitare un foro che riesca a “coprire” almeno la superficie emissiva (die) di ogni LED, che non corrisponde necessariamente a tutta la faccia superiore del LED ma potrebbe essere anche solo una parte di

essa, oppure se il LED ha una sua lente bisogna tenere conto di quella. Per fare un esempio, se si dovesse costruire in questo modo la guida per il sistema completo, guardando le dimensioni di tutti i 24 LED, nel migliore dei casi con i LED in fila e tutti attaccati si vede che la guida dovrebbe essere lunga almeno 80.3 mm, mentre altezza e larghezza devono necessariamente essere almeno 3 mm così che anche i fori sulla parete laterale possano avere tali dimensioni, in modo da riuscire ad ospitare anche le lenti di alcuni LED che hanno questo diametro.

Parlando delle pareti laterali, c'è da dire che ci sono due diversi approcci per la creazione dei fori e quindi per la gestione dei rispettivi LED:

- per ogni LED si fa un foro grande quanto la sua superficie emissiva o eventualmente come la sua lente e si appoggia il LED sulla parete laterale in corrispondenza di questo foro;
- per ogni LED si fa un foro grande quanto tutto il LED e si inserisce quest'ultimo completamente all'interno di esso, con praticamente la sua PCB che nella realtà lo sostiene appoggiandosi sulla parete laterale.

I due approcci sono molto diversi infatti, facendo un esempio pratico, i LED Roithner hanno dimensioni totali 5 mm x 5 mm ma in realtà emettono da una superficie 1 mm x 1 mm, quindi con il primo approccio si fa un foro 1 mm x 1 mm e si appoggia il LED, mentre con il secondo si fa un foro 5 mm x 5 mm e il LED va inserito; le dimensioni del foro, oltre a costringere ad avere una guida con le dimensioni minime maggiori, sono molto importanti per le prestazioni del sistema: pensandoci un attimo, tutta la luce deve viaggiare dentro la guida riflettente, quindi più grandi si fanno i fori su di essa e maggiori sono le perdite perché rimane meno superficie in grado di riflettere la luce in favore di quella dei LED che non è in grado di farlo. A questo punto, il primo approccio sembra quello migliore da utilizzare visto che i fori risultano sempre più piccoli o al massimo uguali rispetto agli stessi fatti con il secondo approccio; tuttavia, c'è una limitazione fisica che impedisce o comunque ostruisce questa scelta per tutti i LED: infatti, osservando la loro lista, si vede che hanno altezze differenti, ciò significa che se li si appoggia sulla parete laterale poi sono necessarie tante PCB ad altezze diverse invece di un'unica PCB, cosa quest'ultima che è possibile avere usando il secondo approccio visto che indipendentemente dalla loro altezza i LED sono inseriti completamente nella parete della guida. Va cercato quindi un compromesso tra le minori perdite date dal primo approccio e l'utilizzo di un'unica PCB dato dal secondo. L'idea potrebbe essere quella di usare il primo approccio per alcuni LED mentre il secondo per tutti gli altri:

- per i LED Roithner, che sono i più grandi, sarebbe meglio usare il primo approccio, poi, visto che sono tutti uguali fisicamente, si riesce anche ad usare un'unica PCB per tutti loro;

- per tutti gli altri LED, che sono più piccoli rispetto ai Roithner, si può usare il secondo approccio che permette, nonostante questi LED abbiano altezze diverse, di usare anche per loro un'unica PCB.

Quindi alla fine ci si ritroverebbe con due sole PCB, una per i LED Roithner appoggiati sulla parete laterale mentre l'altra per tutti gli altri LED inseriti nella stessa. Un esempio di questa suddivisione sarà mostrato nel paragrafo successivo.

Tornando allo sviluppo del sistema base, da qui in poi, invece di continuare ad utilizzare il solito gruppo di cinque LED, si è proseguito a cercare la soluzione ottimale utilizzando solamente tre LED Roithner, in modo da capire bene con i LED più grandi a disposizione che differenza di prestazioni può esserci nell'usare un approccio piuttosto che l'altro. I LED in questione sono a 420 nm, 680 nm e 810 nm, posizionati in questo ordine sulla guida.

Per prima cosa si sono fatte simulazioni usando il secondo approccio con una guida 5 mm x 5 mm x 50 mm, con i fori fatti in modo che i LED siano a 0.5 mm di distanza tra di essi; in figura 6.3.6.a si vede questa configurazione e in 6.3.6.b la potenza su 1 mm² che si è ottenuta con essa, ovvero $\Phi_{e,sistema} = 0.027 W$.

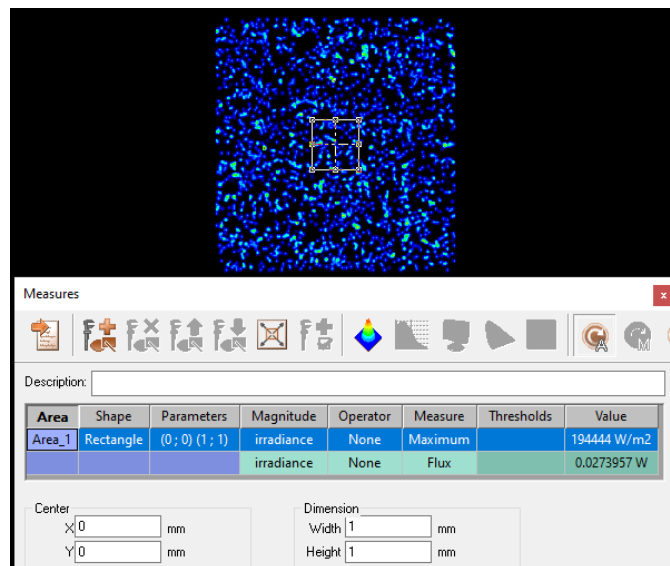
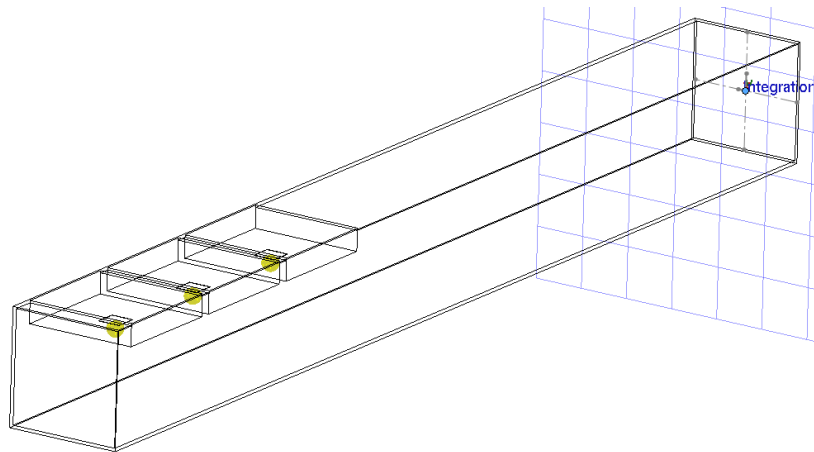


Figura 6.3.6 a) come è configurato il sistema con guida 5 mm x 5 mm x 50 mm e secondo approccio; **b)** misura della potenza sull'area di 1 mm²

La potenza ottenuta corrisponde ad un'efficienza pari a:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{3 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.027 W}{3 W} \cdot 100 = 0.9 \% , \quad (6.3.1)$$

che è molto bassa in confronto con gli altri sistemi provati finora e oltretutto, anche se qui non è riportato, si vede che accendendo i singoli LED quello più vicino all'uscita (a 810 nm) fornisce la maggior parte della potenza in uscita, quello prima di esso (a 680 nm) un po' meno, mentre quello prima ancora (a 420 nm) non fornisce quasi niente. Il primo fatto è giustificabile banalmente dicendo che i fori in cui sono alloggiati i LED sono molto grandi e quindi si hanno molte perdite, mentre il secondo fatto è sicuramente anch'esso favorito dalla dimensione dei fori ma è un discorso un po' più complesso e gli si è provato a dare una spiegazione nel modo seguente: il LED più vicino all'uscita (a 810 nm) non ha nessun foro tra lui e l'uscita stessa quindi almeno metà dei suoi raggi (quelli emessi verso l'uscita) arrivano indisturbati fino a quest'ultima; il LED in mezzo (a 680 nm) ha un foro davanti a sé nel percorso che porta all'uscita (quello dove risiede il LED a 810 nm), quindi rispetto al LED precedente riuscirà a far arrivare meno raggi fino quest'ultima; il LED più distante dall'uscita (a 420 nm) ha ben due fori davanti a sé nel percorso che porta all'uscita (quelli dove risiedono gli altri due LED) quindi rispetto ai LED precedenti riuscirà a far arrivare ancora meno raggi fino quest'ultima.

Successivamente, sono state fatte altre simulazioni che hanno rivelato altre cose importanti:

- variare la lunghezza della guida cambia poco le prestazioni;
- variare la posizione dei LED sulla parete laterale, per esempio mettendoli in corrispondenza di metà guida invece che all'inizio di essa, cambia poco le prestazioni;

questi due aspetti mostrano che si gode di una certa libertà di movimento con guida e LED, almeno mentre si lavora su OptisWorks.

Occorre dire che per rendere un po' più verosimili tutte le simulazioni, sulla parete dove sono inseriti i LED è presente una lamina a mo' di "coperchio" per emulare la PCB sulla quale sono saldati i LED nella realtà; in ogni caso, per non rendere più confusionarie le figure, essa è sempre lasciata invisibile.

Passando invece al primo approccio, dato che la lunghezza della guida incide poco sulle prestazioni, si utilizza una guida un po' più lunga della precedente così da renderla più realistica, visto che una lunga 50 mm di sicuro non può contenere tutti i LED del sistema, come già visto dai conti precedenti, a meno di non occupare più pareti della guida, cosa che per motivi costruttivi nella realtà non è per niente semplice da fare; in particolare, inizialmente si utilizza una guida 5 mm x 5 mm x 100 mm con i fori 1 mm x 1 mm che fanno in modo che i LED siano questa volta distanti tra di loro 1 mm. Dalle prime prove si nota subito che la potenza ottenuta è maggiore, indice che si hanno minori perdite grazie ai fori più piccoli; inoltre, a differenza di

prima, la potenza in uscita è fornita in maniera bilanciata dai tre LED, quindi il particolare effetto di perdita discusso precedentemente è stato cancellato. Si è visto anche che lasciando i fori come descritto precedentemente ma riducendo l'altezza e la larghezza della guida facendola diventare 4 mm x 4 mm x 100 mm, le prestazioni rimangono sostanzialmente inalterate, per cui di seguito vengono riportate nella figura 6.3.7.a il sistema configurato proprio con quest'ultima guida e in 6.3.7.b la potenza su 1 mm² che si è ottenuta con essa, cioè $\Phi_{e,sistema} = 0.126 \text{ W}$.

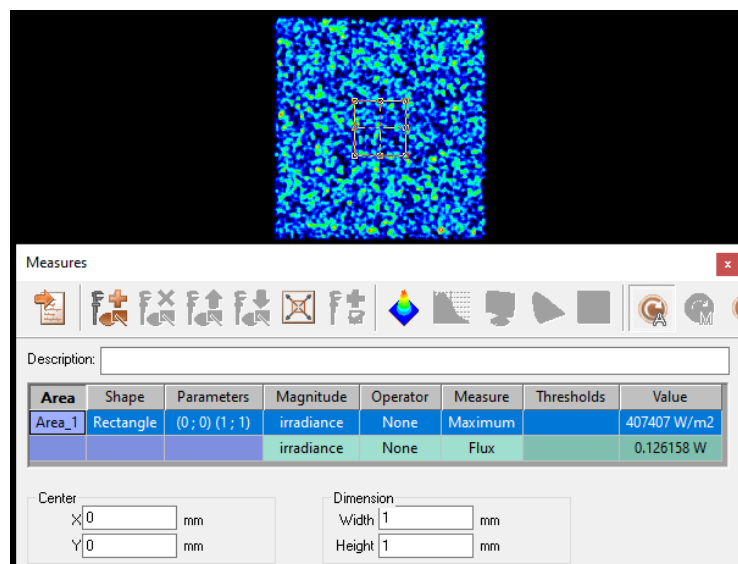
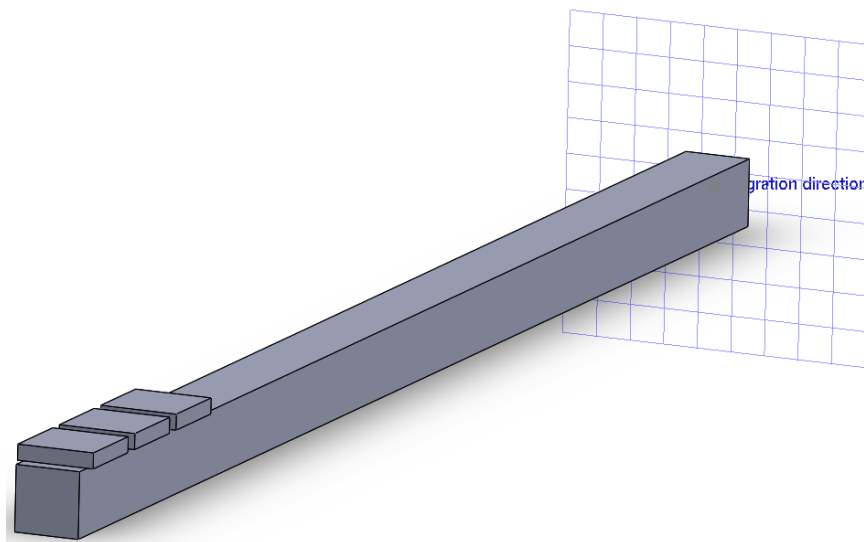


Figura 6.3.7 a) come è configurato il sistema con guida 4 mm x 4 mm x 100 mm e primo approccio; b) misura della potenza sull'area di 1 mm²

Dalla potenza ottenuta si ricava l'efficienza:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{3 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.126 \text{ W}}{3 \text{ W}} \cdot 100 = 4.2 \% \quad (6.3.2)$$

Successivamente è stato visto che questo risultato può essere migliorato se il foro d'uscita della guida viene aggiustato come in figura 6.3.8.a. Esso viene parzialmente chiuso lasciando solo un foro 1 mm x 1 mm; anche la faccia di questo “coperchio” che dà verso l'interno della guida viene laminata in modo che sia 100 % riflettente, quindi ciò che dovrebbe avvenire idealmente a questo punto è che ogni raggio percorre la guida avanti e indietro finché riesce ad uscire e ha solo due modi per farlo cioè o attraverso il foro in fondo alla guida di 1 mm x 1 mm, finendo in fibra, o attraverso i fori in corrispondenza dei LED, andando perso. Alla fine, si ottiene la potenza su 1 mm² di figura 6.3.8.b, cioè $\Phi_{e,sistema} = 0.422 \text{ W}$.

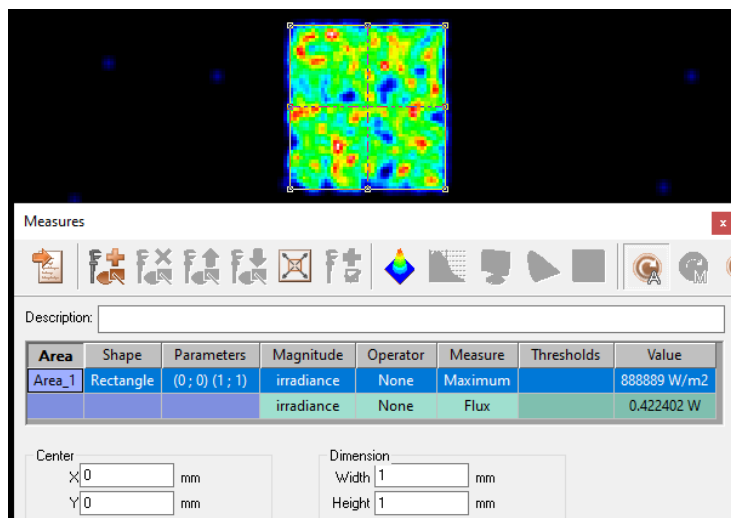
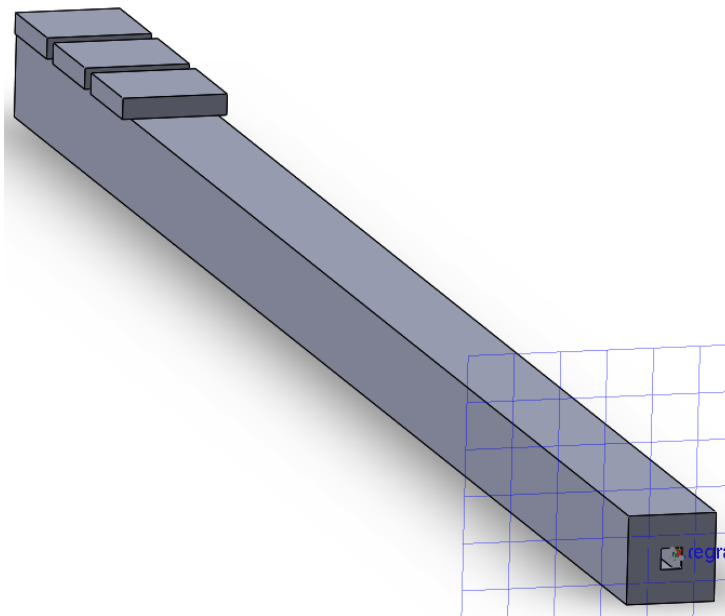


Figura 6.3.8 a) come è configurato il sistema con guida 4 mm x 4 mm x 100 mm con primo approccio e foro d'uscita aggiustato;
b) misura della potenza sull'area di 1 mm²

L'efficienza risulta essere:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{3 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.422 \text{ W}}{3 \text{ W}} \cdot 100 = 14.1 \% \quad (6.3.3)$$

A questo punto, visto che cambiare le dimensioni della guida non fa variare molto le prestazioni, che i fori per LED e uscita non conviene farli più piccoli di così per logici motivi e che cambiare la forma della guida non è vantaggioso, l'ultima configurazione trovata può essere considerata la soluzione ottimale per il sistema base in questione, ovvero quello che si riferisce al tipo di sistema con guida di luce.

Infine, come nei capitoli precedenti, in tabella 6.3.1 è mostrato quanto ottenuto in uscita su 1 mm² con ogni singola componente spettrale; con gli stessi dati si è costruito in figura 6.3.9, in maniera molto approssimata, lo spettro complessivo della radiazione ottica in uscita su 1 mm².

λ [nm]	O.P. [W]	Eff
420	0.142	14.2 %
680	0.136	13.6 %
810	0.144	14.4 %
	O.P. tot [W]	Eff media
	0.422	14.1 %

Tabella 6.3.1 Risultati ottenuti in uscita con ogni singola componente spettrale

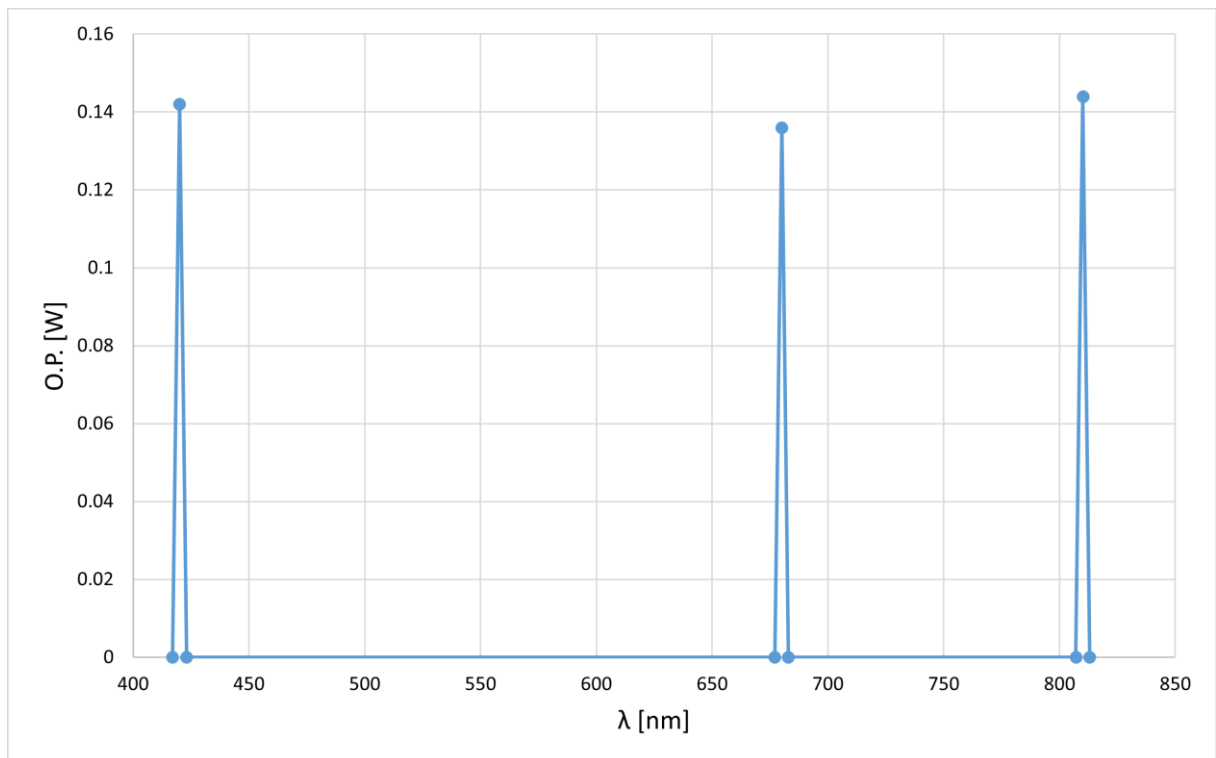


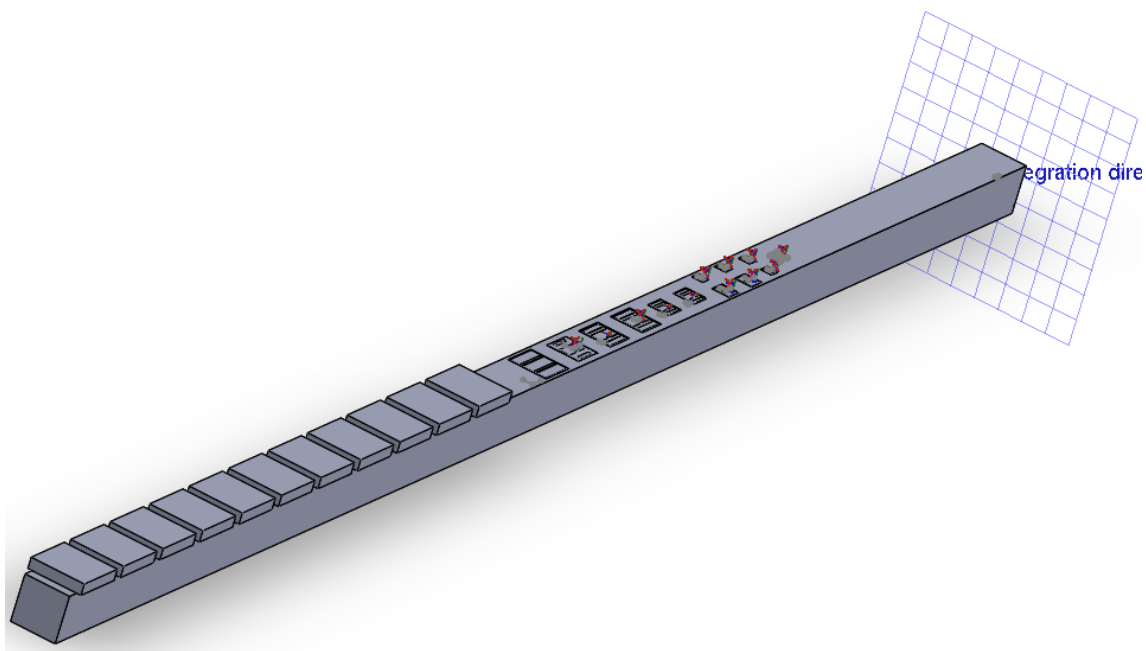
Figura 6.3.9 Spettro complessivo (molto approssimato) della radiazione ottica in uscita

6.4 Osservazioni e conclusioni

Con un'efficienza del 14.1 % questa sembra essere di gran lunga la tipologia di sistema migliore per realizzare il sistema d'interesse. Ora va appunto ricavato in qualche modo il sistema completo.

Inizialmente, ignorando un po' i risultati ottenuti, si è svolto un tentativo simile a quello già eseguito in precedenza con il gruppo di 5 LED, cioè si è presa la guida clone del tapered rod e la si è proseguita mantenendo la stessa inclinazione delle pareti fino ad arrivare ad avere un foro d'uscita 1 mm x 1 mm, e stavolta anche un foro d'ingresso 200 mm x 200 mm, così da poter mettere direttamente la base con tutti i LED; in questo modo si sono ottenuti una guida lunga 75 cm e dei risultati veramente pessimi, con quest'ultima cosa che conferma appunto quanto si era già visto provando similmente con il gruppo di 5 LED, cioè avere la guida che si restringe così tanto all'uscita non è indifferente e rende molto poco probabile che della luce riesca ad uscire.

Successivamente, si è proceduto con l'idea che già era stata anticipata nel paragrafo precedente: usare l'approccio con LED appoggiati per quelli Roithner, mentre quello con LED inseriti per tutti gli altri, dividendoli di fatto in due PCB diverse; la guida utilizzata è come quella della soluzione ottimale, con la sola differenza che ha lunghezza 150 mm così da poter spaziare maggiormente i LED tra di loro. Nella figura 6.4.1 si osservano la configurazione del sistema e la potenza su 1 mm² ottenuta tramite essa, cioè $\Phi_{e,sistema} = 0.597 \text{ W}$.



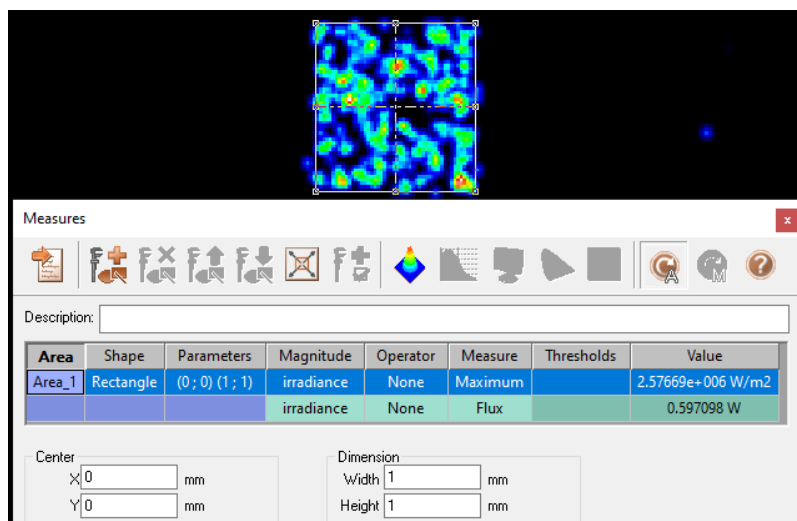


Figura 6.4.1 a) come è configurato il sistema con guida 4 mm x 4 mm x 150 mm con entrambi gli approcci e foro d'uscita aggiustato; b) misura della potenza sull'area di 1 mm²

Come fatto anche precedentemente, sopra i LED usati con il secondo approccio viene posta una lamina come “coperchio” per emulare la PCB sulla quale sono saldati nella realtà, che però viene resa invisibile nella figura.

Alla fine, dalla potenza ottenuta si ricava l'efficienza:

$$Eff = \frac{\Phi_{e,sistema}}{24 \cdot \Phi_{e,LED}} \cdot 100 = \frac{0.597 W}{24 W} \cdot 100 = 2.5 \% , \quad (6.4.1)$$

che è inferiore a quanto trovato con la soluzione ottimale, ma che non è male considerando il fatto che si tratta del sistema completo con tutti i 24 LED; per fare un confronto, è addirittura più alta di quella della soluzione ottimale del sistema base che si riferisce al tipo di sistema con specchi dicroici ($\cong 2\%$), la quale gestisce solamente 5 LED, non 24. Inoltre, provando ad accendere i singoli LED si vede che la potenza totale è distribuita in maniera abbastanza uniforme tra i LED, con il primo e l'ultimo della fila che forniscono quasi lo stesso contributo. In ogni caso, la differenza di efficienza con la soluzione ottimale è dovuta probabilmente a due fattori:

1. Essendoci 24 LED ci sono ovviamente altrettanti fori, che sono molti di più rispetto a quelli della soluzione ottimale del sistema base e quindi sicuramente si hanno molte più perdite.
2. Per 13 LED si usa il secondo approccio invece del primo, il che costringe ad avere, nonostante i LED siano complessivamente di dimensioni inferiori rispetto ai LED Roithner, fori più grandi che causano sicuramente più perdite.

In fin dei conti lo studio che si fa sui sistemi base è sempre impuntato sulla ricerca del caso migliore e delle prestazioni in tale situazione, usando tutto ciò come un punto di riferimento per partire, ma non è garantito che in seguito con il sistema completo si riescano a confermare le stesse identiche prestazioni.

Capitolo 7

Risultati sperimentali

In questo capitolo, inizialmente, sia per il sistema con specchio diecrico che per quello con guida di luce vengono presentati i modelli 3D dei supporti che sono stati stampati ed aggiunti ad essi per eseguire le prove in laboratorio, oltre che le PCB sulle quali vengono saltati i LED. Successivamente, per entrambi i tipi di sistema vengono mostrate tali prove e i risultati ottenuti, con quest'ultimi che in seguito vengono confrontati con quelli ottenuti su OptisWorks; nel caso del sistema con specchio diecrico le prestazioni trovate con il simulatore ottico vengono confermate anche nella realtà, mentre nel caso del sistema con guida ci sono grosse differenze, quindi si cerca di ragionare su quali potrebbero essere le motivazioni di quest'ultimo fatto. Si ricorda che nel sistema con rods già su OptisWorks si ha visto che il sistema completo non riuscirebbe a replicare neanche lontanamente le prestazioni della soluzione ottimale del sistema base, quindi non vale la pena fare ulteriori prove su questa tipologia.

7.1 Sistema con specchi diecrici

Alla soluzione ottimale del sistema base relativo alla tipologia con specchi diecrici sono stati aggiunti quattro supporti composti da cinque pezzi in 3D che sono stati disegnati e poi stampati. Il primo supporto serve a sostenere ed a mantenere le quattro lenti dei LED sulla base nelle posizioni calcolate per la soluzione ottimale; esso viene fissato alla PCB dei LED tramite delle viti e si presenta come in figura 7.1.1.

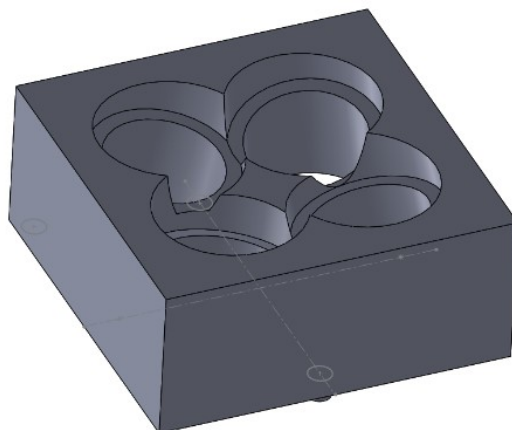


Figura 7.1.1 Supporto per le quattro lenti dei LED sulla base

Il secondo supporto serve a mantenere la lente del LED laterale a 525 nm alla distanza giusta da quest'ultimo ed in combinazione con il prossimo supporto che verrà illustrato serve anche a mantenere LED e lente nella posizione corretta rispetto allo specchio. Questo supporto è diviso in due pezzi: il primo pezzo è fissato tramite viti alla PCB del LED e su di esso poggia la lente; il secondo pezzo è fissato al primo sempre tramite viti e serve a fare parzialmente da coperchio in modo che la lente non cada, visto come è posizionata. Tale supporto è mostrato in figura 7.1.2.

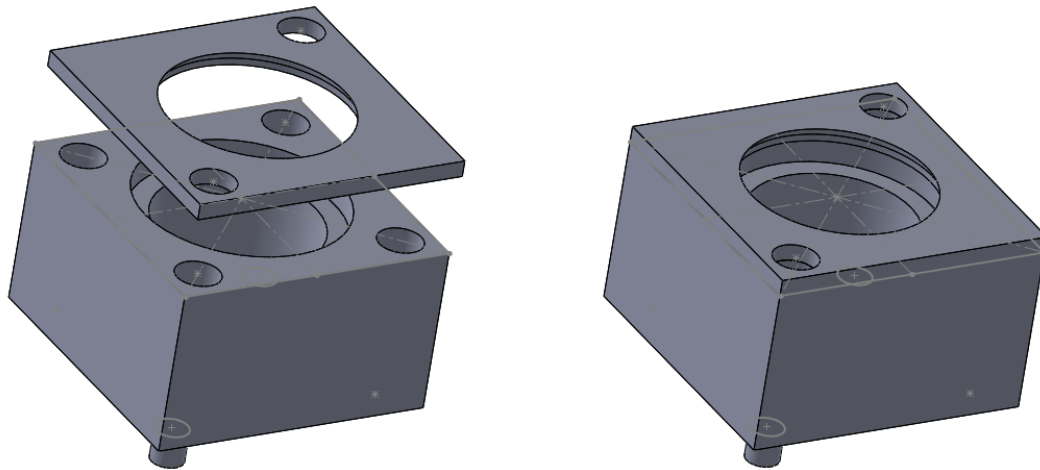


Figura 7.1.2 Supporto per lente del LED laterale: a) i due pezzi sono separati, b) i due pezzi sono uniti (tra di essi ci andrebbe la lente)

Il terzo supporto è il più grande e serve a sostenere ed a mantenere lo specchio nella posizione prestabilita per la soluzione ottimale; inoltre, come anticipato prima, sostiene a sua volta il supporto precedente facendo in modo che alla fine il LED laterale e la sua lente si trovino nella posizione corretta per la soluzione ottimale. Viene posizionato ad incastro sulla PCB sulla base. Esso è illustrato in figura 7.1.3.

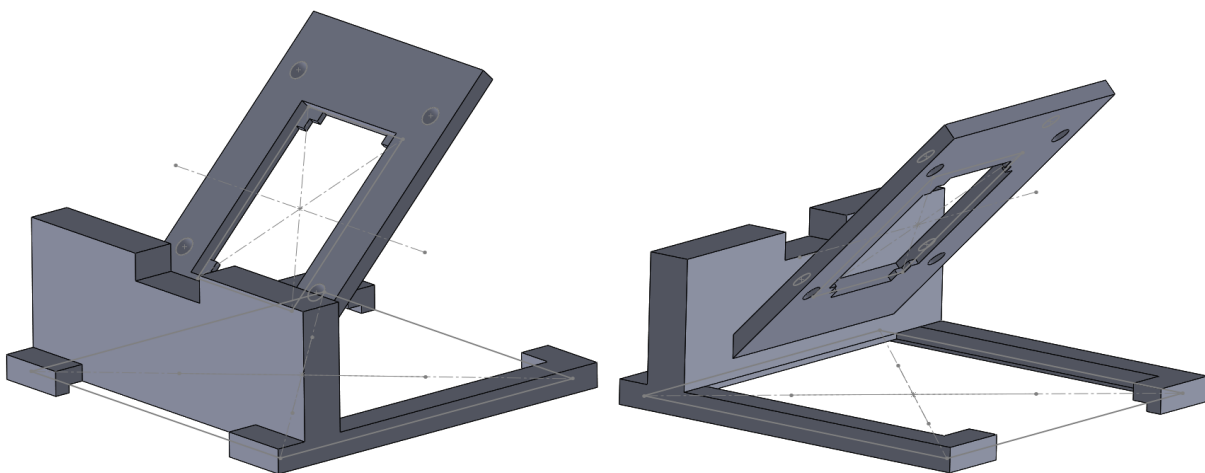


Figura 7.1.3 Supporto per lo specchio oltre che per quello precedente, due differenti viste

Il quarto supporto si utilizza per fare in modo di avere nella realtà una misurazione all'uscita il più simile possibile a quella su OptisWorks: siccome il sensore (spettrometro) nella realtà ha un'area d'ingresso ben superiore a 1 mm^2 , esso catturerebbe e misurerebbe più luce di quella voluta; quindi viene stampato ed appoggiato sulla PCB sulla base un supporto con un foro di 1 mm^2 , facendo in modo che alla fine il foro sia nello stesso punto dove si trova il centro del sensore nella soluzione ottimale su OptisWorks, così da far passare dopo di esso, cioè dentro lo spettrometro, esattamente la luce che interessa. Questo supporto è riportato in figura 7.1.4.

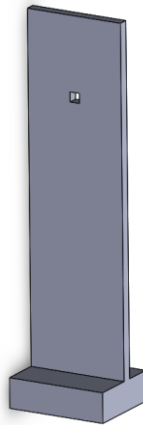


Figura 7.1.4 Supporto per avere solo la luce su 1 mm^2 all'ingresso del sensore (spettrometro)

La soluzione ottimale senza supporti, come già è stata mostrata nel paragrafo 4.3, è in figura 7.1.5, mentre la stessa con l'aggiunta dei supporti è in figura 7.1.6.

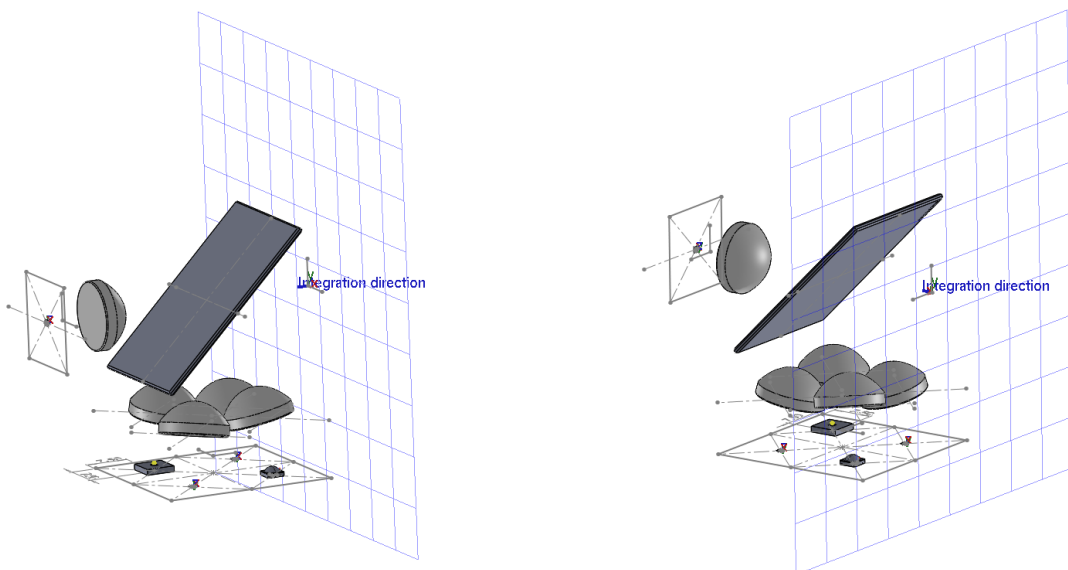


Figura 7.1.5 Soluzione ottimale senza supporti

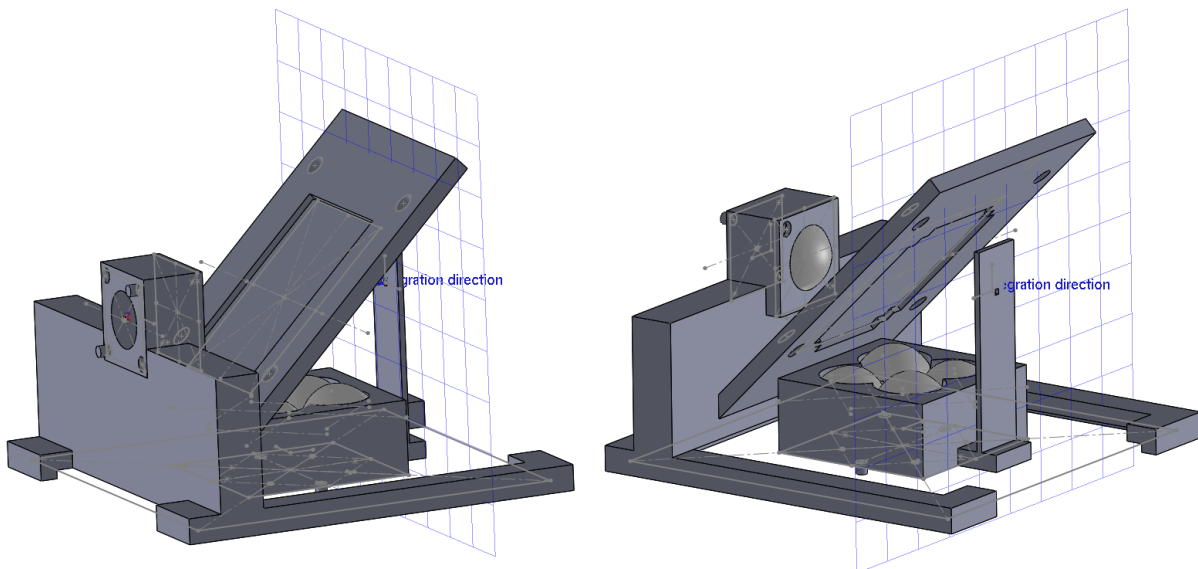


Figura 7.1.6 Soluzione ottimale con l'aggiunta dei supporti per le prove in laboratorio

In parallelo a questi supporti sono state disegnate in EAGLE le PCB dove saldare i LED. Visto che si devono fare solamente delle prove per confrontare l'efficienza su OptisWorks con quella reale, non serve spingere particolarmente con la corrente, quindi sono sufficienti delle PCB in FR4 con piste in rame; in ogni caso, visto che questo tipo di scheda non riesce a dissipare il calore bene quanto le schede in metal core, è meglio disegnare le piste molto grandi e tenere i LED accesi per tempi relativamente brevi se si vuole evitare che essi si surriscaldino. A proposito di correnti basse e bassa temperatura dei LED, va ricordato che sono due fattori particolarmente importanti per limitare rispettivamente gli effetti di Blue-shift e Red-shift.

Le due schede per i LED del gruppo sono osservabili in figura 7.1.7, con quella più piccola che si riferisce al LED a 525 nm mentre quella più grande ai LED a 420, 453, 470 e 490 nm; si nota dalle piste che i LED una volta saldati possono essere comandati in maniera indipendente saldando comodamente i fili di alimentazione e controllo sulle piazzole (i quadratini P\$1) in corrispondenza di anodo e catodo di ogni LED. In realtà, per semplicità i quattro LED sulla base vengono messi tutti in serie saldando delle resistenze da 0Ω tra la pista del catodo di un LED e quella dell'anodo del LED successivo, e li si controlla tutti utilizzando la stessa corrente, con il primo canale dell'alimentatore che è collegato all'anodo del primo LED e al catodo dell'ultimo tramite fili saldati sulle piazzole corrispondenti; contemporaneamente il LED a 525 nm è controllato da una corrente dello stesso valore proveniente dal secondo canale dell'alimentatore.

Nella figura 7.1.7 sono anche evidenziati in grigio chiaro i footprint dei LED.

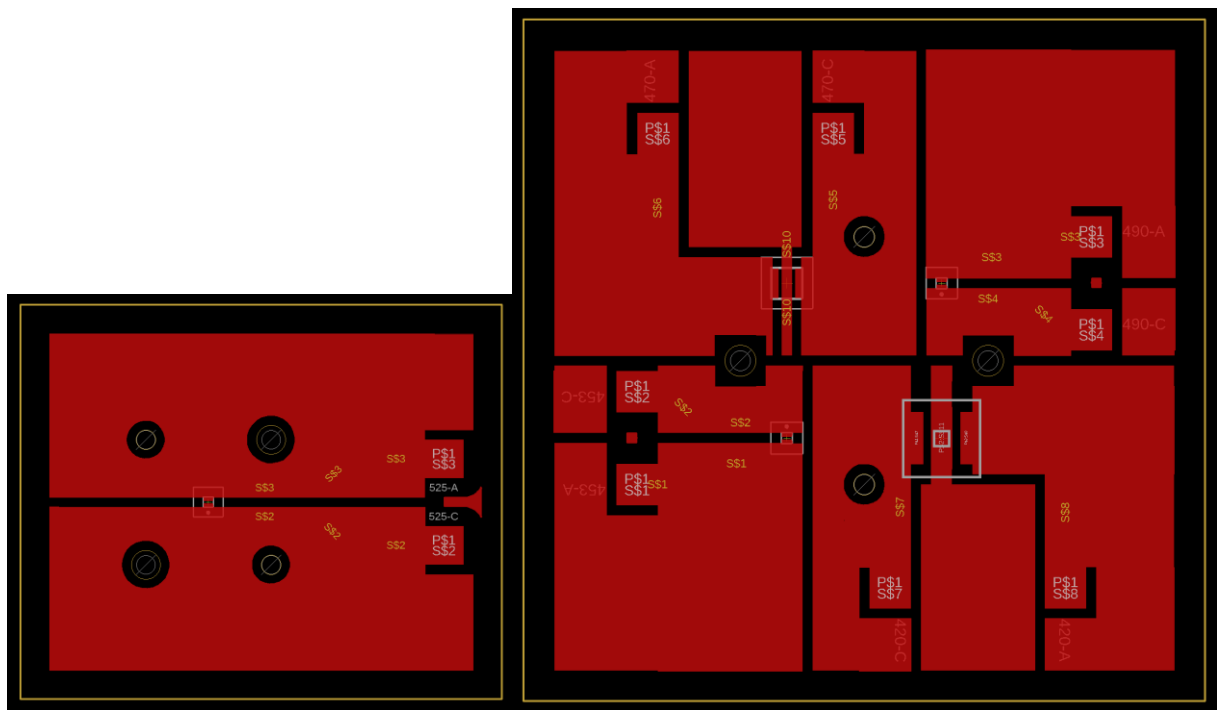
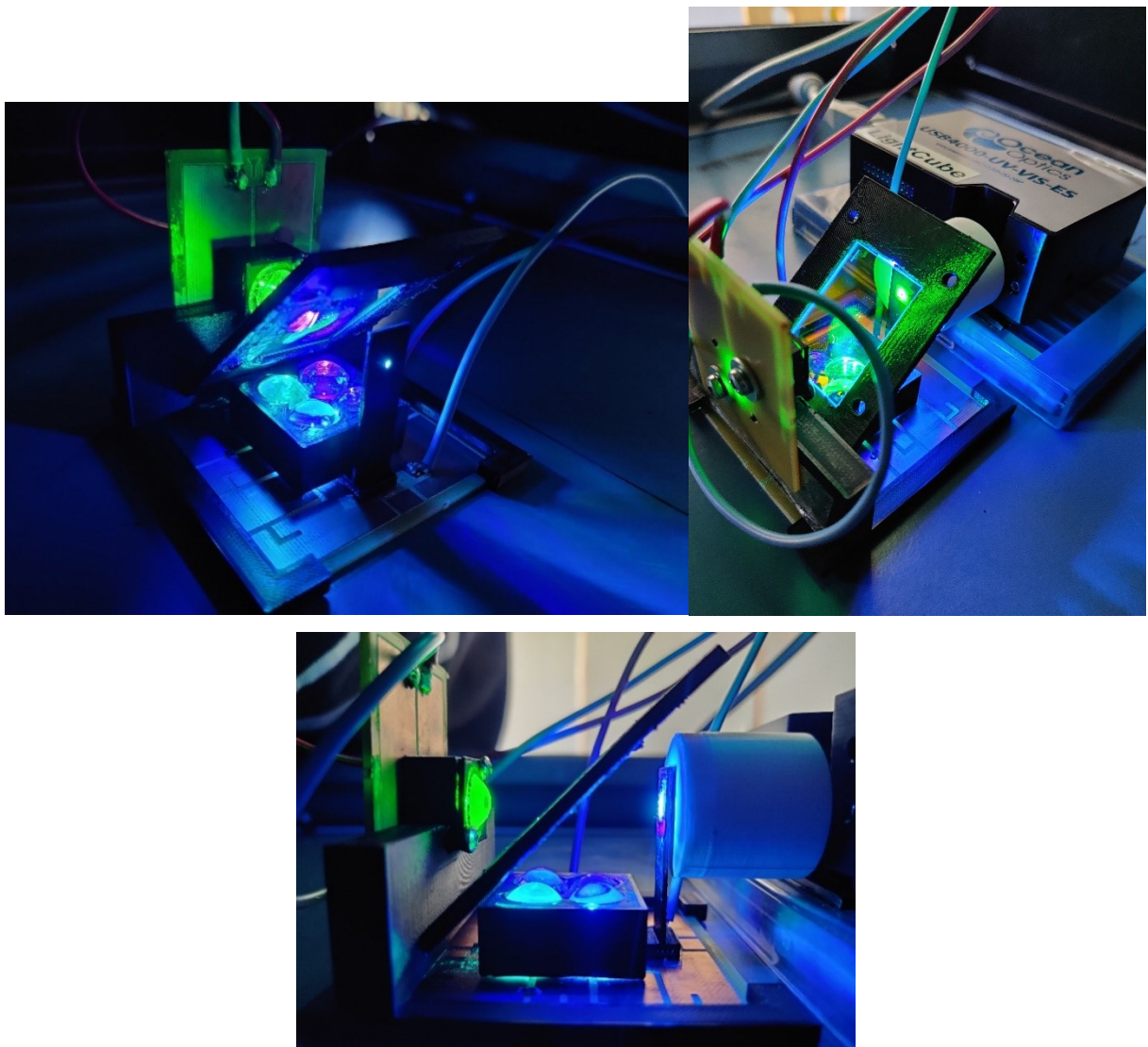


Figura 7.1.7 a) PCB per il LED a 525 nm; b) PCB per i quattro LED sulla base

Il sistema realizzato e il suo setup sono mostrati in figura 7.1.8.



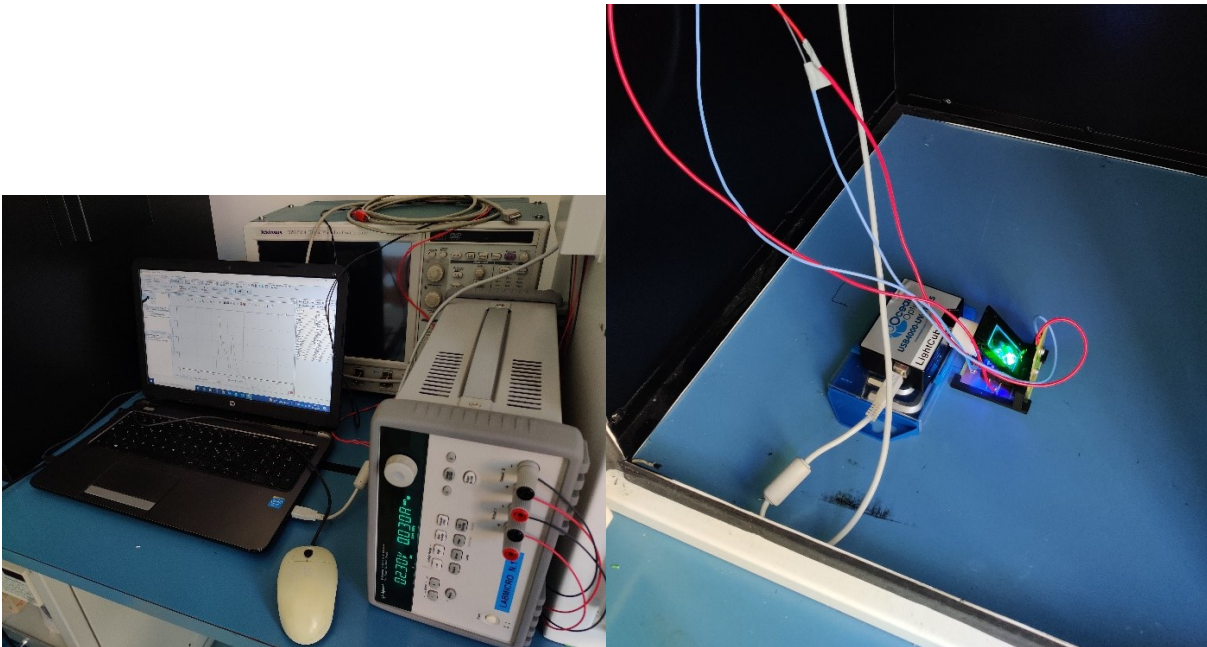


Figura 7.1.8 Sistema e il suo setup

Per questo sistema sono state fatte misurazioni per due valori di corrente diversi, a 30 mA ed a 200 mA; lo spettrometro utilizzato per le prove è lo USB4000 di Ocean Optics utilizzato insieme al programma PC SpectraSuite. In uscita dal sistema, si sono misurati un determinato spettro e una certa potenza radiante, ma per essere più precisi è necessario verificare se il foro sul supporto è stato effettivamente stampato di 1 mm², perché in caso contrario bisogna riportare i risultati ottenuti rispetto all'area del foro. Utilizzando un microscopio e un programma PC, MikroCamLab, si vede che l'area del foro in realtà è 0.82 mm², come mostrato in figura 7.1.9.

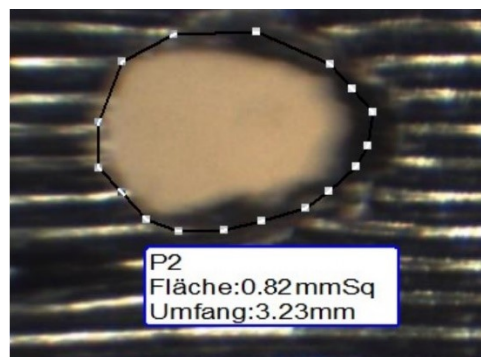
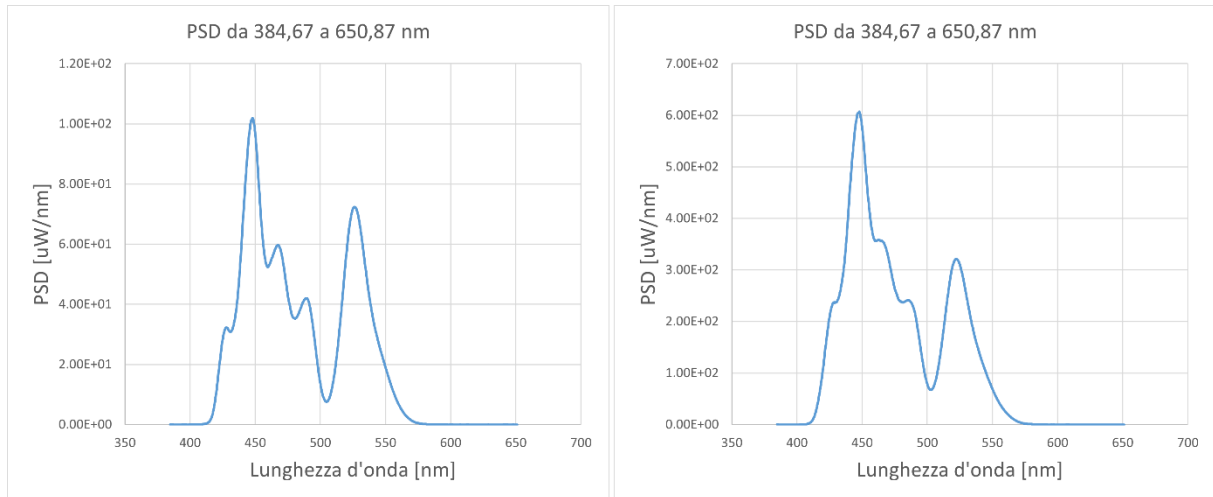


Figura 7.1.9 Area e circonferenza del foro

Di conseguenza, visto che si vuole avere risultati rispetto ad 1 mm², si aggiusta in questo modo:

$$\begin{aligned}
 \text{RisultatoMisurato} : 0.82 \text{ mm}^2 &= \text{RisultatoCorretto} : 1 \text{ mm}^2 \\
 \downarrow & \\
 \text{RisultatoCorretto} &= \frac{\text{RisultatoMisurato}}{0.82}
 \end{aligned}
 \tag{7.1.1}$$

Correggendo così per entrambi i valori di corrente lo spettro e la potenza radiante misurati, si ottiene quanto segue.

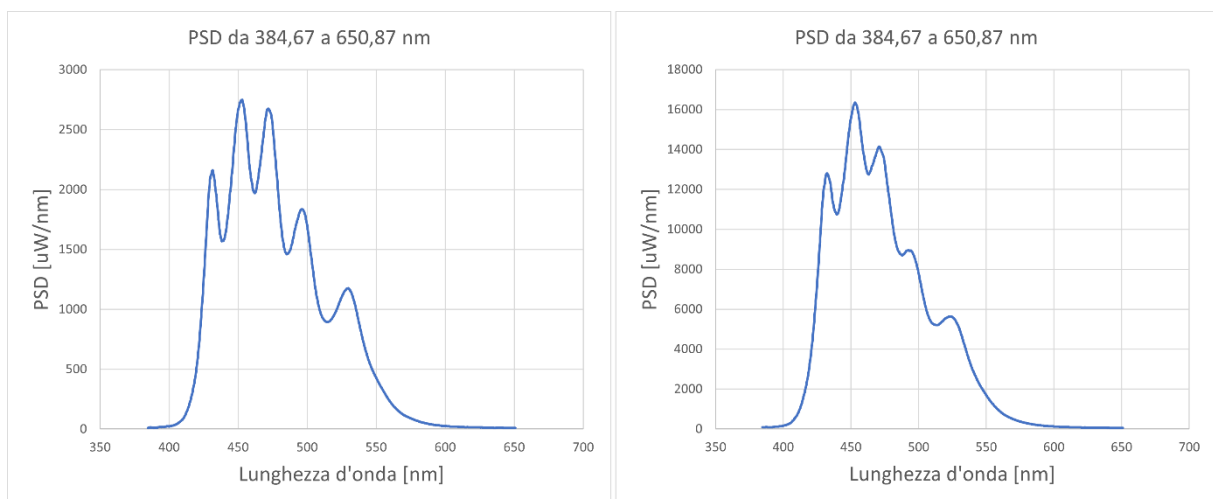


$$\Phi_{e,sistema} = 6.044 \cdot 10^{-3} W$$

$$\Phi_{e,sistema} = 3.510 \cdot 10^{-2} W$$

Figura 7.1.10 Spettro e potenza radiante della luce in uscita dal sistema per una corrente di: a) 30 mA, b) 200 mA

Per ricavare l'efficienza è necessario conoscere anche la potenza radiante totale che i LED producono ed immettono all'ingresso del sistema per gli stessi valori di corrente. Per fare questo, si prendono le due PCB del sistema e si inseriscono all'interno di una sfera integratrice, la quale insieme allo stesso spettrometro di prima permette di misurare quanto interessa.



$$\Phi_{e,LED,tot} = 2.163 \cdot 10^{-1} W$$

$$\Phi_{e,LED,tot} = 1.207 W$$

Figura 7.1.11 Spettro e potenza radiante totale della luce all'ingresso del sistema per una corrente di: a) 30 mA, b) 200 mA

Si ottiene rispettivamente per i due valori di corrente:

$$Eff_{30mA} = \frac{6.044 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{2.163 \cdot 10^{-1} \text{ W}} \cdot 100 = 2.79 \% \quad (7.1.2)$$

$$Eff_{200mA} = \frac{3.510 \cdot 10^{-2} \text{ W}}{1.207 \text{ W}} \cdot 100 = 2.91 \% \quad (7.1.3)$$

Le due efficienze sono molto simili tra di loro, ma non perfettamente uguali, probabilmente perché tra una misura sull'uscita e l'altra lo spettrometro e anche il supporto con il foro sono stati leggermente mossi; quest'ultimo, infatti, è solamente appoggiato rispetto al resto della struttura visto che serve solo a regolare la quantità di luce entrante nello spettrometro ma non sarebbe previsto nel sistema vero e proprio.

Ciò che conta veramente qui è che le due efficienze non solo confermano quella trovata simulando in OptisWorks, ma addirittura la superano. Tuttavia, va sottolineato che nulla garantisce che nel sistema completo permanga la stessa efficienza; in effetti, già solo il fatto che ogni gruppo di LED si trovi ad una distanza sempre maggiore rispetto alla fibra porta a diverse conseguenze in questo ambito, di cui qui però non si discuterà.

Osservando gli spettri si notano un paio di cose.

La prima è che i picchi non hanno la stessa altezza, ma questo è abbastanza ovvio perché i LED, al di là della serie di appartenenza che può anche essere la stessa (453, 490 e 525 nm), sono tutti LED diversi visto che hanno lunghezze d'onda diverse, il che significa che a parità di corrente immessa si ha potenza della luce emessa diversa.

La seconda è che all'uscita i picchi non mantengono la differenza di altezza reciproca che avevano all'ingresso; per fare un esempio, il LED a 525 nm è quello che ha il picco di altezza minore all'ingresso, ma non all'uscita. Questo significa che si ha una diversa efficienza tra le singole componenti, cosa che si era notata anche con le simulazioni, come mostrato in tabella 4.3.2, anche se in quel caso le differenze erano molto più contenute. Ad ogni modo, tutto ciò potrebbe essere dovuto al fatto che le lenti sono sì posizionate per raggiungere le massime prestazioni di focalizzazione sul punto d'interesse con ognuno dei LED, ma queste poi variano da LED a LED a seconda delle sue dimensioni, di conseguenza gli equilibri in uscita è normale che cambino.

Alla fine, globalmente, si ha la potenza in uscita fornita comunque abbastanza uniformemente dalle sorgenti (di fatto la differenza tra una componente e l'altra è poca, non ci sono ordini di grandezza di differenza), ma questo aspetto può essere migliorato ulteriormente, infatti lo spettro potrebbe essere variato a piacimento controllando singolarmente i LED con correnti diverse.

7.2 Sistema con guida di luce

Nel capitolo precedente, è stato detto che su OptisWorks si sono disegnate le guide del sistema omonimo in maniera semplificata, come se fossero formate da un unico pezzo le cui pareti interne hanno le dimensioni desiderate e vengono rese riflettenti modificando le impostazioni delle superfici. Invece, sempre come già detto precedentemente, nella realtà il sistema con guida di luce è formato da un componente plastico disegnato in 3D che ospita al proprio interno la guida di luce vera e propria formata da una lamina estremamente riflettente.

Per realizzare la guida della soluzione ottimale si è cominciato disegnando il supporto 3D mostrato da più prospettive in figura 7.2.1.

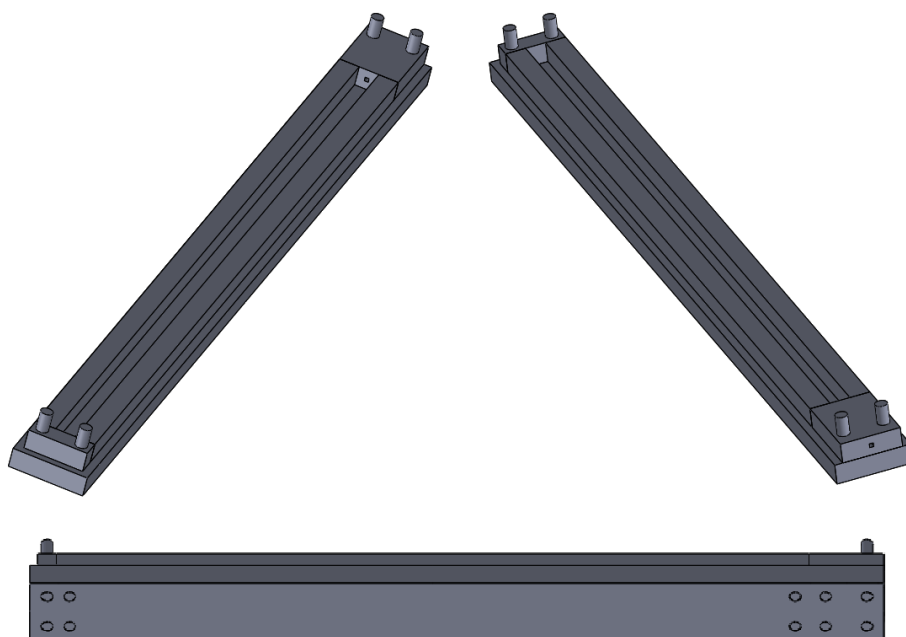


Figura 7.2.1 Supporto plastico 3D per realizzare la guida della soluzione ottimale visto da più prospettive

Tutti i blocchetti di lati, di inizio guida e di fine guida sono ad incastro con la base, quindi possono essere tolti a piacimento. Osservando meglio, il blocchetto di fine guida è quello più grosso e con un foro passante di 1 mm x 1 mm al centro; è realizzato in questo modo per consentire l'inserimento della fibra nuda di diametro 1 mm all'interno di esso, così da mantenerla nella posizione corretta. Complessivamente tutto il supporto ha dimensioni tali che una volta inserita la lamina metallica al suo interno, si ottiene una guida 4 mm x 4 mm x 200 mm, quindi della stessa altezza e larghezza della soluzione ottimale ma più lunga, così da spaziare maggiormente i LED; in ogni caso, nel capitolo precedente simulando si aveva visto che le prestazioni non dovrebbero cambiare molto modificando la lunghezza della guida.

La guida vera e propria è composta da più pezzi di lamina:

- Due pezzettini quadrati per fare da inizio e fine guida, con quest'ultimo chiaramente forato.
- La parete sotto e quelle laterali composte da un unico pezzo piegato ad hoc.
- La parete sopra fa da coperchio per tutto il supporto ed è forata in corrispondenza dei die di emissione dei LED; inoltre sono stati fatti anche dei fori supplementari in modo da mantenerla ferma posizionandola sui quattro cilindretti che si vedono sulla parte superiore del supporto plastico.

Come fatto anche per il sistema precedente, parallelamente si è disegnata in EAGLE la PCB dove vengono saldati i LED, in questo caso i tre Roithner a 420, 680 e 810 nm. Anche qui si utilizzano correnti basse, PCB in FR4, piste grandi e in rame, LED accesi per tempi brevi. La PCB è sempre realizzata in modo da poter controllare i LED in maniera indipendente ma come fatto precedentemente, tramite resistenze da 0Ω saldate tra la pista del catodo di un LED e quella dell'anodo del LED successivo, i LED sono stati messi in serie per poter essere comandati da un'unica corrente, con l'alimentatore che è collegato all'anodo del primo LED e al catodo dell'ultimo tramite fili saldati sulle piazzole (i quadratini P\$1) corrispondenti. Nella figura 7.2.2 è osservabile la PCB in questione; sono evidenziati in grigio chiaro i footprint dei LED.

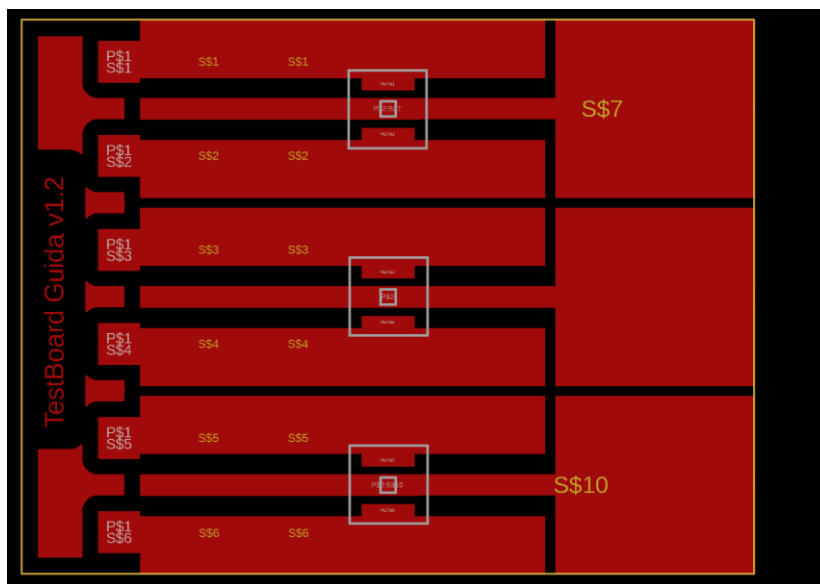


Figura 7.2.2 PCB per i tre LED Roithner (420, 680 e 810 nm)

Rispetto a quanto detto finora, però, sono state necessarie alcune modifiche per la costruzione della guida e per le misurazioni. Le due più importanti sono le seguenti:

- Piegando un unico pezzo lungo 200 mm per realizzare la parete sotto e quelle laterali è estremamente complicato ottenere superfici perfettamente dritte invece che ondulate, soprattutto perché si utilizza una semplice morsa larga 100 mm per farlo; allora, risulta più semplice realizzare due pezzi fatti allo stesso modo ma lunghi 100 mm e inserirli poi nel supporto uno in fila all'altro, eventualmente limandoli se non dovessero combaciare bene.
- Per come è costruito attualmente il sistema non si riesce a porre lo spettrometro esattamente all'uscita della guida vera e propria di lamina, che è dove effettivamente interesserebbe misurare le prestazioni, perché di mezzo c'è il blocchetto plastico di fine guida con il suo spessore ad intralciare; ciò che si fa allora è invertire per queste misurazioni il lato di uscita, semplicemente togliendo il blocchetto plastico di inizio guida ed invertendo i due pezzettini di lamina di inizio e fine.

Il sistema con tali modifiche è visibile in figura 7.2.3, insieme anche al setup usato per eseguire le misurazioni. La lamina superiore, per il materiale di cui è composta e per la lunghezza che essa ha, è abbastanza flessibile, quindi rimane sempre leggermente ondolata, ciò significa che una volta appoggiata come coperchio non riesce a chiudere perfettamente la guida; per migliorare la situazione sono stati aggiunti, almeno come soluzione temporanea, dei pezzi di nastro adesivo insieme a degli elastici in modo da tenere ben premuta la lamina contro il resto della guida, invece che solamente appoggiata.



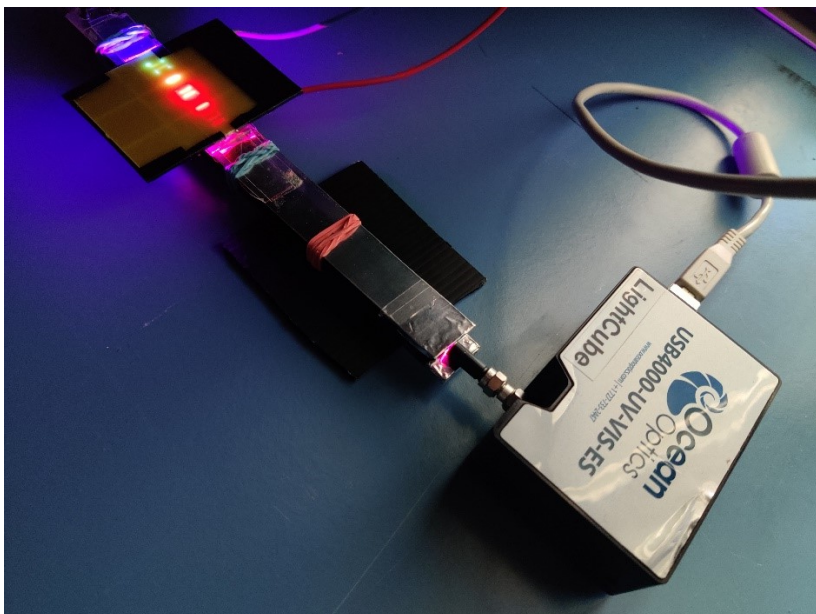
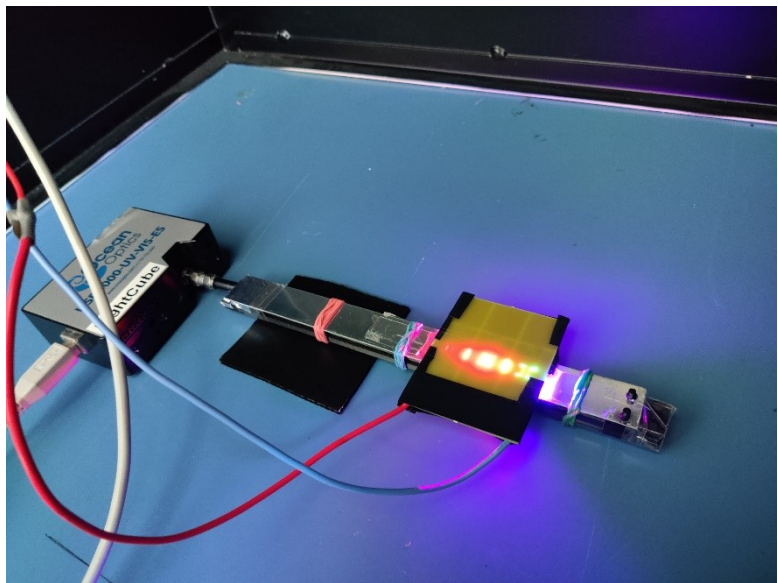
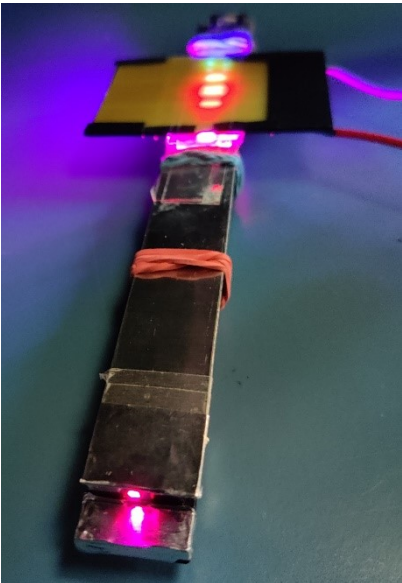


Figura 7.2.3 Sistema e il suo setup

Per questo sistema sono state fatte misurazioni con corrente di 60 mA, utilizzando sempre lo spettrometro USB4000 di Ocean Optics insieme al programma PC SpectraSuite. Come visto nella soluzione ottimale, i fori sulla lamina coperchio hanno circa le dimensioni dei die di emissione dei LED (poco più grandi perché sono stati fatti usando un trapano, quindi i fori circolari circoscrivono quelli quadrati che si sarebbero dovuti fare) e in corrispondenza di essi, come si intravede dalla figura 7.2.3, sono stati posizionati per l'appunto i tre LED; sempre dalla stessa figura si può notare anche che sulla PCB è stato messo del nastro isolante nero per evitare di fare dei cortocircuiti tramite il contatto accidentale con la lamina metallica.

Va fatto notare che questi tre LED sono stati scelti ancora durante le simulazioni su OptisWorks e certamente non a caso: infatti, si sono presi tre LED con lunghezze d'onda abbastanza distanti tra di loro, in modo che lo spettro di ciascuno sia ben distinguibile da quello degli altri.

Parlando di prove, va detto che per completezza ne è stata eseguita una con la PCB in un verso mentre un'altra con la PCB nel verso opposto, ovvero una con i LED ordinati 420, 680 e 810 nm, quindi con l'infrarosso più vicino all'uscita, mentre un'altra con i LED ordinati 810, 680 e 420 nm, quindi con il violetto più vicino all'uscita. In uscita del sistema tali prove hanno dato i seguenti risultati.

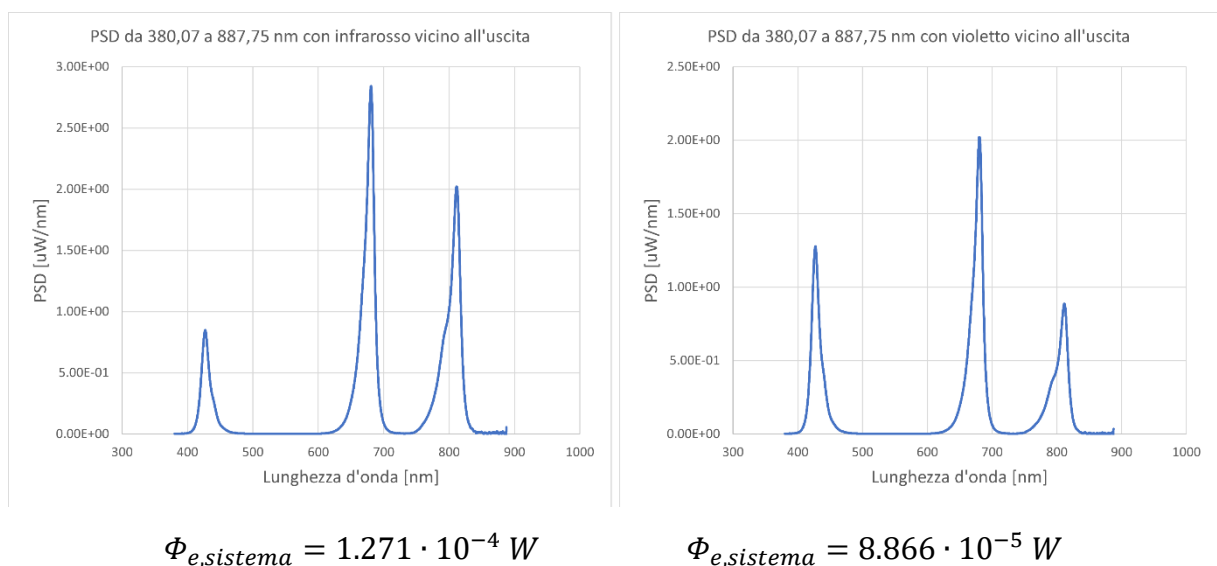
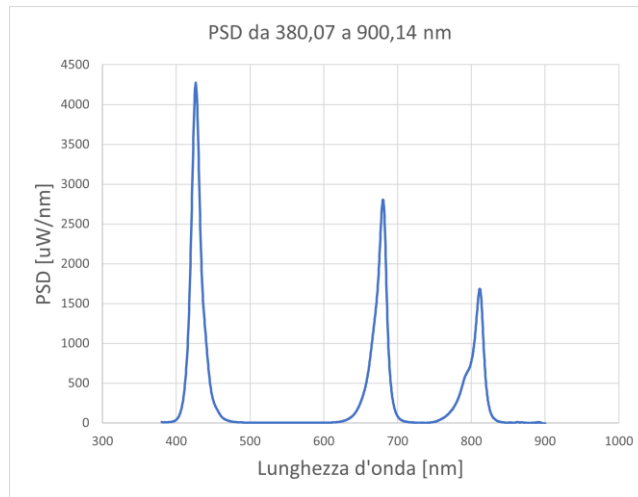


Figura 7.2.4 Spettro e potenza radiante della luce in uscita dal sistema per una corrente di 60 mA

Ovviamente, anche in questo caso, per ricavare l'efficienza è necessario conoscere la potenza radiante totale che i LED producono ed immettono all'ingresso del sistema per lo stesso valore di corrente. Come fatto anche per l'altro tipo di sistema, si prende la PCB del sistema e la si inserisce all'interno di una sfera integratrice, che insieme al solito spettrometro permette di misurare quanto interessa.



$$\Phi_{e,LED,tot} = 1.748 \cdot 10^{-1} W$$

Figura 7.2.5 Spettro e potenza radiante totale della luce all'ingresso del sistema per una corrente di 60 mA

Si ottiene rispettivamente con la scheda in un verso e poi nell'altro:

$$Eff_{420_680_810} = \frac{1.271 \cdot 10^{-4} W}{1.748 \cdot 10^{-1} W} \cdot 100 = 0.07 \% \quad (7.2.1)$$

$$Eff_{810_680_420} = \frac{8.866 \cdot 10^{-5} W}{1.748 \cdot 10^{-1} W} \cdot 100 = 0.05 \% \quad (7.2.2)$$

Le due efficienze, almeno teoricamente, dovrebbero risultare uguali invece sono leggermente diverse, ma di questo verrà discusso in seguito. Ciò che conta veramente ora è che se si confronta quanto ottenuto con la soluzione ottimale su OptisWorks con quanto ottenuto in laboratorio, si vede che si ha 14.1 % contro 0.05-0.07 %, quindi un'enorme differenza che non promette nulla di buono anche in ottica di realizzazione del sistema completo. Tra i motivi che hanno portato a questo risultato scadente ci sono sicuramente:

- La non idealità dell'Alanod MIRO-SILVER 27; come già era stato anticipato, impostare nelle simulazioni la riflettività del 100 % invece che del 98 % come indicato nel datasheet fa una grossa differenza, infatti, a valle dei risultati ottenuti, si è provato a simulare nuovamente la soluzione ottimale impostando il 98 % di riflettività sulle superfici e si è ottenuta un'efficienza 5 volte più piccola rispetto a quella trovata originariamente. In effetti avere 98 % di riflettività significa che ogni singolo raggio perde il 2 % della sua potenza ogni volta che incide sulla lamina e questo avviene diverse volte lungo la strada verso l'uscita. Chiaramente quanto appena descritto non può essere l'unico fattore a fare la differenza essendo l'efficienza reale ben 200 volte più piccola rispetto a quella trovata originariamente, non solo 5 volte, ma comunque fa la sua parte.

- I fori sulla lamina superiore nelle simulazioni erano quadrati, grandi esattamente quanto i die di emissione e perfettamente allineati con essi, invece nella realtà sono stati fatti con il trapano, quindi sono tondi e più grandi dei die, inoltre l'allineamento è eseguito a mano quindi può non essere perfetto.
- Nelle simulazioni tutto era perfettamente riflettente, comprese le superfici laterali di ogni foro e quest'ultima cosa non è per niente realistica, visto che è solo la parte superficiale della lamina ad essere altamente riflettente, non gli strati interni.
- Il foro d'uscita nelle simulazioni era perfettamente quadrato e di 1 mm^2 , invece nella realtà è stato eseguito con il trapano.
- Nelle simulazioni la guida era perfetta e perfettamente isolata. Nella realtà, come è stato detto, la parete sotto e quelle laterali sono ottenute con due pezzi di lamina di lunghezza 100 mm piegati attraverso una morsa: oltre al fatto che i due non combaciano perfettamente neanche limandoli, essi vengono in ogni caso leggermente ondulati; inoltre, piegando la lamina si rovina il materiale e gli spigoli che si formano non sono di certo riflettenti, causando quindi perdite. A tutto questo si aggiunge che già a monte sono stati commessi degli errori di precisione nel momento in cui si sono tagliati manualmente invece che con l'ausilio di una macchina i due pezzi di lamina in questione. Infine, la lamina che fa da coperchio, come già mostrato, è tenuta premuta contro il resto della guida con elastici e nastro adesivo in modo da ridurre le perdite, che però sono comunque presenti. In conclusione, si può dire che la guida costituita dalla lamina è stata costruita in maniera abbastanza imprecisa, d'altronde con gli strumenti a disposizione sarebbe stato difficile fare di meglio; questo però fa capire che tutta la libertà di geometria della guida che si pensava di avere a livello teorico in realtà va ponderata con le difficoltà costruttive a livello pratico.

A questo punto va fatto notare che nel sistema con lo specchio diecrico si aveva misurato l'effettiva area del foro di uscita per aumentare la precisione dei risultati; qui, invece, la differenza di efficienza tra il caso simulato e quello reale è talmente grande che sarebbe sostanzialmente inutile farlo.

Concentrandosi sugli spettri si possono notare un paio di cose.

La prima è che, come già visto, l'efficienza nel secondo caso è leggermente più bassa, infatti tutti i picchi sono più bassi rispetto al primo caso. La seconda è che guardando le altezze relative dei picchi si notano parecchie differenze sia confrontando gli spettri di uscita, sia confrontando questi ultimi con quello d'ingresso. Le cause che portano a questi due fatti potrebbero essere:

- La PCB è posizionata manualmente in corrispondenza dei fori, quindi l'allineamento con essi potrebbe essere che vari leggermente tra un caso e l'altro.

- I LED sono sensibili alla luce che li illumina, in particolare a quella che ha lunghezza d'onda uguale o inferiore a quella che loro stessi emettono; ciò che accade è che il LED emette con una certa lunghezza d'onda e quindi ha un certo energy gap, quindi se è illuminato con fotoni che hanno lunghezza d'onda inferiore cioè energia maggiore riesce in parte ad assorbirli ed in seguito a riemetterli con la sua lunghezza d'onda di emissione. Anche se questo processo è poco efficiente, perché in realtà i LED non sarebbero progettati per farlo, è qualcosa che può avvenire e di cui tenere conto, specialmente se la luce viaggia tutta nella stessa cavità ed entra in contatto con tutti i LED del sistema. Qui in particolare si ha che entrambi i LED a 810 e 680 nm in parte assorbono e riemettono la luce del 420 nm, infatti il picco di quest'ultimo, che all'ingresso era il più alto, si è ridotto notevolmente rispetto agli altri due; dopodiché, il LED a 810 nm in parte assorbe e riemette anche la luce del 680 nm, difatti la differenza relativa tra il picco dell'810 nm e del 680 nm è ridotta rispetto a quella originale che si vede nello spettro della luce all'ingresso del sistema. Il fenomeno probabilmente è anche più forte quando i LED sono ordinati come nel primo caso perché così i LED (eccetto quello con lunghezza d'onda più alta) si trovano obbligatoriamente e direttamente davanti a loro, sulla strada verso l'uscita, qualcosa che in parte assorbe e riemette la loro luce; in questa situazione il picco del 420 nm diventa addirittura il più piccolo. Il simulatore ottico non teneva conto di questo effetto.
- Su OptisWorks il primo approccio, cioè quello con fori più piccoli, permetteva di cancellare il particolare effetto di perdita descritto mentre si facevano simulazioni con il secondo approccio, infatti in tabella 6.3.1 l'efficienza delle singole componenti era sostanzialmente la stessa; invece, nella realtà l'effetto potrebbe non essere stato del tutto cancellato. In effetti, concentrandosi su solo uno dei tre LED, per esempio su quello a 420 nm, si vede che esso ha meno potenza quando è quello più distante all'uscita dei tre rispetto a quando lo stesso è quello più vicino.

Conclusioni

Il lavoro di questa tesi si è focalizzato sullo sviluppo e sullo studio di un sistema di illuminazione multiwavelength in fibra ottica, fino a trovare una soluzione sufficientemente efficiente per realizzarlo in maniera completa fisicamente. L'efficienza è il principale metro di paragone che è stato utilizzato in quanto è fondamentale nel momento in cui si ha una certa radiazione ottica all'ingresso del sistema riuscire a non sprecarla immettendone il più possibile nella fibra; per ogni sistema è stata considerata la potenza in uscita su 1 mm^2 , che è circa l'area di una fibra ipotetica di diametro 1 mm, insieme alla potenza totale all'ingresso, le quali sono servite a calcolare appunto l'efficienza. Inoltre, sono stati considerati anche altri parametri quali l'uniformità della radiazione ottica in uscita e l'angolo di ingresso nella fibra.

Per prima cosa è stato fatto un processo di selezione delle sorgenti luminose da acquistare ed utilizzare, cioè dei LED. Tenendo in considerazione diversi aspetti e requisiti, tra cui quello fondamentale della disponibilità, con dei compromessi è stata compilata una lista di 24 LED.

Dopodiché, si è iniziato a pensare a come si potrebbe realizzare il sistema in questione; inizialmente sono state presentate le idee che, a causa dei numerosi e variegati problemi che le caratterizzano, poi non hanno avuto sviluppi. A quel punto, si è passati ad esporre le tre idee che poi hanno avuto sviluppi nei capitoli successivi, che consistono nel realizzare il sistema con specchi dicroici, con light pipe homogenizing rods oppure con guida di luce. Inoltre, è stato presentato brevemente anche il procedimento standard che a grandi linee si è seguito per sviluppare e studiare questi tre tipi di sistema; si è anche aperta una parentesi per parlare del software OptisWorks, il quale ha consentito di fare disegni e simulazioni ottiche in 3D.

La prima tipologia di sistema analizzata è quella che utilizza degli specchi dicroici. Si è iniziato spiegando il funzionamento degli specchi dicroici e complessivamente di questo tipo di sistema. Successivamente, si è ricavato dal sistema completo un prototipo di dimensioni ridotte, quello che è stato chiamato "sistema base", con il medesimo principio di funzionamento ma che utilizza un insieme ristretto di LED; di esso sono stati visti nei dettagli le caratteristiche dello specchio dicroico e delle lenti che sono stati scelti per realizzarlo. Non conoscendo bene come si sarebbero comportate le lenti in questione in combinazione con i LED, inizialmente sono state fatte delle simulazioni per capirlo; di particolare interesse era la situazione in cui la lente veniva mossa (allontanata o avvicinata rispetto al LED, spostata lungo il piano xy, inclinata rispetto al proprio asse) e si voleva luce focalizzata su un certo spot. Una volta studiato il comportamento delle lenti si è passati a fare simulazioni per posizionare queste ultime in modo da massimizzare la potenza in uscita su 1 mm^2 , così da massimizzare l'efficienza del sistema

base ed ottenere quindi la sua soluzione ottimale. Alla fine di questo lavoro si è trovato che tale soluzione ottimale ha un'efficienza del 2 %, frutto del posizionamento e delle caratteristiche ottiche di lenti, specchio e fibra. Inoltre, una cosa importante che si è notata è che se si dovesse realizzare il sistema completo mantenendo la geometria pensata, sarebbe necessario cambiare specchi diecrici perché quelli trovati non hanno bande di riflessione e trasmissione sufficientemente ampie e costanti per riuscire a miscelare la radiazione ottica di tutti i LED del sistema.

La seconda tipologia di sistema analizzata è quella che si affida ai light pipe homogenizing rods. Essi hanno diverse forme e dimensioni quindi non si poteva conoscere a priori quale fosse la configurazione più giusta da utilizzare nel sistema completo, perciò ci si è affidati agli studi sul sistema base per deciderlo in seguito. Non avendo linee guida il sistema base è cambiato molto dalla sua prima versione fino alla soluzione ottimale. Si è cominciato con un rod a faccia esagonale in vetro N-BK7 con apertura di base (due volte l'apotema) 20 mm e lunghezza 200 mm, di cui si sono state mostrate le principali caratteristiche, insieme al gruppo di LED davanti ad una delle due basi; poi si è proseguito provando con l'aggiunta di lenti in un verso o nell'altro, spostando il gruppo di LED, cambiando le dimensioni e il materiale del rod, cambiando la forma del rod, fino a che si è ottenuta la soluzione ottimale utilizzando il tapered rod (5 mm x 5 mm) x (2.5 mm x 2.5 mm) x 100 mm e il gruppo di LED davanti alla faccia grande leggermente decentrato. Si è trovata un'efficienza del 3 %, frutto soprattutto delle perdite di radiazione ottica lungo le pareti inclinate del rod. Inoltre, si è notato che si ha un'incognita sull'angolo di arrivo dei raggi sulla fibra, che probabilmente è eccessivamente ampio. A questo punto si sono sfruttate le prove fatte e si è iniziato a cercare di capire come si potesse realizzare il sistema completo in modo da avere una buona efficienza, ma ci si è accorti che non si è in grado di farlo combinando i rod e le configurazioni viste, infatti si è ottenuta un'efficienza dello 0.24 %. Inoltre, va sottolineato che tutti i rod utilizzati finora non sono neanche completamente adatti per i LED del sistema a causa della loro banda di funzionamento. Ciò che è chiaro già in questa fase al simulatore ottico è che, nonostante con la soluzione ottimale del sistema base si sia ottenuta un'efficienza superiore rispetto alla corrispondente del sistema con specchi diecrici, con il sistema completo non si è in grado di replicare tale risultato, rendendo quindi inutili future prove in laboratorio.

La terza tipologia di sistema analizzata è quella che fa uso di una guida di luce. Essa può avere, almeno teoricamente, qualunque forma e dimensione essendo formata da un modello in 3D disegnato a piacimento con OptisWorks poi rivestito internamente da una lamina metallica estremamente riflettente; viste le libertà ancora superiori rispetto al sistema precedente, qui a maggior ragione non si poteva conoscere a priori quale fosse la guida più giusta da utilizzare

nel sistema completo, dunque ci si è affidati agli studi sul sistema base per deciderlo in seguito. Anche in questo caso, non avendo linee guida il sistema base è cambiato molto dalla sua prima versione fino alla soluzione ottimale. Si è cominciato con una guida che replicasse la forma e le dimensioni del rod della soluzione ottimale del sistema precedente; con questa si sono ottenute sostanzialmente le medesime prestazioni già viste nel sistema con rods, quindi si è passati a modificare la guida per provare ad ottenere prestazioni superiori. Dopo aver provato con guide di diverse dimensioni e con diverse configurazioni di LED e fori, si è giunti alla conformazione della soluzione ottimale, la quale ha un'efficienza del 14.1 %, merito dei fori di piccola dimensione e degli aggiustamenti fatti sulla guida. Ora, sfruttando le prove fatte si è iniziato a cercare di capire come si potesse realizzare il sistema completo in modo da avere una buona efficienza e, a differenza del tipo di sistema precedente, qui si è visto che si riuscirebbe ad ottenere un'efficienza del 2.5 %, che è buona considerando che si stanno utilizzando tutti i LED, ma comunque più bassa di quella della soluzione ottimale; questo probabilmente è dovuto al fatto che ci sono comunque molti più fori sulla guida, visto che ci sono più LED, e che vengono fatti per circa metà dei LED fori di dimensioni maggiori rispetto a quelli fatti per la soluzione ottimale.

A questo punto si è passati alle prove in laboratorio in cui, dopo aver realizzato i supporti plastici per i sistemi e le PCB per i LED, si sono provate fisicamente le soluzioni ottimali dei sistemi con specchi diecrici e con guida di luce. Tali prove hanno confermato le prestazioni di quella con specchio diecrico, che anzi ha un'efficienza superiore a quella simulata (2.79-2.91 %), ma non hanno fatto lo stesso con quella con guida di luce, la quale presenta un'efficienza estremamente più bassa rispetto a quella simulata (0.05-0.07 %); la differenza trovata nel sistema con guida è tale soprattutto a causa delle semplificazioni e idealizzazioni fatte durante le simulazioni, infatti nella realtà la guida presenta diverse imprecisioni costruttive oltre che una non perfetta riflettività della lamina. Osservando gli spettri di ingresso e uscita si sono notati inoltre degli effetti di assorbimento-riemissione e di perdita, oltre che probabili errori nel posizionamento manuale della PCB con i LED rispetto alla guida.

Riassumendo, alla fine le prove svolte con il simulatore ottico fanno escludere la soluzione con rods mentre le prove svolte in laboratorio fanno escludere quella con guida di luce, lasciando come unica opzione quella con specchi diecrici, la quale guardando la soluzione ottimale del sistema base ha una buona efficienza a livello teorico e una ancora migliore a livello pratico. Inoltre, si ricorda che con essa la radiazione ottica ha anche un angolo di ingresso nella fibra adeguato; oltretutto, usando semplicemente un'unica corrente dalle prove pratiche si è visto che la potenza in uscita è fornita abbastanza uniformemente dalle sorgenti, ma si può migliorare ulteriormente, infatti lo spettro potrebbe essere variato a piacimento controllando singolarmente

i LED con correnti diverse. In ogni caso, a differenza degli altri due tipi di sistema, non si è eseguita alcuna simulazione sul sistema completo con specchi diecrici, quindi non si ha alcun tipo di prova a disposizione per dire che la sua efficienza risulterà vicina a quella trovata con il prototipo costruito finora. Inoltre, va sempre ricordato che per il sistema completo, mantenendo la geometria del sistema così come pensata, gli specchi diecrici trovati non sono adatti e che ne servirebbero con bande di riflessione e trasmissione più ampie e costanti; a questo c'è da aggiungere che anche cambiando geometria, magari ramificando gli specchi invece di tenerli in fila, sarebbe comunque necessario che almeno lo specchio più vicino all'uscita, il quale riceve la radiazione ottica di tutti i LED del sistema, abbia le bande ampie. Tuttavia, le altre due tipologie per motivi già noti andavano comunque escluse, ma soprattutto va detto che in alcuni sistemi che hanno più o meno le stesse funzionalità di quello da realizzare e che si trovano già in commercio vengono utilizzati proprio degli specchi diecrici per miscelare la radiazione ottica dei LED che hanno come sorgenti, un fatto, questo, molto incoraggiante.

Concludendo, si può dire che una soluzione sufficientemente efficiente per realizzare il sistema d'interesse in maniera completa è stata trovata, com'era da obiettivo per questo lavoro di tesi, la quale, riassumendo, utilizzerebbe 9 specchi diecrici per miscelare e portare alla fibra ottica in uscita la radiazione ottica di 24 LED con lunghezze d'onda andanti da 275 a 980 nm, questi ultimi accoppiati ad altrettante lenti, con efficienza reale della soluzione ottimale del suo prototipo (5 LED e 1 specchio) del 2.79-2.91 %.

Bibliografia

- [1] M. Buffolo *et al.*, “Defects and Reliability of GaN-Based LEDs: Review and Perspectives,” *Phys. status solidi*, vol. 219, no. 8, pp. 2–7, Apr. 2022, doi: 10.1002/pssa.202100727.
- [2] E. Fabris *et al.*, “Breakdown Walkout in Polarization-Doped Vertical GaN Diodes,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 66, no. 11, pp. 4597–4603, Nov. 2019, doi: 10.1109/TED.2019.2943014.
- [3] E. Fabris *et al.*, “Trapping and Detrapping Mechanisms in β -Ga₂O₃ Vertical FinFETs Investigated by Electro-Optical Measurements,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, no. 10, pp. 3954–3959, Oct. 2020, doi: 10.1109/TED.2020.3013242.
- [4] K. Mukherjee *et al.*, “Analysis of threshold voltage instabilities in semi-vertical GaN-on-Si FETs,” *Appl. Phys. Express*, vol. 13, no. 2, p. 024004, Feb. 2020, doi: 10.35848/1882-0786/ab6ddd.
- [5] P. Zotto, S. Lo Russo, and P. Sartori, *Fisica generale, elettromagnetismo, ottica*, 2nd ed. La Dotta, 2017.
- [6] M. L. Martin-Fernandez and D. T. Clarke, “Single molecule fluorescence detection and tracking in mammalian cells: the state-of-the-art and future perspectives,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 13, no. 11, pp. 14742–65, Nov. 2012, doi: 10.3390/ijms131114742.
- [7] J. O. Grepstad and J. Skaar, “Total internal reflection and evanescent gain,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 22, p. 21404, Oct. 2011, doi: 10.1364/OE.19.021404.
- [8] “What is Numerical Aperture of Optical Fiber? Definition and Derivation of Numerical Aperture of Optical Fiber - Circuit Globe.” <https://circuitglobe.com/numerical-aperture-of-optical-fiber.html> (accessed Mar. 21, 2022).
- [9] G. Verhoeven, “Did the digital (r) evolution change the concept of focal length?,” *AARGnews*, vol. 34, no. March, pp. 30–35, 2007.
- [10] “Image Formation by Lenses | Physics.” <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/25-6-image-formation-by-lenses/> (accessed Mar. 22, 2022).
- [11] “N-BK7 Plano-Convex Lenses (Uncoated).” https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=112 (accessed Mar. 23, 2022).
- [12] J. Gomes, L. Velho, and M. Costa Sousa, “Radiometry and Photometry,” in *Computer Graphics*, 1st ed., New York: A K Peters/CRC Press, 2012, pp. 489–508.

- [13] A. Giannini, “Radiometric and Photometric Quantities and Laws,” in *Sustainable Indoor Lighting. Green Energy and Technology*, P. Sansoni, L. Mercatelli, and A. Farini, Eds. London: Springer, 2015, pp. 1–22.
- [14] P. Pattison *et al.*, “2018 DOE Solid-State Lighting R&D Opportunities,” 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.12827.52009.
- [15] F. Aldegheri, “Studio teorico e sperimentale dell’efficienza ottica di concentratori solari rifrattivi con metodo diretto e inverso,” Università degli Studi di Ferrara, 2010.
- [16] Texas Instruments, “An Etendue how-to: A brief introduction to etendue in projection systems | TI.com,” 2019. <https://training.ti.com/etendue-how-brief-introduction-etendue-projection-systems> (accessed Mar. 29, 2022).
- [17] H. Zhu and P. Blackborow, “Etendue and Optical Throughput Calculations.” pp. 1–5, 2011, [Online]. Available: <https://www.energetiq.com/etendue-and-optical-throughput-calculations>.
- [18] A. C. Sparavigna, “Light-Emitting Diodes in the Solid-State Lighting Systems,” *Int. J. Sci.*, vol. 3, no. 11, pp. 9–17, 2014, doi: 10.18483/ijSci.593.
- [19] Q. V. Trinh, “Characterization, optimization and stabilization of the lighting quality aspects of high qualitative hybrid LED-lamps by development of transient LED models,” 2013.
- [20] S. O. Kasap, *Principles Of Electronic Materials And Devices*, 3rd ed. Tata Mcgraw Hill, 2005.
- [21] RoithnerLaserTechnik, “SMB1N-420H Datasheet,” 2018. [Online]. Available: http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_highsingle/smb1n-420h.pdf.
- [22] H. Li *et al.*, “Efficient Semipolar (11–22) 550 nm Yellow/Green InGaN Light-Emitting Diodes on Low Defect Density (11–22) GaN/Sapphire Templates,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 41, pp. 36417–36422, Oct. 2017, doi: 10.1021/acsami.7b11718.
- [23] S. O. Kasap, *Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices*, 2nd ed. Pearson, 2013.
- [24] “MechaTronix - Light Distribution.” <https://www.horti-growlight.com/en-gb/light-distribution> (accessed Apr. 08, 2022).
- [25] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [26] Optostar, “Singlemode Tree/Star Coupler,” 2013. [Online]. Available: <http://www.optostar.com.cn/optostar-en/productdetail/images/Splitter/FBT/SM-T/SM-T-FBT-Splitter-V20130512.pdf>.
- [27] K. Boatright, “TI DLP technology for laser TV displays,” Aug. 2018. [Online].

- Available: <https://www.ti.com/lit/wp/dlpc105a/dlpc105a.pdf>.
- [28] Philips, “Immerse yourself with Philips ColorSpark HLD LED for digital projectors,” 2015. [Online]. Available: https://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Global/ODLI20160324_001-UPD-en_AA-Final-DPL-Color-Spark-HLD-LED-Brochure-Oct-2015.pdf.
- [29] “Longpass Dichroic Mirrors/Beamsplitters.” https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3313 (accessed May 09, 2022).
- [30] “Aspheric Condenser Lenses.” https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3835 (accessed May 16, 2022).
- [31] “Ray Optics Simulation.” <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/> (accessed May 24, 2022).
- [32] “N-BK7 Light Pipe Homogenizing Rods | Edmund Optics.” <https://www.edmundoptics.eu/f/n-bk7-light-pipe-homogenizing-rods/13327/> (accessed Jun. 03, 2022).
- [33] “Fused Silica Light Pipe Homogenizing Rods | Edmund Optics.” <https://www.edmundoptics.eu/f/fused-silica-light-pipe-homogenizing-rods/13673/> (accessed Jun. 06, 2022).
- [34] “Tapered Light Pipe Homogenizing Rods | Edmund Optics.” <https://www.edmundoptics.eu/f/tapered-light-pipe-homogenizing-rods/13681/#> (accessed Jun. 06, 2022).
- [35] Alanod, “Lighting applications,” pp. 1–16, Oct. 2019.
- [36] Alanod, “4270AG - Product Data Sheet,” 2013. [Online]. Available: <https://www.grupogcm.com/datasheets/alanod/4270AG.pdf>.