



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Tesi di Laurea Triennale

Studio di una lente di Fresnel per applicazioni al fotovoltaico

Relatore: Maria Guglielmina Pelizzo

Laureando: Cristian Lorenzin

30/03/2012

Questo documento è stato scritto in L^AT_EX su Debian GNU/Linux.
Tutti i marchi registrati appartengono ai rispettivi proprietari.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Componenti radiazione solare	1
1.2	Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica	2
1.3	I semiconduttori	2
1.3.1	Struttura della materia, bande energetiche e atomo di Bohr	3
2	L'impianto fotovoltaico	7
2.1	Cella fotovoltaica	7
2.1.1	I semiconduttori impiegati nelle celle fotovoltaiche	7
2.1.2	Multi-junction	8
2.1.3	Multi-junction InGaN, InGaN/GaN	8
2.2	Il dispositivo di inseguimento	11
2.3	Il concentratore	12
2.3.1	Non imaging optics	12
2.3.2	Categorie di concentratori	13
3	Analisi del concentratore di Fresnel	15
3.1	Introduzione	15
3.1.1	Lenti di Fresnel come concentratori solari	17
3.2	Effetto delle aberrazioni cromatiche introdotte da una lente di Fresnel sul rendimento di una MJ GaInP/GaAs/Ge	17
3.2.1	Aberrazione cromatica laterale	18
3.2.2	Aberrazione cromatica assiale	18
3.3	Parametri operativi base	19
3.4	Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system	20
3.4.1	Introduzione	20
3.4.2	Una lente modulare di Fresnel	20
4	Svolgimento al calcolatore	25
4.1	Cosa è Zemax	25
4.2	Tool utilizzati in Zemax	25

4.2.1	LDE, Layout	26
4.2.2	Spot Diagram	26
4.2.3	Full Field Spot Diagram	26
4.2.4	Geometric Encircled Energy	27
4.2.5	Optical path difference	27
4.3	Fase operativa	27
4.3.1	Dati rilevati con BK7	29
4.3.2	Dati rilevati con glass PMMA	34
4.4	Lente di Fresnel in un contesto più realistico	40
4.4.1	Sistema ingrandito monolente	42
4.4.2	Miglioramento delle prestazioni mediante introduzione di un'ottica secondaria	45
4.4.3	Configurazione finale del sistema di concentrazione	57
4.5	Considerazioni sulle dimensioni della lente secondaria	63
4.6	Materiali impiegati	66
4.7	Confronto nella distribuzione sul piano immagine con e senza ottica secondaria	68
5	Conclusioni	71
	Bibliografia	73

Capitolo 1

Introduzione

Al fine di apprezzare al meglio le caratteristiche di una lente di Fresnel e del sistema in cui essa viene posta, è utile rinfrescare le idee per quanto concerne il contesto fisico in cui si cala il problema. Non è scopo di questo elaborato dare una giustificazione fisica nel dettaglio del fenomeno ma verranno comunque fatte delle brevi introduzioni su:

- Componenti della radiazione solare;
- Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica;
- I semiconduttori.

1.1 Componenti radiazione solare

La radiazione solare è assimilabile a quella di un corpo nero alla temperatura di 5800 K.

L'intensità riscontrabile ad una unità astronomica dalla superficie terrestre, anche denominata costante solare, si attesta a $1367 \frac{W}{m^2}$.

La radiazione rilevata fuori dall'atmosfera terrestre è detta radiazione extraterrestre.

Non appena la radiazione solare entra nell'atmosfera terrestre interagisce con tutto ciò che incontra lungo il suo cammino.

Gli elementi che maggiormente interagiscono sono ozono, ossigeno, diossido di carbonio e vapore acqueo. Conseguenza di questa interazione è la variabilità dell'irradianza sulla superficie terrestre dovuta al parziale assorbimento di alcune lunghezze d'onda durante il loro cammino fino alla terra.

Un parametro utile per riferirsi in modo conciso all'effetto dell'atmosfera sulla radiazione solare che transita attraverso la radiazione terrestre è l'Air Mass. Questo parametro indica la lunghezza del percorso compiuto dalla luce relativamente al percorso più breve percorribile da un raggio nell'atmosfera terrestre.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_{ZS}} \quad (1.1)$$

È convenzione in una giornata soleggiata, in condizioni standard, porre $AM=1000 \frac{W}{m^2}$.

Con questa intensità è abituale condurre le simulazioni.

Ciò che è importante aver chiaro in mente, oltre al valore precedente, è che il cammino nell'atmosfera assorbe l'intensità di bande spettrali precise (dovute alla trasmittanza di determinate sostanze in funzione dell'angolo di ingresso della radiazione nell'atmosfera terrestre).

Alla luce delle precedenti considerazioni, una volta stabilito l' $AM(n)$ in cui si intende collocare il sistema dotato di celle fotovoltaiche, si tratta di utilizzare giunzioni il cui energy gap sia il più possibile in correlazione con le lunghezze d'onda che portano più energia, quindi in funzione del determinato $AM(n)$.

1.2 Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica

I semiconduttori hanno la capacità di convertire l'energia della radiazione elettromagnetica incidente, appartenente ad un preciso range di lunghezze d'onda, nello spostamento di cariche in una quantità proporzionale all'energia assorbita.

Una cella fotovoltaica è costituita da almeno una giunzione di semiconduttore drogato al fine di essere in grado di convertire l'energia solare in energia elettrica. La luce solare è composta da un ampio spettro di radiazioni elettromagnetiche. Della radiazione solare è indispensabile conoscere le bande spettrali che in maniera più efficace portano energia sul pannello fotovoltaico. A questa informazione si associano gli energy gap della multi-giunzione mediante la scelta di opportuni semiconduttori.

1.3 I semiconduttori

I semiconduttori sono delle sostanze che si possono identificare sulla tavola degli elementi nella terza, quarta e quinta colonna.

Sul piano della resistività sono quelle sostanze che presentano valori compresi tra i 10^{-3} e i $10^5 \Omega \text{ cm}$.

Storicamente il primo materiale utilizzato come semiconduttore fu il germanio che presenta ottime caratteristiche sotto aspetti quali l'ampiezza di banda proibita, ma non ottimali per quanto concerne il costo e la variabilità del comportamento in funzione della temperatura.

Oggi in generale il semiconduttore maggiormente impiegato è il silicio che vista l'ampiezza della sua banda proibita consente di essere utilizzato in un

range di temperature molto piu' ampio senza dover tuttavia patire i difetti del germanio.

Per quanto concerne l'opto elettronica sono prevalentemente impiegati indio, arseniuro di gallio, fosforo, germanio e silicio in base al caso.

Una promessa per il futuro è il nitruro di gallio che dovrebbe permettere di avere semiconduttori affidabili anche a temperature di 1000 K .

1.3.1 Struttura della materia, bande energetiche e atomo di Bohr

I materiali a secondo della loro struttura sono classificati come amorfi, policristallini e cristallini.

I materiali amorfi hanno una struttura completamente disordinata, i cristalli invece presentano un cristallino unico e i policristallini sono costituiti da un'insieme di grani cristallini.

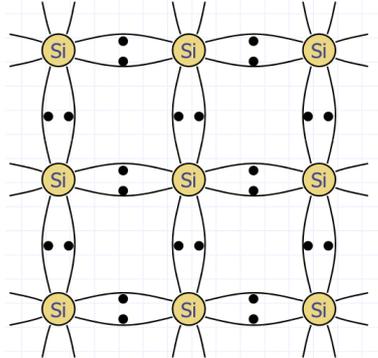
Considerando il modello atomico dell'atomo di Bohr gli elettroni di un atomo si dispongono su orbitali e sono caratterizzati da un'energia di legame. Quest'ultima indica la minima energia che va somministrata ad un atomo per separarlo da un suo elettrone.

Degli elettroni che costituiscono l'atomo, non tutti sono disponibili in ugual modo. A seconda del contesto può costare piu' o meno energia rompere un legame. Gli elettroni che si separano dal cristallino passano dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

La caratteristica che rende i semiconduttori indispensabili come elemento principale per costituire le celle fotovoltaiche è l'energy gap della banda proibita. L'energy gap è una grandezza che si esprime in eV e indica l'ammontare minimo di eV di cui deve essere dotato un fotone per far sì che l'energia assorbita dall'atomo, portata appunto dal fotone, rompa il legame covalente. La ragione per la quale il semiconduttore del pannello fotovoltaico presenta una corrente se colpito da radiazione solare è associabile all'effetto fotoelettrico, che si verifica quando un semiconduttore viene colpito da un fotone sufficientemente energetico o equivalentemente ad una frequenza sufficientemente elevata.

L'effetto fotoelettrico su di un materiale semiconduttore drogato, quindi caratterizzato da un reticolo cristallino mai perfettamente in equilibrio, è di favorire lo spostamento delle cariche piu' debolmente legate al cristallino. Tali cariche sono gli elettroni e le lacune dell'atomo che tendono a muoversi da un atomo all'altro del reticolo. A tale spostamento di cariche è associata la corrente all'interno del semiconduttore.

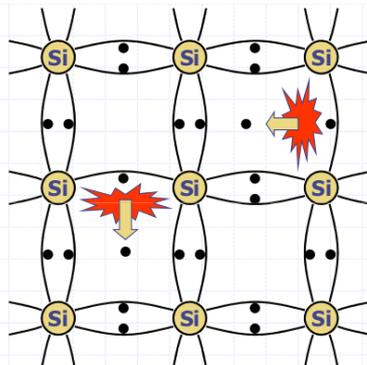
Figura 1.1: Cristallino ordinato



Nell'ipotesi che il cristallino sia ad una temperatura sufficientemente vicina allo zero Kelvin, è possibile dire che nella figura sopra si ottiene un reticolo perfettamente isolante. Vicino lo zero Kelvin infatti non ci sono le condizioni per rompere dei legami covalenti (se non con bassissime probabilità) quindi non c'è flusso di cariche.

Se il suddetto reticolo viene portato a temperatura ambiente ciò che succede è che il sistema inizia ad assorbire calore, quindi energia, per cui aumenta la probabilità che alcuni elettroni possano rompere i legami covalenti della banda di valenza.

Figura 1.2: Il reticolo assorbe calore e si rompe un legame



In funzione di un generico campo elettrico ai capi di un semiconduttore isomorfo, posto a temperatura ambiente, gli elettroni andranno nella direzione opposta delle lacune, ma poichè le due correnti oltre ad aver direzione opposta hanno anche segno opposto si ottiene una corrente che è la somma delle due. Per un semiconduttore isomorfo come il silicio, la corrente ottenuta ponendo ai capi di questo una differenza di potenziale, sarà

debole perchè presenta poche cariche, in quanto ogni ottetto è completo. Ciò è equivalente ad immaginare che la struttura tenda a cercare di mantenere l'ordine al suo interno. Da questa situazione scaturisce la necessità di impiegare semiconduttori drogati, ossia semiconduttori ai quali vengo aggiunte piccolissime quantità di impurezza di uno specifico elemento (appartenente alla terza e quinta colonna della tabella degli elementi).

Per concludere, il goal di questo procedimento, come precedentemente spiegato, è quello di introdurre degli atomi, elettricamente neutri, in grado di assicurare un maggior flusso di cariche nel semiconduttore.

Capitolo 2

L'impianto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico è un sistema il cui obiettivo è la produzione di energia elettrica sfruttando l'effetto fotovoltaico per assorbire l'energia solare.

L'evoluzione di questa tecnologia è molto articolata per via dei molti aspetti che essa comprende.

Gli elementi chiave della sua evoluzione sono le scoperte scientifiche avute luogo nella seconda metà dell'ottocento, i primi moduli funzionanti negli anni '60 (i cui costi erano proibitivi) e il progresso costante nelle sue forme, prestazioni, impieghi.

Tutto ciò è stato ottenuto grazie ai grandi investimenti principalmente destinati al settore militare e spaziale, che hanno visto nella disponibilità di energia solare una risorsa indispensabile, di conseguenza si è potuto approfondire le competenze nel campo dei materiali e delle applicazioni.

Per l'evoluzione vista in questo ambito, un moderno impianto fotovoltaico è caratterizzato dai seguenti elementi:

- Cella fotovoltaica;
- Inseguitore;
- Concentratore;
- Supporto.

2.1 Cella fotovoltaica

2.1.1 I semiconduttori impiegati nelle celle fotovoltaiche

Le celle fotovoltaiche nel tempo si sono evolute per rendimento e forma. In associazione a ciò si ha anche un incremento dei costi che in qualche modo vanno limitati, poiché sono uno dei più grandi freni nell'impiego di questi dispositivi.

Al contempo, senza l'evoluzione delle celle non si potrebbe essere in procinto di raggiungere il 50% del rendimento.

La chiave di volta in questo contesto è il passaggio dalle celle in silicio monocristallino/policristallino (le più largamente utilizzate in una prima fase) alle celle solari al tellurio di cadmio fino alle celle multi-giunzione.

2.1.2 Multi-junction

Per giunzione si intende il punto di contatto tra due semiconduttori di differenti caratteristiche.

Una giunzione multipla è un dispositivo sul quale sono presenti almeno due giunzioni. Un esempio sono le giunzioni doppie e triple che possono essere InGaN/GaN, GaInP/GaAs oppure le GaInP/GaAs/Ge.

Lo scopo di questa tecnologia è quello di utilizzare differenti giunzioni con diversi energy gap al fine di mettere la cella fotovoltaica nelle condizioni di raccogliere più energia, essendo ottimizzata su lunghezze d'onda che ne portano una quantità maggiore.

Conseguentemente il dispositivo risulta in grado di assorbire con maggiore efficienza uno spettro più ampio, tutto ciò a vantaggio di un miglior rendimento, purtroppo con un sensibile aumento del costo delle giunzioni vista la rarità dei semiconduttori.

2.1.3 Multi-junction InGaN, InGaN/GaN

L'entità del band gap della lega che costituisce queste celle rende queste giunzioni utilizzabili sia per applicazioni terrestri che spaziali.

Gli aspetti più interessanti di questa lega sono l'elevata velocità di drift e l'alta resistenza alle temperature e alle radiazioni in generale.

Un film di questa lega si caratterizza per una robusta fotoluminescenza, a tal proposito è interessante ricordare che resiste ad un irraggiamento pari a 2MeV.

Secondo i calcoli del Dipartimento di Ingegneria Elettrica di Lubbock nel Texas, con queste celle si può arrivare a rendimenti anche del 50% se nel layer InGaN è presente circa il 35% di indio.

Realizzare celle solari con un alto contenuto di indio non è sempre facile poiché all'aumentare della percentuale di questo elemento all'interno della cella sopraggiungono non poche complicazioni.

Uno dei problemi più rilevanti è la differenza tra la grandezza dei cristalli tra le leghe InN e GaN.

La questione è stata recentemente risolta mediante impiego della tecnologia MOCVD. Per ciò che concerne le prestazioni è interessante sottolineare la possibilità di variare il drogaggio e di conseguenza l'energy gap in modo continuo tra 0.7 e 3.4 eV.

Ipoteticamente si è in grado di assorbire, a seconda del drogaggio, un range

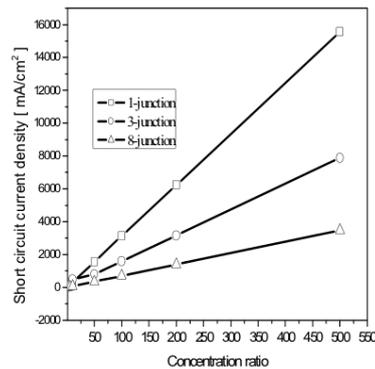
di lunghezze d'onda tale da raccogliere tutte le componenti rilevanti della radiazione solare.

In linea teorica è possibile utilizzare anche una MJ di 8 strati, costituiti dalla medesima lega in cui viene modificato il drogaggio di due semiconduttori adiacenti. Variando le densità degli elementi droganti varia l'energy gap e quindi la lunghezza d'onda raccolta.

Una pubblicazione del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'università di Khulna studia cosa si possa riuscire ad ottenere da una tecnologia MJ costituita da diverse giunzioni di InGaN.

In figura si può subito osservare la variazione di corrente che fluisce dentro una cella al variare del numero di giunzioni e della concentrazione che colpisce la cella.

Figura 2.1: Corrente di corto circuito al variare della concentrazione ottenuta

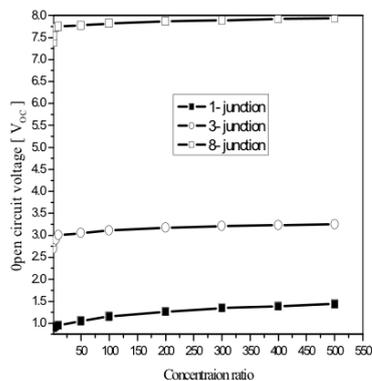


Si può notare che la densità della corrente di corto circuito aumenta linearmente con l'incremento della concentrazione solare per via dell'aumento del numero di fotoni.

È utile tenere presente che con l'incremento del numero di giunzioni aumenta la resistenza equivalente e conseguentemente, a parità di condizioni, la corrente di corto circuito diminuisce.

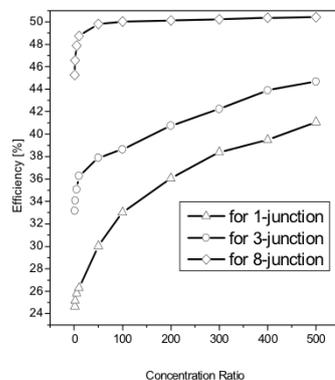
In secondo luogo è proposto il grafico della tensione di circuito aperto ai capi delle celle.

Figura 2.2: Tensione di circuito aperto al variare della concentrazione



Il fattore che rende utile l'impiego dei concentratori solari è il rendimento che si rileva al variare della concentrazione solare ai capi delle multigiunzioni.

Figura 2.3: Stime sui rendimenti



Si può rilevare che all'incremento della concentrazione solare aumenta la corrente di corto circuito e la tensione di circuito aperto cresce col numero di giunzioni.

Di conseguenza il rendimento aumenta in associazione alla concentrazione solare e al numero di giunzioni.

La tabella sottostante raccoglie i dati delle simulazioni in cui si gioca con il numero di soli ed il numero di giunzioni.

Un dato degno di nota è il rendimento sulle giunzioni triple, che possono raggiungere un'efficienza del 42%.

Figura 2.4: Risultati delle varie simulazioni

No of junction	Short circuit current $J_{sc}(mA/cm^2)$		Open circuit voltage $V_{oc}(V)$		Efficiency(%)	
	1-sun	500-sun	1-sun	1-sun	1-sun	500-sun
1	31.15	15575	.8988	1.4441	24.67	41.0784
2	20.47	10235	1.838	2.9301	33.55	44.6779
3	16.10	7895	2.701	3.2541	37.574	46.9215
4	12.18	6086	3.75	4.3051	40.93	47.8052
5	9.79	4895	4.897	5.4481	42.97	48.7064
6	9.50	4750	5.313	5.7451	44.21	49.8402
7	8.15	4070	6.346	6.7791	45.53	50.3912
8	6.95	3475	7.393	7.9421	46.15	50.4056

Come messo in evidenza da numerose ricerche, in futuro verranno probabilmente sviluppate le TJ poichè risultano essere il miglior compromesso tra costi di realizzazione e rendimento raggiunto grazie all'impiego congiunto di concentratore solare e multigiunzioni.

2.2 Il dispositivo di inseguimento

Il dispositivo di inseguimento è un insieme di circuiti e sensori il cui utilizzo è necessario al fine di garantire un utilizzo proprio delle ottiche impiegate.

Il suo funzionamento si basa sull'impiego di un sistema il cui obiettivo è quello di garantire il miglior allineamento tra l'ottica di concentrazione e i raggi del sole. Le soluzioni per sviluppare tale sistema sono:

- Elettronica passiva;
- Controllo con tabelle software;
- Controllo con computer.

A titolo di esempio, l'impiego di dispositivo elettronico integrato che utilizza elettronica passiva potrebbe essere rappresentato da un sistema di sensori che cercano di trovare continuamente la miglior inclinazione per i diversi assi del sistema. Il controllo mediante tabelle software potrebbe essere anch'esso una soluzione, economica e meno costosa della precedente, ma non presenta un feedback, per cui col tempo si rivela essere una soluzione non ottimale. Ognuna di queste tecnologie ha aspetti positivi e negativi. A seconda del contesto è possibile operare la scelta migliore al fine di garantire i minori costi in fatto di manutenzione a parità di rendimento.

2.3 Il concentratore

Il concentratore è un dispositivo che permette di convogliare più radiazione solare possibile sul target. La ragione del suo impiego è quella di avvalersi di un dispositivo a basso prezzo, riciclabile, in grado di concentrare la radiazione solare sulla cella fotovoltaica.

Il fatto di utilizzare dei semiconduttori molto costosi pone la necessità di utilizzare meno semiconduttore possibile.

L'impiego di un concentratore, che di fatto è una lente, consente di concentrare la radiazione solare che colpisce l'ottica su di una superficie molto minore di quella della lente stessa e conseguentemente di risparmiare sensibilmente sui costi di realizzazione.

Lo svantaggio di utilizzare un'ottica porta nel sistema fotovoltaico i problemi propri di un sistema ottico.

Un primo problema che si può prendere in considerazione riguarda l'intensità della radiazione sulla superficie della cella fotovoltaica.

A tal proposito si deve cercare di rendere l'intensità della radiazione che colpisce il target quanto più uniforme possibile per evitare di abbassare il rendimento del sistema o il danneggiamento per eccessiva concentrazione locale.

Un secondo fattore degno di nota è la necessità di costruire un'ottica che abbia un angolo di accettazione sufficientemente ampio.

Per le considerazioni appena fatte si può inoltre realizzare che non è necessario, se non addirittura svantaggioso, proiettare sul piano immagine l'immagine del sole, onde evitare eccessive concentrazioni non uniformi.

Tale modo di operare caratterizza la non imaging optics, e le lenti di Fresnel si prestano in modo ottimale al fine di raggiungere gli scopi prefissati.

2.3.1 Non imaging optics

La non imaging optics è una disciplina nata negli anni '60 che prevalentemente si occupa di trovare il modo migliore per convogliare la radiazione solare su di un target.

I concentratori realizzati basandosi sulla teoria dell'ottica senza immagine sono in grado di raggiungere livelli di concentrazione molto maggiori delle ottiche che proiettano sul piano immagine l'immagine della sorgente.

Si può immaginare un concentratore senza immagine come un imbuto in cui entra una data quantità di energia che, al di là delle perdite dovute alla non idealità dell'oggetto, proietta sul piano immagine la stessa energia su una superficie minore e quindi ad una concentrazione molto maggiore.

Quando ci si riferisce alla concentrazione di soli che un concentratore offre, si allude esattamente al multiplo dell'irradianza che si avrebbe senza concentrazione.

2.3.2 Categorie di concentratori

Su un piano teorico esistono molte categorie di sistemi ottici in grado di convogliare i raggi incidenti su di un fuoco.

Alcuni esempi sono:

- Guida di luce;
- Lente di Fresnel;
- Specchio parabolico;
- Ottica Cassegrain.

Capitolo 3

Analisi del concentratore di Fresnel

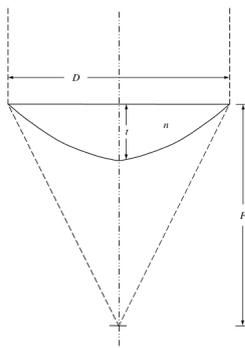
In questa sezione è descritta la lente di Fresnel e il suo funzionamento. Vengono introdotte alcune aberrazioni che hanno un peso rilevante nel funzionamento del sistema. Per concludere è presentata una possibile configurazione evoluta di una lente di Fresnel.

3.1 Introduzione

Il concentratore di Fresnel sotto un piano funzionale si presenta come una lente piano convessa, con la faccia piana rivolta verso il sole.

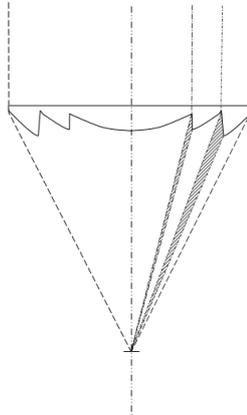
Una caratteristica rilevante è quella di poter limitare gli spessori della lente

Figura 3.1: Lente piano convessa di classica concezione



anche per $\frac{f}{\#}$ bassi a differenza di una classica lente piano convessa. Non appena si intende aumentare l'apertura della lente, quindi abbassare l' $\frac{f}{\#}$, si è costretti ad impiegare una lente piano convessa secondo l'idea di Fresnel.

Figura 3.2: Lente piano convessa secondo Fresnel



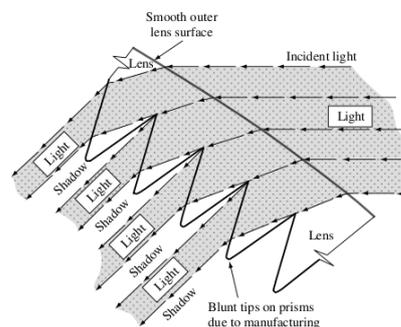
Dalla figura si vede che tale dispositivo è dotato di una superficie convessa senza avere lo spessore di quest'ultima a parità di lunghezza di focale. Lo spessore è un'ulteriore caratteristica che distingue una lente di Fresnel piano convessa da una classica lente piano convessa.

Dalla precedente caratteristica è possibile dedurre che in una lente piano convessa di Fresnel la differenza di cammino ottico non è più un problema importante in una lente con grande apertura.

È infatti ragionevole assumere che la lente di Fresnel sia una lente piano convessa in cui il lato convesso viene schiacciato.

Con il termine “schiacciare” non si deve però intendere la superficie e quindi il raggio di curvatura, bensì uno svuotamento del corpo interno della lente condotto in modo tale che i tratti della superficie convessa mantengano la curvatura della superficie iniziale.

Figura 3.3: Lente di Fresnel basata sulla rifrazione interna totale



Dalla figura si vede quindi che la superficie convessa della lente è cos-

tituita da una fitta serie di prismi che su un lato riproducono la superficie convessa. La lente opera per mezzo della rifrazione interna totale del raggio entrante dalla faccia piana.

Applicando la legge di Snell per ogni punto della superficie concava si verifica che un raggio entrante perpendicolarmente viene orientato verso il pattern. È quindi sufficiente far incontrare un raggio con la superficie di uscita della lente ad un angolo tale che, per la legge di Snell, il raggio venga redirezionato verso la cella fotovoltaica.

Queste ottiche presentano il difetto di assorbire una quantità di radiazione pari circa all'8% della radiazione incidente, problema che viene risolto impiegando un coating antiriflesso.

Grazie alle moderne tecniche di fabbricazione e all'attenta scelta dei materiali si è riusciti ad ottenere prodotti in grado di trasmettere oltre il 90% della radiazione entrante.

3.1.1 Lenti di Fresnel come concentratori solari

Il goal della tecnologia dei concentratori è quello di aumentare la concentrazione di radiazione solare su un punto desiderato e al contempo di mantenere un angolo di accettazione ampio.

I concentratori di questo tipo tendono a causare la formazione di un hot-spot sul piano immagine.

Gli hot-spot danneggiano la cella solare e ne abbassano il rendimento, dunque vanno evitati.

Allo scopo di ridurre i danni causati dagli hot-spot e di aumentare l'angolo di accettazione può essere necessaria l'integrazione di un'ottica secondaria per rendere più omogenea la distribuzione dell'energia.

L'introduzione di una seconda ottica può comportare un aumento dei costi e dello spazio necessario per contenere l'intero sistema, ma porterebbe indubbiamente a diversi vantaggi ossia:

- ridurre i danni dovuti ad un hot spot
- aumentare l'angolo di accettazione
- omogeneizzare la distribuzione
- diminuire le perdite

3.2 Effetto delle aberrazioni cromatiche introdotte da una lente di Fresnel sul rendimento di una MJ GaInP/GaAs/Ge

Per osservare le aberrazioni cromatiche è sufficiente spostare la lente di Fresnel lungo l'asse del sistema ottico e osservare la radiazione che raggiunge

il piano immagine.

Un parametro da utilizzare in questa analisi è il FF *fieldfactor* altrimenti detto “fattore di campo”, ossia il rapporto tra la massima potenza istantanea ed il prodotto tra tensione di circuito aperto e corrente di corto circuito.

Dalla teoria è risaputo che quando un raggio passa da un mezzo ad un altro avviene il fenomeno della rifrazione, per meglio dire, quando la radiazione solare passa da un mezzo con un determinato indice ad un’altro si può osservare una netta variazione nel cammino ottico.

La variazione del cammino ottico è dovuta al fenomeno fisico riassunto nella legge di Snell. Associata alla variazione di direzione c’è anche una variazione di velocità della radiazione solare in funzione dell’indice.

È inoltre da ricordare che gli effetti appena sottolineati variano in funzione dell’indice di rifrazione del mezzo che a sua volta dipende dalla lunghezza d’onda.

Se si combinano tutti gli effetti presi in considerazione, ricordando che lo spettro solare ha componenti che vanno dai 400 e vanno oltre i 1000 nm, si osserva che in associazione all’aumentare dello spessore della lente sarà maggiore la differenza di percorso tra le varie componenti che entrano nel sistema.

Il fenomeni presi in esame causano delle aberrazioni, in questo contesto è rilevante il peso di quella cromatiche.

Le aberrazioni cromatiche possono essere sia assiali che laterali.

3.2.1 Aberrazione cromatica laterale

Nell’aberrazione cromatica laterale la dipendenza dalla lunghezza d’onda comporta una variazione di ingrandimento a seconda del periodo spaziale nell’ipotesi di medesima focale.

Questo comporta che sul piano immagine si formino zone in cui tendono a spostarsi i diversi colori.

3.2.2 Aberrazione cromatica assiale

L’aberrazione cromatica assiale ha luogo quando ogni colore della luce viene focalizzato su un diverso punto della focale.

Un’equazione per descrivere l’effetto dell’aberrazione cromatica assiale è $\frac{df}{f} = -\frac{dn(\lambda)}{n(\lambda)-1}$.

Questa equazione deriva dalla legge di Snell espressa in forma differenziale in cui f è la focale della lente, n è l’indice di rifrazione e λ è la lunghezza d’onda.

L’effetto può essere immaginato come il fatto che i diversi colori che compongono la radiazione solare, ossia le varie lunghezze d’onda, vengono focalizzati su differenti distanze focali.

I risultati a cui si deve arrivare sono:

- elevato rapporto di concentrazione;
- uniformità di intensità sul piano immagine.

Una tecnica per valutare il grado di uniformità sta nel definire il seguente parametro:

$$U = \frac{a}{\sum_C (I_{n,m} - I_{ave})^2}$$

dove C è una costante (10^{18}), n ed m sono le coordinate della mesh.

Il piano immagine sottoposto all'analisi viene suddiviso in $n \cdot m$ zone in cui viene indagata l'intensità in funzione di un valor medio di essa e di una costante C scelta in modo opportuno.

Definiamo l'angolo di accettazione θ come l'angolo in cui al ricevitore è pervenuta non meno del 90% dell'intensità della radiazione incidente.

3.4 Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system

In questo documento scientifico viene proposta una nuova configurazione per concentratori solari che utilizzano lenti di Fresnel modulari per ottenere intensità uniforme sul piano immagine.

3.4.1 Introduzione

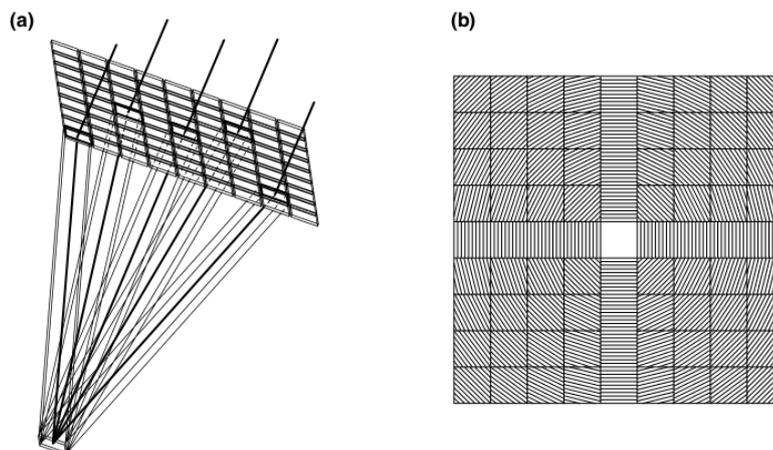
Della documentazione in questione viene preso in considerazione solamente la parte in cui si descrive un metodo interessante per descrivere le grandezze del sistema di concentrazione in modo proprio e qualche accenno su come in prima battuta possa essere visto il flusso uscente dal dispositivo di concentrazione.

3.4.2 Una lente modulare di Fresnel

La premessa sull'impiego di questa lente è che va impiegata in sistemi ottici ampi, che pesino poco e in cui l'obbiettivo non contempri la proiezione di un' immagine sul target.

Con una classica lente di Fresnel uno dei maggiori problemi è garantire a grandi aperture una sufficiente omogeneizzazione dell'intensità sul piano immagine. Le soluzioni ci sono ma sono costose poichè sono molto legate al sistema ottico per cui vengono disegnate, quindi comportano eccessivi costi fissi. Per le considerazioni appena fatte nasce l'idea di una lente di Fresnel come quella in figura.

Figura 3.5: Lente di Fresnel Modulare



Come si vede nell'immagine, l'idea fondamentale per le lenti 3-D di Fresnel si basa sul concetto di sovrapposizione.

Si tratta di array di lenti di Fresnel che incurvano la normale direzione dei flussi di radiazione incidente verso la superficie della cella solare.

Ogni modulo ha circa le medesime dimensioni della cella solare.

È importante che ogni singolo modulo venga posto nella direzione corretta in funzione del ricevitore, da cui deriva l'idea di sovrapposizione dei flussi, secondo la quale ogni modulo concentra il proprio fascio sopra la cella solare.

Nella figura sopra è proposto un modulo 9x9 (la lente centrale non serve poichè non vi è necessità di curvare il fascio).

Queste lenti di Fresnel si realizzano in moduli di $2n+1$ array sui due assi, in modo simmetrico rispetto all'origine.

I parametri dimensionali per la progettazione di un modulo di concentrazione sono illustrati in figura.

Ogni modulo ha un lato lungo w , quindi le dimensioni globali risultano essere $w(2n+1) \times w(2n+1)$.

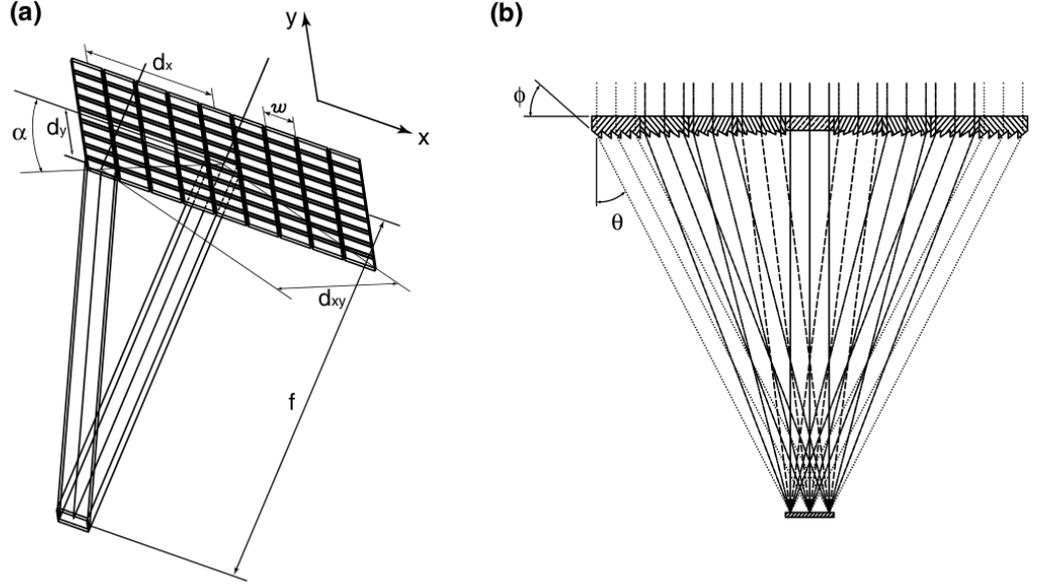
Supponiamo inoltre di indicizzare ogni lente del modulo del sistema con un indice (i,j) dove i e j rappresentano rispettivamente l' i -esimo e il j -esimo elemento.

Inoltre sia d_x, d_y la distanza di un elemento dal centro espresso come multiplo di w , ossia w_i, w_j .

Per ultimo, α è da intendersi come l'angolo tra la normale della superficie delle lenti e la direzione di ogni flusso uscente tale da colpire in pieno il piano immagine.

Ciò che è stato appena descritto dal sistema è che un raggio incidente viene

Figura 3.6: Layout del sistema descritto



rifratto con un angolo θ .
L'angolo associato ad ogni i,j lente è:

$$\theta(i, j) = \arctan\left(\frac{d_{(x,y)}(i, j)}{f}\right) = \arctan\frac{w}{f}\sqrt{i^2 + j^2} \quad (3.1)$$

in cui $d_{(x,y)}$ è la distanza tra la l'elemento i,j in questione e il centro della struttura, ed f è la focale del concentratore.

Ultimo aspetto costitutivo è l'angolo della singola faccetta,

$$\phi(i, j) = \arcsin\sqrt{\frac{\sin^2\theta(i, j)}{n_{fl}^2 - 2n_{fl}\cos\theta(i, j) + 1}} \quad (3.2)$$

dove n_{fl} è l'indice della lente.

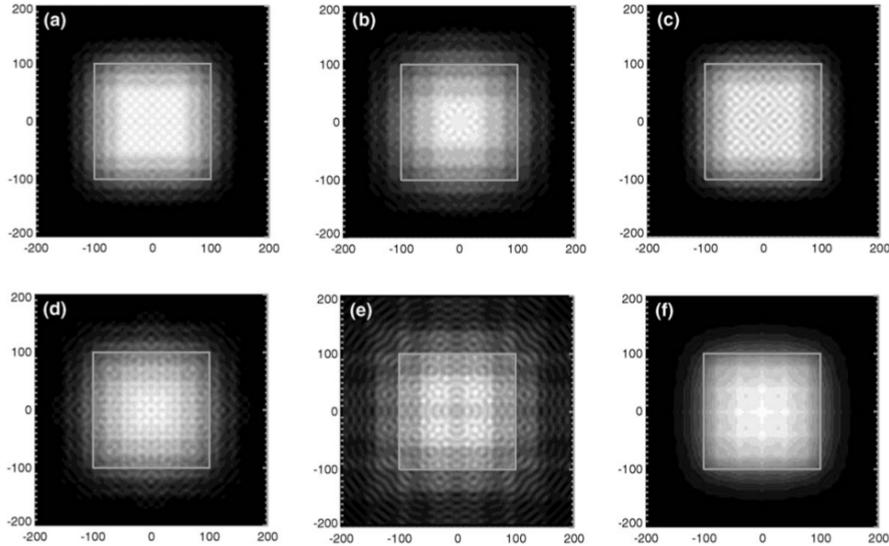
Per quanto concerne il materiale, l'impiego del PMMA può essere una possibile via: poco costoso e resistente per molto tempo al sole per non parlare della sua trasmittanza alle varie lunghezze d'onda.

Ogni singola lente di Fresnel ha la sua efficienza, la quale varia l'una dall'altra in funzione dell'angolo di rifrazione che incide sulla trasmittanza.

Se si denota con $F_{\lambda(i,j)}(X, Y)$ il flusso monocromatico che si distribuisce sopra il piano assorbente causato dal blocco (i,j) , e con w_{λ} un fattore di peso per ogni lunghezza d'onda, la totale distribuzione del flusso è esprimibile come

$$F(x, y) = \sum_{\lambda} w_{\lambda} F_{\lambda}(x, y) = \sum_{\lambda} w_{\lambda} \sum_i \sum_j F_{\lambda(i,j)}(x, y) \quad (3.3)$$

Figura 3.7: distribuzione del flusso monocromatico al variare del numero di facce



In figura è proposta la distribuzione del flusso monocromatico di un concentratore 5x5 con f-numero =1 e raggio entrante perpendicolarmente. Si rilevano variazioni sinusoidali dell' intensità del flusso monocromatico sopra le zone in cui varia l'angolo delle faccette.

La distribuzione del flusso monocromatico sul piano immagine evidenzia perdite sulla cella.

La somma e la distribuzione sono funzione della lunghezza d'onda.

Capitolo 4

Svolgimento al calcolatore

In questa fase viene presentata una riproduzione di una lente classica di Fresnel al calcolatore.

Vengono osservate le caratteristiche fondamentali grazie ad alcuni strumenti che il software Zemax mette a disposizione. Effettuando confronti qualitativi si compie un percorso che permette di apprendere i comandi principali di Zemax e si arriva ad aver un'idea critica sulle caratteristiche comportamentali di un concentratore solare che utilizza una lente di Fresnel come ottica primaria.

4.1 Cosa è Zemax

Zemax è un software che permette di modellizzare, analizzare, e assistere nella progettazione di sistemi ottici.

L'interfaccia utente è stata progettata in modo da garantire un utilizzo immediato e di alto livello.

Durante l'utilizzo di questo software, grazie al quale è stato possibile approfondire le conoscenze sulla lente di Fresnel, è stato possibile comprendere come funziona il software.

4.2 Tool utilizzati in Zemax

Dopo una necessaria fase di studio e apprendimento di Zemax, è stato possibile decidere quali strumenti utilizzare tra gli innumerevoli messi a disposizione dal software.

Analizzare qualitativamente le caratteristiche del Concentratore Fotovoltaico è necessario per apprezzare quali siano gli obiettivi da porsi al fine di progettare un dispositivo che potrebbe realmente funzionare.

Al fine di studiare un dispositivo che dovrebbe poter funzionare anche in conduzioni reali, può essere utile introdurre una tolleranza massima entro la quale porsi l'obbiettivo di verificare il corretto comportamento del sistema.

Gli strumenti utilizzati sono:

- Spot Diagram;
- Full Field Spot Diagram;
- Geometric Encircled Energy;
- LDE, LAYOUT;
- Field Curve distorsion;
- Ray Fan;
- Optical path difference;
- Chromatic focal shift.

4.2.1 LDE, Layout

Questi strumenti sono indispensabili in ogni progetto.

Nel LDE, che è una tabella, vengono poste nei campi le informazioni che rappresentano la forma degli oggetti del sistema ottico.

Sostanzialmente ciò che viene inserito sono gli spessori, i materiali, i raggi di curvatura.

Il Layout è invece il disegno rappresentativo del sistema ottico, è utile al fine di verificare se le informazioni inserite nell'LDE sono corrette.

Il Layout si è dimostrato molto utile, in quanto inserire i dati nel LDE non è molto intuitivo.

4.2.2 Spot Diagram

Lo Spot Diagram è la proiezione del fascio di raggi entranti sul piano immagine, che in questo caso è il punto ideale per porre la multi-giunzione di semiconduttori.

L'utilizzo di questo strumento permette di avere un'idea qualitativa dello spot sul piano immagine per un preciso fascio entrante.

Mediante la lettura dello spot diagram è possibile verificare le dimensioni minime della multi giunzione.

4.2.3 Full Field Spot Diagram

è uno strumento di analisi che produce lo Spot Diagram di più raggi incidenti. Lo scopo è quello di permettere un confronto qualitativo sull'interazione dell'ottica con raggi che incidono a diversi angoli e a diverse lunghezze d'onda.

è utile per una stima in prima battuta delle dimensioni della cella fotovoltaica perchè simula lo spot dei raggi considerati tutti insieme sul piano immagine.

4.2.4 Geometric Encircled Energy

è uno strumento che permette di rappresentare la percentuale di energia in funzione della distanza dal raggio principale sulla superficie considerata. L'utilizzo di questo strumento è complementare al field spot diagram e al full field spot diagram.

Consente di conoscere con precisione il raggio del cerchio in cui è inscritta la superficie che raccoglie, come precedentemente definito il 90% dell'intensità entrante.

4.2.5 Optical path difference

Tramite l'optical path difference è possibile osservare, in funzione dell'allontanamento del raggio principale sul piano immagine, lo sfasamento del fronte sul piano immagine per via della differenza di cammino ottico associato all'attraversamento di questo con diversi angoli di ingresso e diverse lunghezze d'onda.

è utile per effettuare un confronto tra sistemi di concentrazione di caratteristiche simili ma sostanzialmente diversi (p.e. stessa focale, f numero e apertura ma anzichè essere costituiti da lenti utilizzano gli specchi).

Infatti a differenza di un sistema a specchi, che comporta difficoltà nella realizzazione di specchi asferici, il problema delle lenti non è la forma ma la differenza di cammino ottico all'interno della lente.

Ai diversi cammini ottici si possono associare le comuni aberrazioni cromatiche. Comparare omonimi sistemi realizzati in modo diverso può essere di aiuto poiché permette un confronto altrimenti difficile da fare, essendo essi costituiti da elementi ottici completamente diversi.

4.3 Fase operativa

Non vengono imposte specifiche particolari visto il contesto, quindi questa lente potrebbe essere utilizzata sia come unico elemento di concentrazione del sistema fotovoltaico, sia modularmente.

È sufficiente tiltare i piani di ogni singolo modulo al fine di ottenere una lente equivalente ma con lunghezza focale sicuramente minore.

È da tenere presente che in un sistema fotovoltaico l'obiettivo di queste ottiche a basso costo è rendere quanto più possibile uniformemente distribuito sul piano immagine l'intensità uscente.

Nella documentazione consultata si può rilevare che viene a più riprese proposto l'utilizzo del PMMA (Polimetilmetacrilato) come materiale ideale per

realizzare questo tipo di ottiche. Ciò che viene proposto di seguito, oltre all'utilizzo di queste informazioni, è un confronto di prestazioni tra la lente composta da un vetro comune(BK7) e quella in PMMA, per verificare qualitativamente se quest'ultima effettivamente funzioni meglio.

In questa sede non vengono approfondite le questioni che caratterizzano i materiali, posto il fatto che il PMMA tra le sue caratteristiche risulta essere duttile e malleabile al punto di renderlo preferibile anche sotto un aspetto costruttivo, né quelle che riguardano un coating anti riflesso. Si dà per scontato che un l'integrazione nel sistema di un coating è importante al fine di ottenere una quantità maggiore di radiazione sul pattern.

Il contesto in cui viene effettuata l'analisi con Zemax è il seguente:

- inizialmente analisi su singola lunghezza d'onda, successivamente viene gradualmente allargato il range di lunghezze d'onda considerato al fine di raccogliere buona parte dello spettro solare(0,4-1 μm).
- modello ottica geometrica con angolo di accettazione di 2°
- apodization: uniform
- controllo dell' f-numero (tale valore indica quanto veloce è un ottica a raccogliere la radiazione, deve essere il più basso possibile)
- glass: BK7 e PMMA, successivamente SILICE

L'LDE del sistema è il seguente:

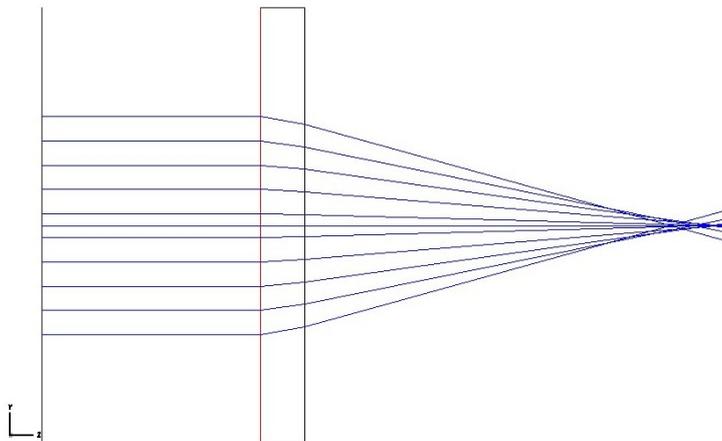
Figura 4.1: LDE per considerazioni preliminari

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1	Standard		Infinity	50.000000		50.000000 U	0.000000
STO*	Fresnel		50.000000 V	5.000000 E	PMMA	50.000000 U	0.000000
3*	Standard		Infinity	99.556801 H		50.000000 U	0.000000
IMA	Standard		Infinity	-		8.701765	0.000000

Apertura	100 mm
Focale	100 mm
Materiale primaria	BK7, PMMA
Cono di accettazione	2°
f-numero	1

Il Layout prodotto di conseguenza si vede in figura 4.2. E' possibile notare sul piano immagine delle aberrazioni dovute alla differenza di cammino ottico.

Figura 4.2: Layout per considerazioni preliminari



Gli strumenti che di seguito verranno utilizzati per comprendere al meglio le caratteristiche del sistema ottico visto sopra sono

- Spot Diagram;
- Geometric Encircled Energy;
- Full Field Spot Diagram;
- Optical path difference;
- Diverse combinazioni di fasci per sottoporre il sistema nelle situazioni di maggior interesse.

4.3.1 Dati rilevati con BK7

Si considera inizialmente il field spot diagram di un fascio di raggi perpendicolare alla lente di BK7. È da rilevare il fatto che sarebbero sufficienti solo 7 mm quadrati di cella fotovoltaica, o meglio $\pi 3.5mm^2$, per raccogliere la totalità dell'energia che entra nel concentratore e viene proiettata sul piano immagine (fig. 4.3).

Se viene considerata la superficie entro la quale si concentra il 90% dell'intensità incidente, può essere utile considerare l'encircled energy, che permette di leggere partendo dal raggio centrale la superficie minima del semiconduttore necessaria a raccogliere l'energia.

Dal grafico in figura 4.4 sostanzialmente si nota una redistribuzione dell'energia entrante e cosa più importante, per un raggio che entra perpendicolarmente nel sistema, si può ridurre la superficie del semiconduttore fino

Figura 4.3: FSD per un fascio perpendicolare

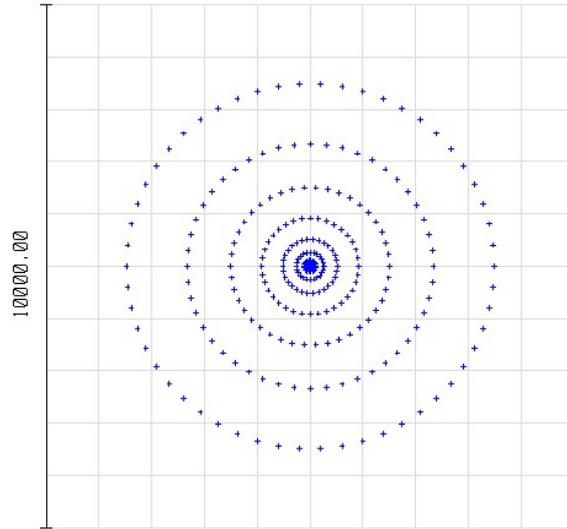
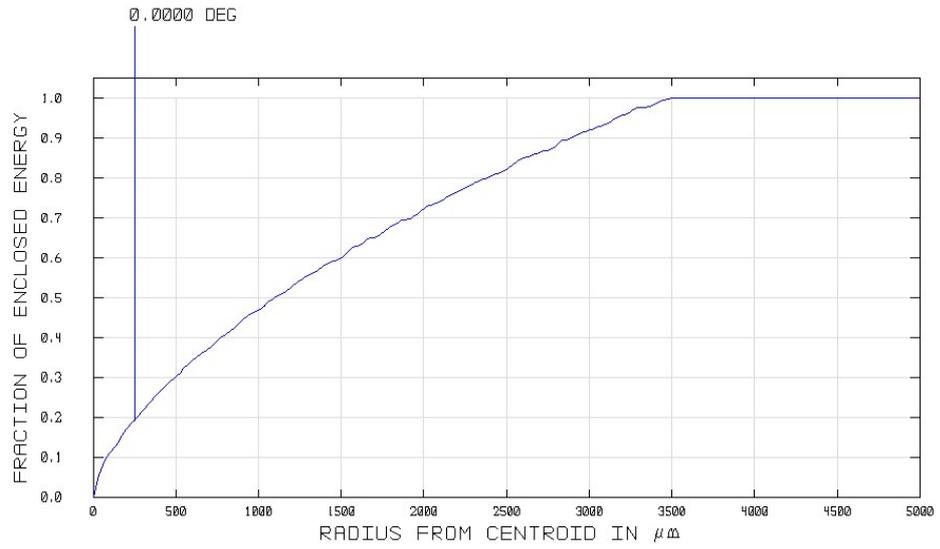


Figura 4.4: GEE sul piano immagine



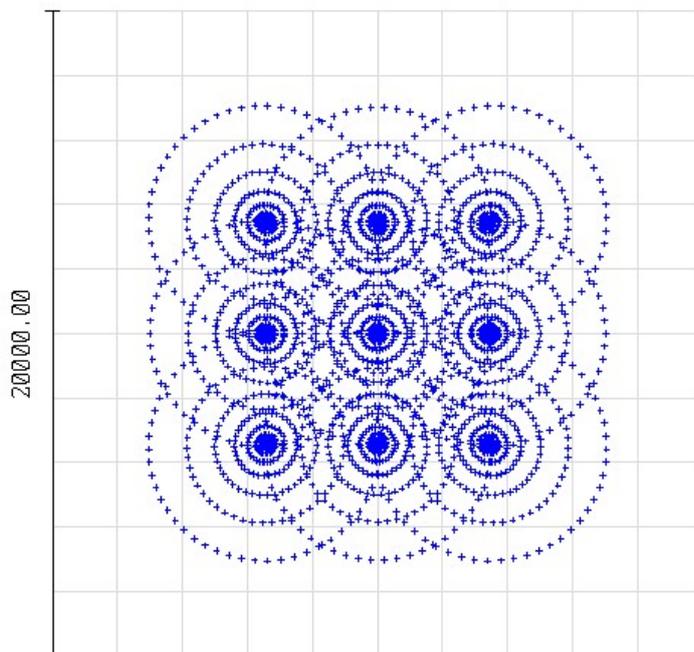
a 5.8 mm quadrati per raccogliere il 90% dell'energia.

Il passo successivo è quello di verificare che il sistema garantisca le tolleranze richieste. Un cono di accettazione di due gradi è una tolleranza realistica perchè la lente sarà a sua volta montata su un sistema che traccia lo spostamento del sole e dalla documentazione letta non appare come un problema quello di ottenere un puntamento esatto con una tolleranza di 2 °.

Per verificare il tutto è sufficiente impostare sul menù waves, dei raggi entranti con 2 gradi di inclinazione.

Il Full Field Spot Diagram ottenuto è il seguente(fig. 4.5):

Figura 4.5: FFSD p. immagine con campo di vista 2 ° tangenziali e sagittali

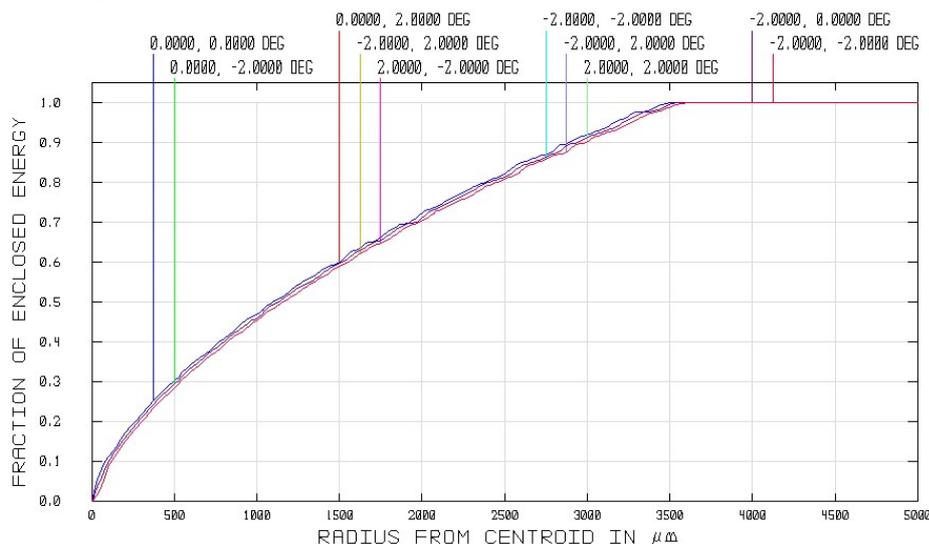


Un target 13,3 mm quadrati è sufficiente per rispettare la specifica di garantire il cono di accettazione di 2 °(nel prossimo paragrafo viene spiegato come si è calcolata la dimensione minima del target) . È possibile osservare le differenze trascurabili di proiezione entro l'angolo di ingresso per un fascio entrante. Ne seguono inoltre alcuni spot caldi su zone totalmente tra loro scorrelate sul target(fig. 4.5).

In questo contesto semplificato sono fenomeni trascurabili viste le grandezze in gioco. In una fase successiva si vedrà invece come diventino fenomeni degli di nota.

Sul piano immagine è possibile rilevare (attraverso il GEE di fig. 4.6) solamente variazioni trascurabili dovute alle differenze di cammino ottico per ogni singolo fascio entrante al variare dell'angolo di ingresso entro il cono di accettazione.

Figura 4.6: GEE con campo di vista tangenziale e sagittale di 2°



Continuando a prendere in considerazione il 90% dell'energia entrante, garantendo il cono di accettazione, la superficie necessaria diventa 13,3mm quadrati.

Nella fig. 4.7 infatti è possibile osservare l'OPD con glass BK7 per un raggio perpendicolare alla pupilla di ingresso, nella 4.8, è posto sul centro della pupilla di ingresso un raggio con inclinazione assiale e sagittale di 2° .

Si può osservare che la risposta è praticamente costante tra caso ottimale e caso peggiore di incidenza sulla pupilla di ingresso ossia l'opd varia di poco all'interno delle tolleranze considerate.

Queste rilevazioni al momento possono sembrare finalizzate a se stesse. Si renderanno utili nel momento in cui si intende mettere a confronto le prestazioni della medesima ottica realizzata con due materiali differenti al fine di apprezzare quali tra le ottiche considerate soffrono meno di aberrazioni geometriche per fasci entranti fuori asse.

Figura 4.7: OPD sistema mono-lente in BK7 per fascio perpendicolare

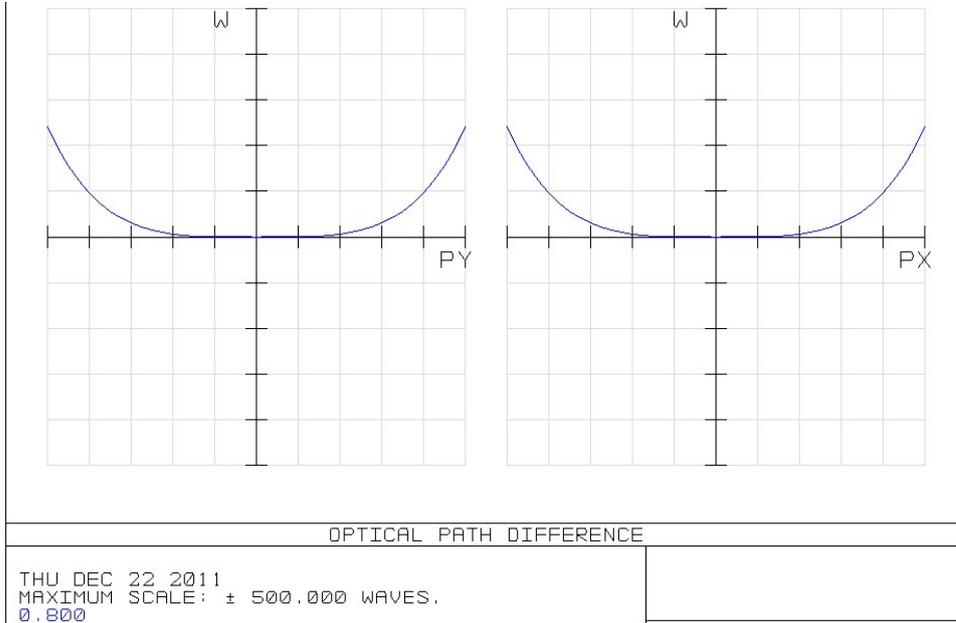
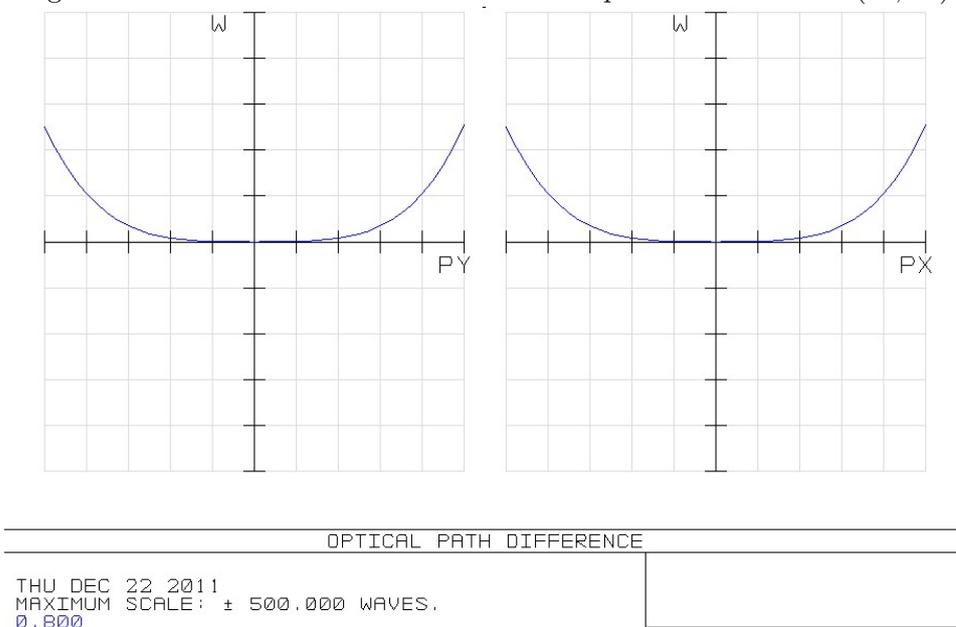


Figura 4.8: OPD sistema mono-lente in BK7 per fascio fuori asse(2° , 2°)



4.3.2 Dati rilevati con glass PMMA

A differenza del passaggio precedente viene solamente impostato come materiale della lente il PMMA. Sotto ogni aspetto si possono apprezzare miglioramenti. Le condizioni di lavoro sono quelle dell'esempio precedente: i raggi entrano perfettamente perpendicolari alla pupilla di ingresso, il sistema è il medesimo, cambia solamente il materiale che costituisce dell'ottica. Vengono di seguito proposti i rilevamenti:

Figura 4.9: Impostazione di un fascio perpendicolare all'ingresso del sistema

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	2	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-2	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-2	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	2	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-2	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-2	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	2	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-2	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Con un fascio entrante perpendicolarmente il raggio necessario al fine di raccogliere il 90% dell'energia è pari a $2750 \mu m$, quindi la cella fotovoltaica ipoteticamente può essere grande 5.5 mm quadrati(fig. 4.10) contro i 5.6 mm quadrati del BK7.

Anche sotto l'aspetto dell'optical path differenze(fig. 4.12) riscontriamo miglioramenti apprezzabili sul piano immagine del sistema rispetto al OPD nelle medesime condizioni con lente BK7.

Di seguito sono proposte alcune osservazioni sul comportamento del sistema in presenza di un fascio entrante con inclinazione pari alla massima tolleranza(fig. 4.14). Sottolineare questa situazione è utile per apprezzare se il sistema potrebbe funzionare in situazioni più stringenti.

Viene posto sul field data un fascio entrante sul bordo del cono di accettazione(fig. 4.13).

Figura 4.10: Spot Diagram sul piano immagine

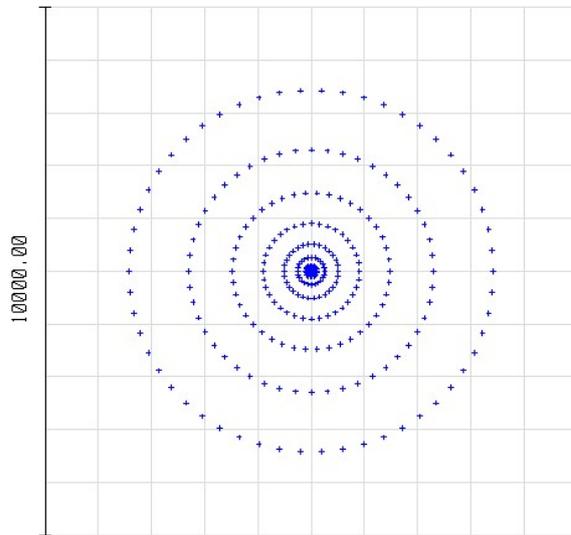


Figura 4.11: GEE sul piano immagine

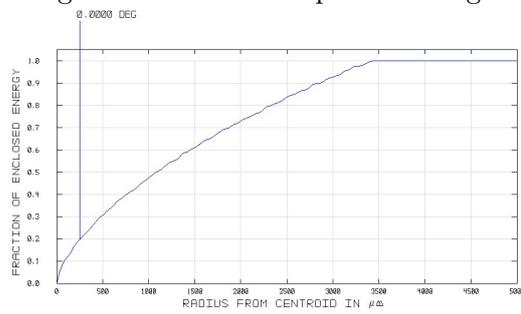


Figura 4.12: OPD pmma

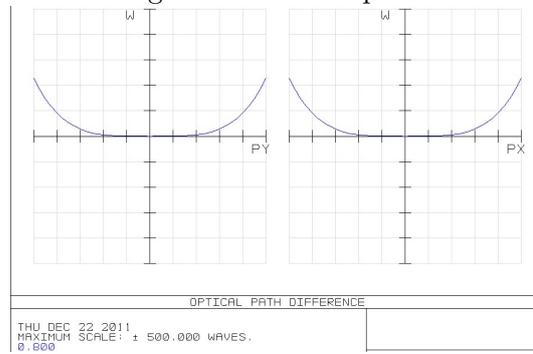
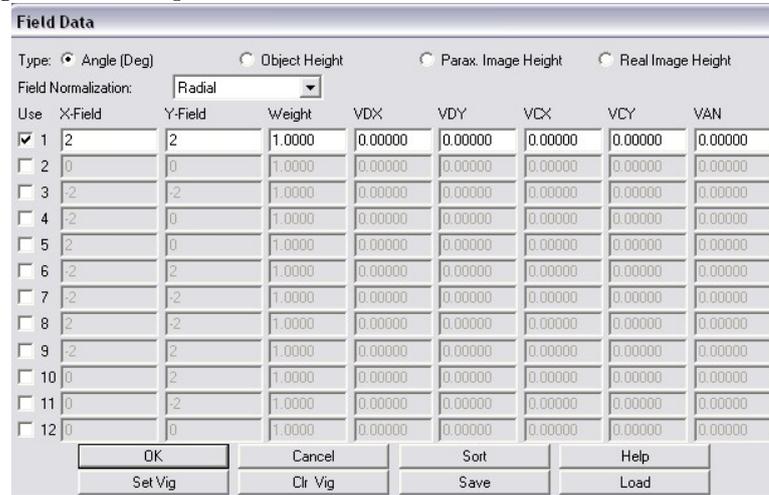
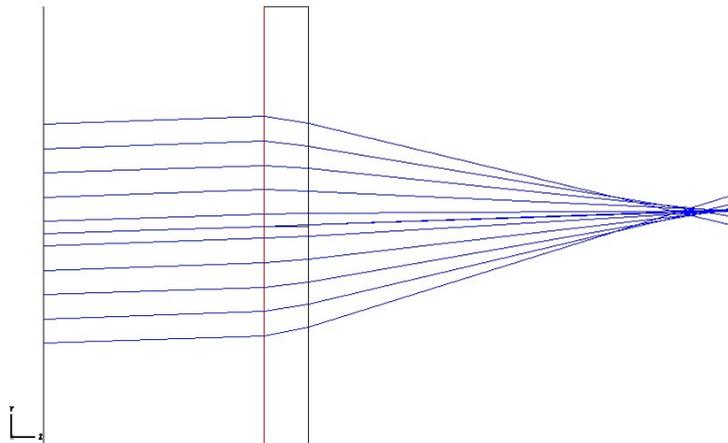


Figura 4.13: Impostazione fascio sul bordo del cono di accettazione



Il layout del sistema nell'ipotesi che il sistema sia fuori asse di due gradi è il seguente.

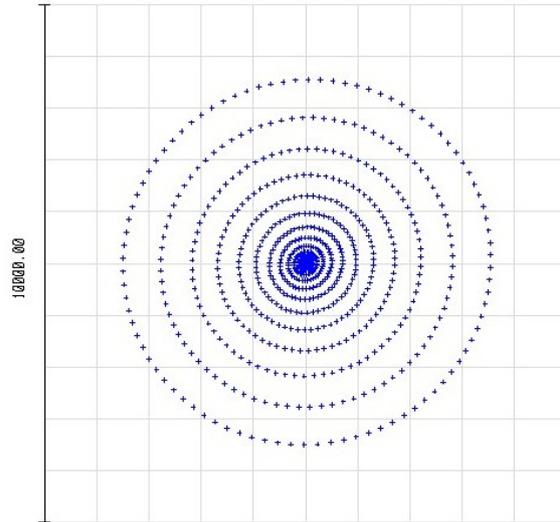
Figura 4.14: Layout del sistema per fascio fuori assi di 2°



Lo spot sul piano immagine è il seguente (fig. 4.15).

Lo spot è regolare, fattore incoraggiante, associabile sicuramente all'assenza delle aberrazioni geometriche (assenza aiutata dal fatto che lo Spot Diagram è preso per un fascio monocromatico), tuttavia vi è, come già in precedenza segnalato, un punto caldo centrale, qualitativamente non è un buon risultato sotto l'aspetto dell'uniformità desiderata. Con l'immagine in questione è possibile solamente verificare la dimensione dello spot sul piano immagine, ossia 7mm, ma non avendo un riferimento assoluto con un raggio

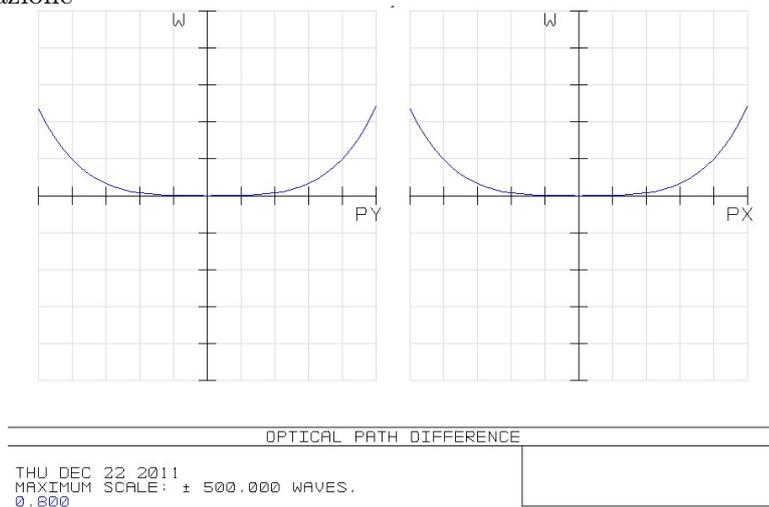
Figura 4.15: Spot Diagram per un fascio entrante fuori asse di 2°



che entri perpendicolarmente alla pupilla di ingresso non è possibile stimare con precisione quanto grande dovrà essere il pattern.

Una risposta positiva è possibile apprezzarla anche sotto il piano dell'Optical Path Difference nel caso peggiore(fig. 4.16).

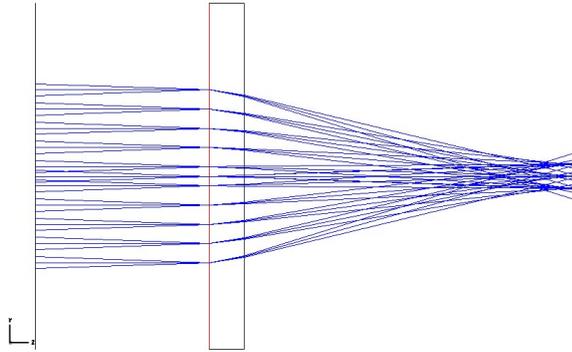
Figura 4.16: OPD del concentratore per fascio sul bordo del cono di accettazione



Considerazioni più generali si possono fare ponendo il campo di raggi all'ingresso entranti da ogni angolazione fino a 2 gradi.

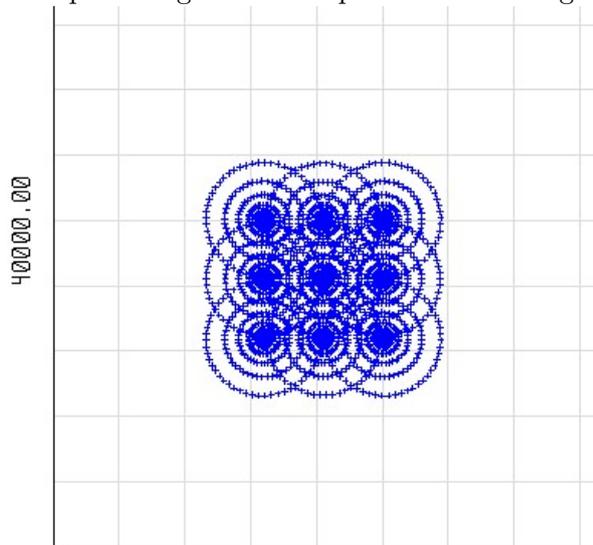
L'ipotetico layout è quello di figura 4.17.

Figura 4.17: Griglia di punti sorgenti per un campo di vista $(-2^\circ, 2^\circ)$



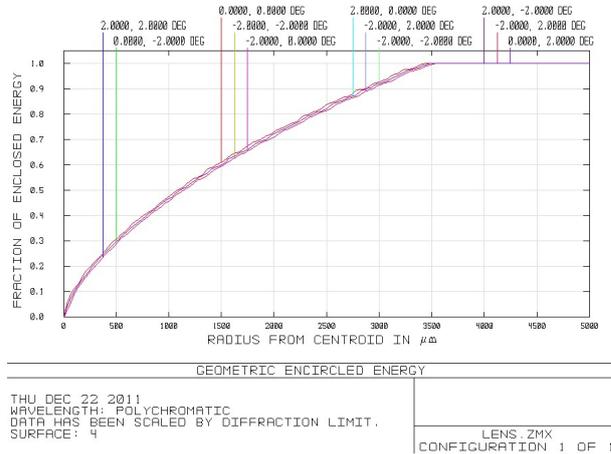
Grazie al Full Field Spot Diagram possiamo apprezzare la dimensione minima della cella fotovoltaica (fig.4.18).

Figura 4.18: FFSD p. immagine con campo di vista 2° tangenziali e sagittali



Per non fare un calcolo approssimativo è utile avvalersi anche dell'encircled energy di figura 4.19.

Figura 4.19: GEE per la griglia di punti sorgenti nel campo di vista massimo



Nell'ipotesi di raccogliere almeno il 90% dell'energia in ogni direzione, è necessario un pattern con un lato grande come la distanza tra il centro di due spot esterni opposti più il raggio di questi al fine di considerare un disco che inscrive il 90% dell'energia dei due raggi considerati.

Grazie al Full Field Spot Diagram(fig. 4.18) si può vedere che il centro di 2 spot esterni lateralmente distano 7.27 mm. Dall'encircled energy(fig. 4.19) si legge che il raggio minimo è di 2.9 mm per raccogliere il 90% dell'energia su uno spot laterale.

Le dimensioni del pattern sono di 13 mm quadrati per essere certi di poter raccogliere il 90% dell'energia sotto ogni angolo di ingresso, purchè appartenente alle tolleranze.

Figura 4.20: OPD per punti sorgenti per un campo di vista (-2° , 2°)



L'opd(fig. 4.20) permette di apprezzare come il comportamento della lente all'interno dei limiti progettuali è lineare.

Alla luce di tutti i grafici fin qui riportati si verifica che che il PMMA funziona sotto ogni aspetto meglio del BK7.

È possibile quindi concludere che sia un'ottimo accorgimento quello di utilizzare questo materiale ai nostri fini poichè, oltre a costare poco, aver stabilità nel tempo, si presta molto bene alle lavorazioni, e ha prestazioni migliori se paragonato con il BK7.

Le osservazioni fin qui riportate permettono di maturare una serie di considerazioni:

- la scelta opportuna di un materiale che costituisce l'ottica permette di ottenere migliori prestazioni, prevalentemente in associazione all'indice del materiale;
- una lente di Fresnel impiegata autonomamente comporta degli hot spot per la sua stessa natura, infatti nasce per l'imaging optics.

4.4 Lente di Fresnel in un contesto più realistico

Dalla documentazione consultata (e per quanto detto sopra) in un sistema reale l'impiego autonomo di lente di Fresnel non è sicuramente la soluzione migliore.

Al fine di trovarsi nelle condizioni di poter apprezzare la necessità di impiegare una lente secondaria e osservarne qualitativamente i miglioramenti che essa comporta viene ingrandito il sistema.

L'incremento della grandezza del sistema porta oltre che ad un incremento dell'fattore di concentrazione e del risparmio di semiconduttore in rapporto all'energia raccolta, un incremento degli effetti associati alle aberrazioni

nonchè ad aspetti propri del comportamento della lente di Fresnel, in questo ambito indesiderati.

Nella documentazione si nota in varie occasioni che uno dei problemi sottoposti al lettore sono la disuniformità della radiazione incidente al target. Come precedentemente spiegato la disuniformità di radiazione superficiale può comportare degli hot spot dannosi per la cella fotovoltaica.

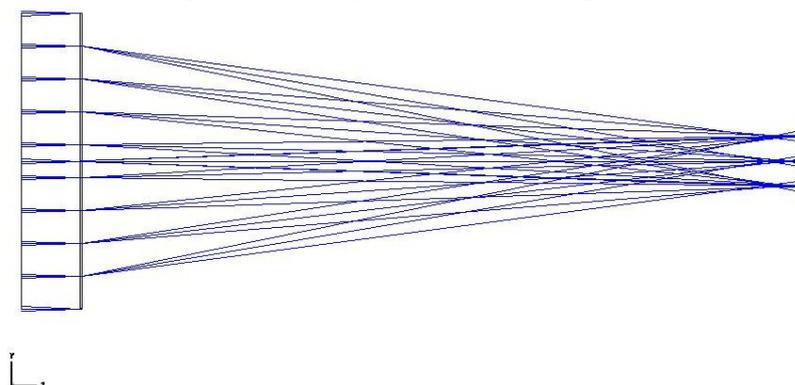
Le non uniformità possono inoltre avvenire su range spettrali limitati e in zone localizzate del target.

In generale i precedenti effetti li possiamo associare al comportamento della lente stessa assieme alle aberrazioni.

4.4.1 Sistema ingrandito monolente

Il sistema ottico utilizzato per le osservazioni è il seguente:

Figura 4.21: Layot del sistema ingrandito



Le dimensioni del sistema sono quelle del LDE riportato:

Figura 4.22:

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1	Standard	Infinity	100.000000		250.000000	0.000000
STO*	Fresnel	605.758428	2.000000	PMMA	250.000000	0.000000
3*	Standard	Infinity	1216.605999		249.653368	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		65.690806	0.000000

Apertura	500 mm
Focale	605 mm
Materiale primaria	PMMA
Cono di accettazione	2°
f-numero	1.21

I fattori che accumulano i due precedenti sistemi con l'attuale sono l'impiego di una lente di Fresnel ed il materiale impiegato per realizzare il sistema. Nei tre sistemi ottici di questo paragrafo vengono presentate delle possibili evoluzioni del caso base precedentemente analizzato. È interessante osservare che il sistema è lungo 1,2 metri circa. Una tale lunghezza sicuramente permette di evidenziare aberrazioni e irregolarità nella radiazione che colpisce il piano immagine.

In questo sistema viene inoltre testato un altro materiale: silica glass, letteralmente vetro di silice. Il fascio entrante è imposto sia perpendicolarmente alla pupilla di ingresso sia entrante con 2 gradi di inclinazione sugli assi al

fine di proseguire con l'ipotesi di garantire una tolleranza del 2%, in fine, il fascio entrante d'ora in poi sarà poli cromatico con range nel visibile. I singoli fasci proiettati sul piano immagine sono quelli di figura:

Figura 4.23: Spot Diagram del sistema mono lente con focale lunga

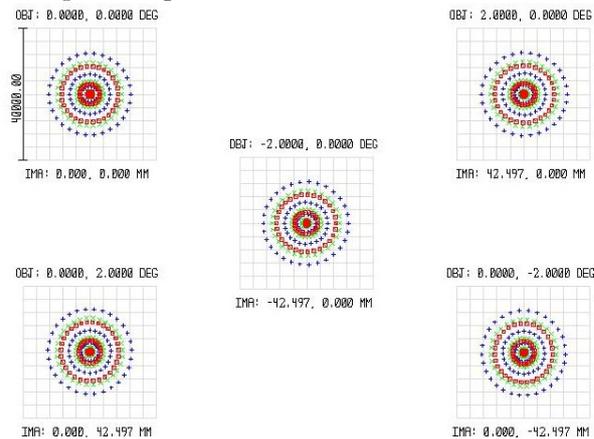
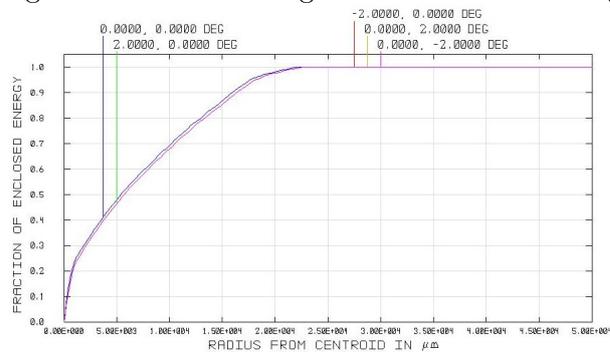
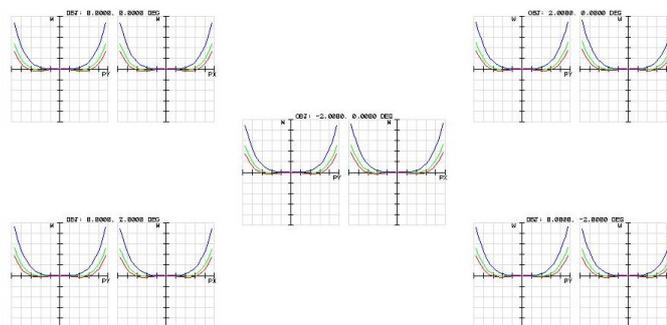


Figura 4.24: Il relativo geometric encircled energy



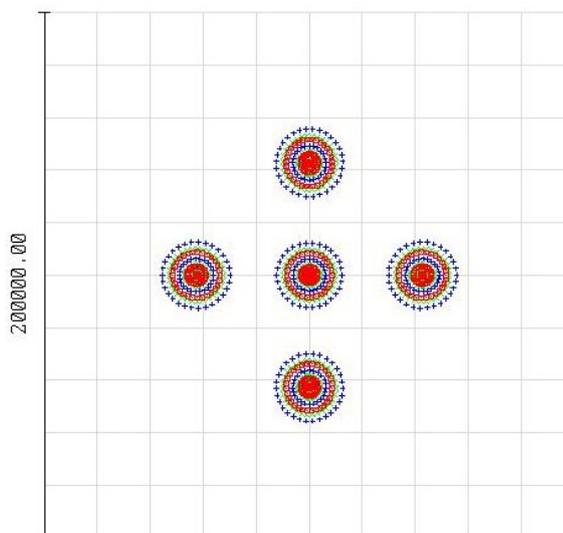
Le dimensioni dei singoli spot e la loro forma(fig. 4.23), se paragonati a quelli dei primi due esempi possono dirsi buoni(fig. 4.3, fig. 4.10) infatti sono ristretti e qualitativamente regolari. Nel Geometric Encircled Energy di fig.4.24 si osserva una forte pendenza iniziale, porterà ancora agli indesiderati punti caldi sul target. Il comportamento del dispositivo si dimostra qualitativamente soddisfacente anche a livello di opd se paragonato con un dispositivo elementare di partenza(figure 4.12 e 4.16):

Figura 4.25: OPD nel visibile per il campo di vista di $(-2^\circ, 2^\circ)$



Uno strumento che in questo caso permette di capire quanto una singola ottica di Fresnel con una distanza focale medio grande sia qualitativamente inadatto è l'utilizzo del Full Field Spot Diagram (fig.4.26).

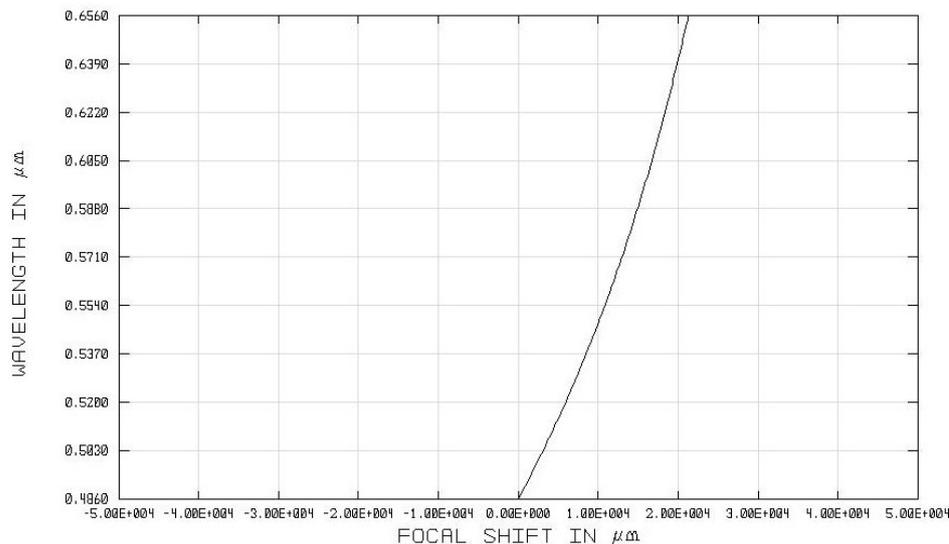
Figura 4.26: FFSD piano immagine per sistema mono lente a lunga focale



Un dispositivo di questo tipo è difficilmente utilizzabile poichè ha un comportamento poco soddisfacente già in ambito monocromatico. Con piccoli angoli di ingresso i fasci entranti vengono focalizzati in punti totalmente scorrelati, per tale fatto si arriva ad uno spreco evidente di semiconduttore per dispositivi di grandi dimensioni. A peggiorare il tutto, nei punti irraggiati vi saranno sicuramente hot-spot e nel semiconduttore restante vi sarà poca radiazione da assorbire con sbilanciamenti nelle correnti interne della multigiunzione.

Viene introdotto un ulteriore strumento, il Chromatic Focal Shift, che come dal nome si può intuire calcola lo spostamento della focale del sistema in funzione della lunghezza d'onda (fig. 4.27).

Figura 4.27: Spostamento della focale al variare della lunghezza d'onda



Il comportamento non è soddisfacente poiché la lunghezza della focale varia continuamente con la lunghezza d'onda, sebbene il range di lunghezze rimane tra i 480nm e i 660nm. Dal grafico si legge che la focale arriva a spostarsi di 21 mm, quindi le aberrazioni cromatiche hanno un effetto eccessivamente rilevante come ordine di grandezza per essere trascurabile sotto l'ottica dello spettro solare.

La lettura di questo grafico permette di apprezzare come questa ottica sebbene abbia buone prestazioni sotto un aspetto di un generico fascio monocromatico nell'insieme dello spettro solare non risulta sicuramente una soluzione ottimale.

Vale la pena in ultima analisi rilevare che le osservazioni proposte sono limitate per le lunghezze d'onda visibili, quindi, allargando il range considerato al fine di sfruttare propriamente lo spettro solare, si potrebbe notare che i difetti del sistema diventano ancor più evidenti.

4.4.2 Miglioramento delle prestazioni mediante introduzione di un'ottica secondaria

Nella precedente sezione è stato messo in evidenza come un sistema le cui grandezze passano dall'ordine dei centimetri a quelle del metro portano

ad importanti conseguenze. Viene di seguito proposto un approccio secondo il quale le aberrazioni cromatiche vengono sfruttate per ottenere un funzionamento qualitativamente lineare del concentratore che utilizza la lente di Fresnel come prima lente.

Fare convergere i raggi entranti con diverse angolazioni sulla medesima superficie è un problema che il sistema di concentrazione deve gestire in modo da assicurare il medesimo comportamento al variare dell'inclinazione dei fasci entranti per angoli appartenenti al cono di accettazione.

Il tutto può a sua volta essere riassunto come la necessità di attenuare gli aspetti indesiderati propri del comportamento della lente di Fresnel mediante l'integrazione di un ottica secondaria.

Si potrebbe pensare all'impiego di un sistema di lenti che portino alla distribuzione uniforme dei raggi entranti. Purtroppo ogni ottica, per quanto ben progettata, realizzata, dotata di coating anti-riflesso comporta sempre perdite comprese tra il 5% ed il 10%. La decisione quantitativamente corretta quindi può essere solo quella di introdurre non più di una singola ottica che cerchi di porre rimedio al problema.

Da ricordare che il contesto ottico in cui porre il sistema è la non imaging optics, quindi ciò che cerchiamo è una radiazione quanto più uniforme possibile sul piano immagine, non di ottenere l'immagine del sole proiettata sul target.

Il Layout di un concentratore solare che impieghi un'ottica di Fresnel come elemento primario è il seguente:

Figura 4.28: Primo Layout del sistema con ottica secondaria

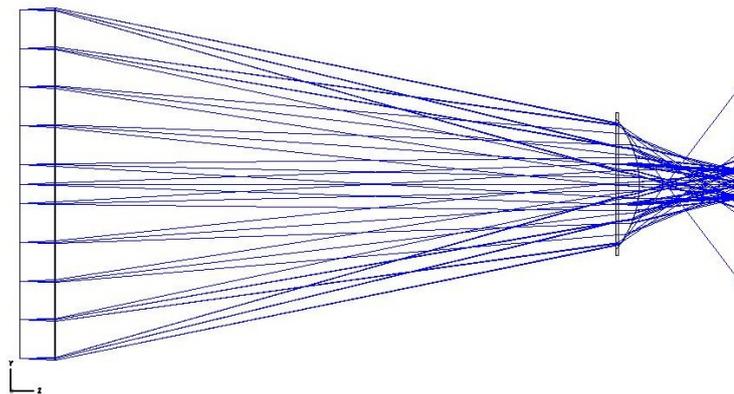


Figura 4.29: L'LDE indica le sue grandezze

Surf: Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OB0	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
ST0	Standard	Infinity	0.000000		250.000000	0.000000
2	Standard	Infinity	50.000000		250.000000	0.000000
3	Standard	Infinity	2.000000	PMMA	252.469271	0.000000
4	Fresnel	-599.980531	800.000000		252.535822	0.000000
5	Standard	Infinity	29.500000	SILICA	104.250853	0.000000
6	Standard	-150.000000	145.000000		94.463761	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		141.715337	0.000000

Apertura lente primaria	500 mm
Focale lente primaria	800 mm
Materiale primaria	PMMA
spessore secondaria	2mm
Cono di accettazione	2°
f-numero	1,6
Focale lente secondaria	145 mm
Materiale secondaria	SILICA
spessore secondaria	29.5mm

Come risulta in figura, è stata introdotta una lente piano convessa. Lo spessore di quest'ultima (dal LDE si può leggere che è spessa 29.5 mm), comporta svariate conseguenze, ma attraverso l'introduzione di un coating anti riflesso, la scelta di materiali propri, l'imposizione delle giuste distanze tra le due lenti e l'ottimizzazione automatica messa a disposizione da Zemax, si giunge ad un miglioramento qualitativamente soddisfacente delle prestazioni. Le migliori apportate permettono una efficace redistribuzione sul target. Lo spot sul piano immagine non è ancora soddisfacente ma il miglioramento è certamente netto (fig. 4.30). Da non scordare c'è che il fascio non sarà mai perfettamente centrato per cui le aberrazioni utilizzate a vantaggio della redistribuzione sulla cella potrebbero non aver un comportamento lineare come fin qui visto peggiorando con incidenza aleatoria le prestazioni del sistema.

Le specifiche sono quelle della lente precedente. Il Full Field Spot Diagram mette subito in evidenza che ora il sistema non riporta più delgi hot spot localizzati al variare dell'angolo di incidenza per angoli piccoli (2 gradi).

Un ulteriore modo per apprezzare i miglioramenti è quello di leggere nuovamente il Chromatic Focal Shift (fig. 4.31).

Dalla lettura del grafico è possibile notare un miglioramento sensibile: il CFS si sposta dai 20 mm della configurazione precedente ai 6 mm del caso attuale. Al di là delle cifre, è importante apprezzare il miglioramento associato all'idea di introdurre questa ottica.

È infatti possibile affermare che i problemi dell'impiego di una singola lente di Fresnel come concentratore siano stati qualitativamente risolti. I miglioramenti ottenuti sotto un piano di aberrazioni e uniformità dello spot al

Figura 4.30: FFSD per il sistema di fig. 4.28

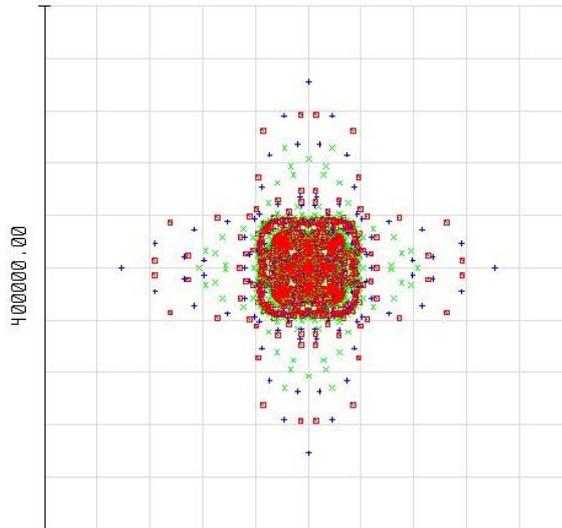
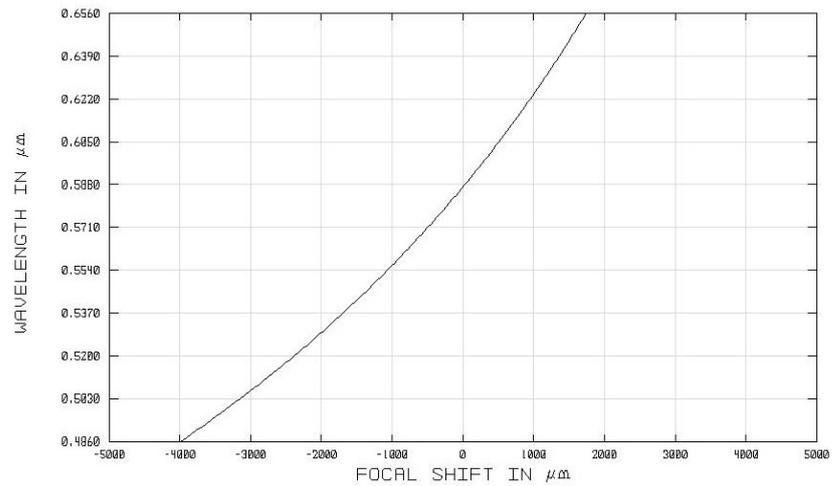


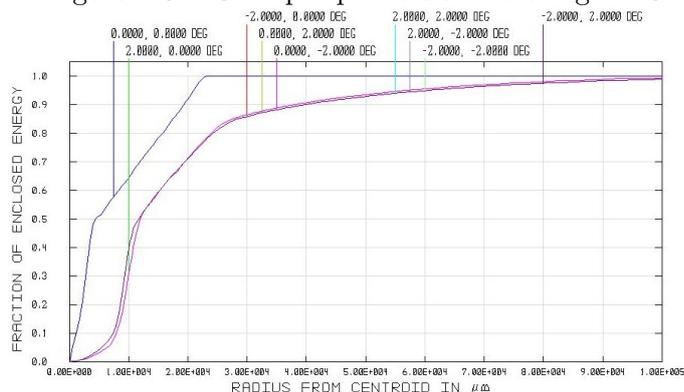
Figura 4.31: CFS per primo sistema di fig. 4.28



variare dell'inclinazione per piccoli angoli comporta però una serie di piccoli costi che è doveroso segnalare.

Da una lettura del Geometric Encircled Energy si nota subito come i miglioramenti raggiunti vengano pagati in termini di superficie della cella fotovoltaica per garantire il cono di accettazione (fig. 4.32) in cui peraltro si nota che per certe angolazioni vi è comunque un'eccessiva pendenza con associato rischio di punti caldi.

Figura 4.32: GEE per primo sistema di fig. 4.28



Bisogna aggiungere che prima gli spot erano estremamente localizzati, per cui anche se le dimensioni raddoppiano non è certo che sia un aspetto negativo poiché il semiconduttore da impiegare sarà probabilmente meno pregiato viste le minori concentrazioni. Infatti al di là dei primi millimetri in cui la crescita dell'energia racchiusa cresce con andamenti non ottimali, allontanandosi dal raggio principale di ogni fascio il comportamento si linearizza.

Ciò che dà la forma allo spot diagram (fig. 4.28) sono le aberrazioni impresse ad ogni singolo fascio in funzione dell'angolo di ingresso chiaramente interpretabili dalla figura 4.33.

Degno di nota è il comportamento dell'OPD entro il cono di accettazione.

La variazione del cammino è praticamente nulla in un ampio range, considerando la presenza di una lente piano convessa e lo spessore della lente potrebbe essere un dato quasi inaspettato sia per i diversi cammini sia per l'ampiezza del cammino ottico.

Si può concludere che vi sono le premesse per iniziare a pensare allo spettro solare visti i buoni esiti prodotti dagli strumenti considerati.

Il sistema ottico appena considerato si caratterizza per evidenti migliorie se paragonato al suo omonimo senza ottica secondaria.

L'utilizzo dell'ottica secondaria sebbene porti sicuramente a maggiori costi permette di restringere la lunghezza del sistema ottico, mantenendo la medes-

Figura 4.33: FSD PMMA slice bilente lunga.jpg

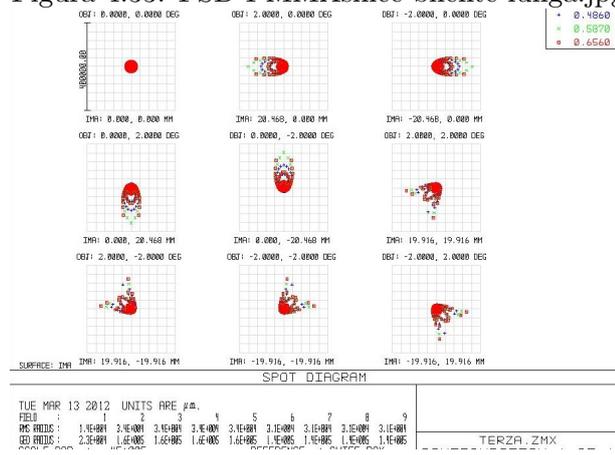
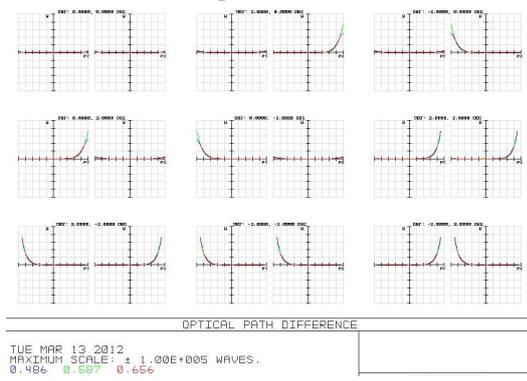


Figura 4.34:



una lente primaria garantendo oltretutto incrementi certi nel rendimento del sistema per la miglior distribuzione energetica (fig. 4.35).

Dopo aver verificato che in linea di massima le ottiche funzionano come desiderato, è utile verificare qualitativamente l'assenza di aberrazioni dannose. La lente secondaria, in questo caso piano convessa, è caratterizzata da uno spessore sicuramente rilevante (29.5 mm), il quale potrebbe far presumere la presenza di aberrazioni indesiderate sul piano immagine.

Grazie all'ottimizzazione permessa da Zemax sulla lente di Fresnel e a una ottimizzazione manuale della secondaria, si giunge a risultati che di sicuro soddisfano qualitativamente i requisiti minimi per funzionare.

È da ricordare infatti che le aberrazioni prevalentemente comportano lo spostamento della focale, ingrandimenti indesiderati locali e zone tendenzialmente ad irraggiamento monocromatico sul piano immagine.

Riassumendo, gli effetti sul piano immagine causati dalle aberrazioni cromatiche sono di incidere sul FF che equivale ad un abbassamento del rendimento.

Vengono di seguito proposti i full field spot diagram monocromatici per un angolo di accettazione fino ai due gradi e per lunghezze d'onda appartenenti al visibile:

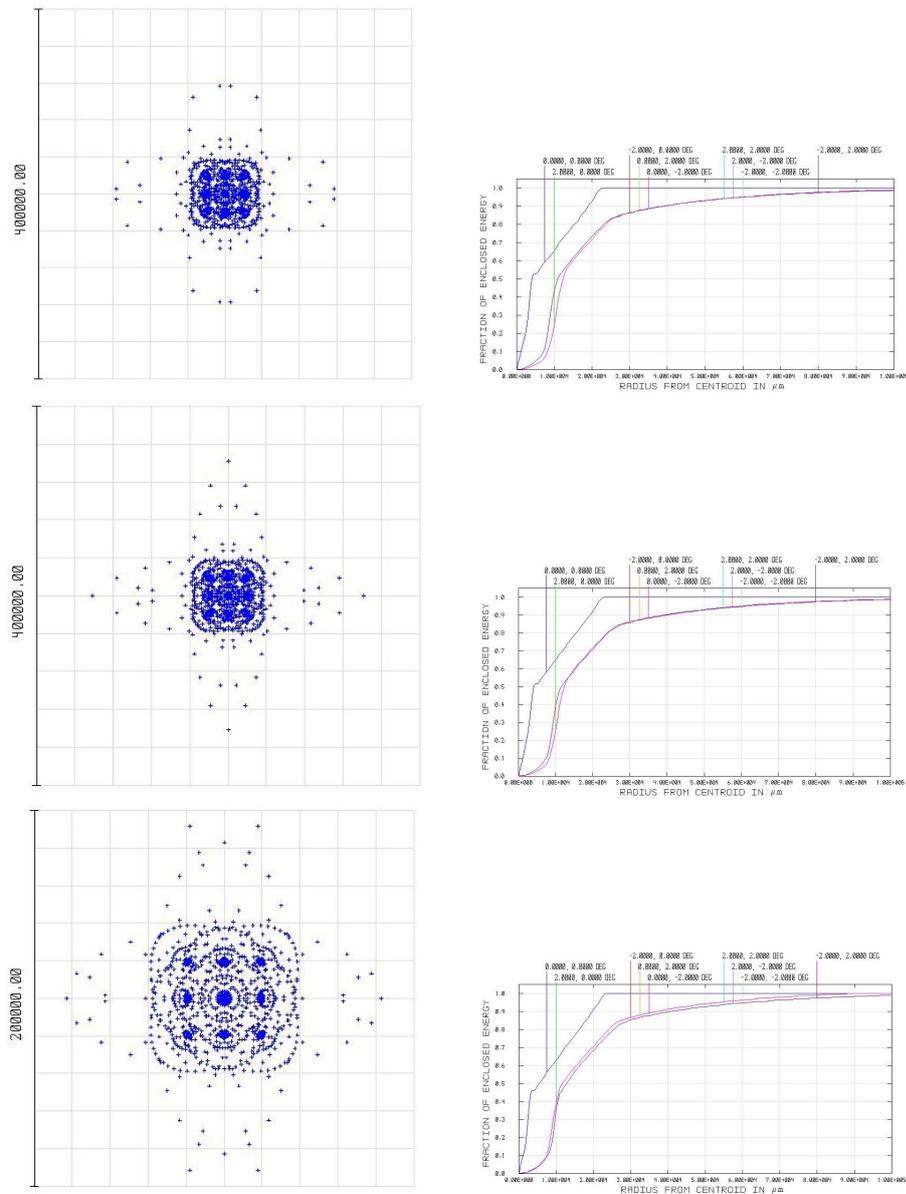


Figura 4.35: Full Field Spot Diagram e Geometric Encircled Energy dall'alto al basso 640,580,480 nm

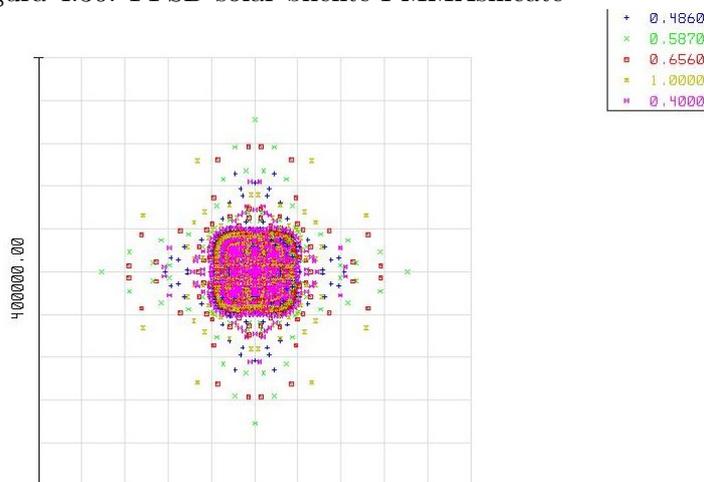
Grazie ai Full Field Spot Diagram (fig. 4.30) e ai Geometric Encircled Energy (fig. 4.32) si può osservare come venga qualitativamente distribuita in modo efficace la radiazione entrante e di come il comportamento sia costante in tutto il range del visibile escludendo in linea di massima pesanti effetti dovuti alle aberrazioni. È possibile apprezzare una distribuzione quasi identica per le diverse lunghezze d'onda. In ultima, grazie al Geometric En-

circled Energy (fig. 4.32) è possibile verificare che al variare della lunghezza d'onda il comportamento entro il range di accettazione è costante, osservazione grazie alla quale possiamo appurare che non vi sono concentrazioni cromatiche locali.

Osservando il Field Spot Diagram (fig. 4.33) dei raggi proiettati sul target è possibile verificare che al variare dell'inclinazione dei fasci entranti dovrebbero esservi concentrazioni localizzate di minore entità rispetto ai precedenti modelli. Nel caso di fasci entranti da più direzioni viene operata dalle ottiche una distribuzione su una superficie più ampia della radiazione incidente. Con il sistema appena osservato si è quindi giunti ad una prima soluzione per eliminare gli hot spot.

Di seguito viene riproposta la medesima configurazione allargando il range di lunghezze d'onda considerate. Il Full Field Spot Diagram (fig. 4.36) per tutte le lunghezze d'onda e con angolo di accettazione 2 gradi sotto ogni angolo si rivela qualitativamente soddisfacente. Infatti il sistema di concentrazione spalma ciò che arriva da ogni angolo e alle varie lunghezze d'onda:

Figura 4.36: FFSD solar bilente PMMA silicate

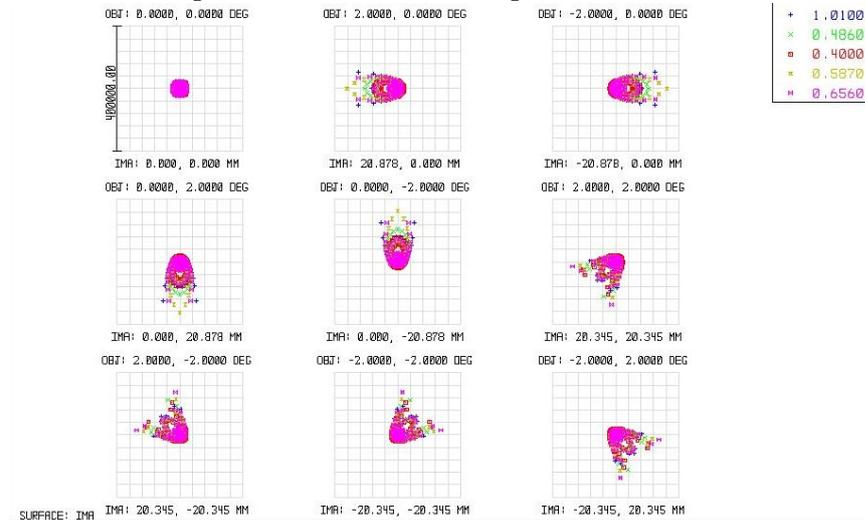


SURFACE: IMA

La forma dello spot sul target è frutto di come le ottiche introducono aberrazioni per i diversi angoli entranti (fig. 4.37). Nel range solare il dispositivo mantiene per i vari fasci entranti lo stesso comportamento evidenziato nel visibile.

L'ampio spettro considerato si paga in termini di un incremento delle non idealità rispetto al modello precedente.

Figura 4.37: FSD solar lunga PMMA silicate



Visto lo spessore delle lenti e l'ampio range di lunghezze d'onda vi è un aumento dello spostamento della focale in associazione alle aberrazioni e alla differenza di cammino ottico (fig. 4.38).

Si tratta di uno shift di 12 mm, non pochi ma accettabili per quanto si è finora visto e soprattutto per quanto si legge dal Geometric Encircled Energy per i diversi angoli entranti (fig. 4.39). Nonostante l'apparente peggioramento generale, dovuto in realtà al fatto che si considera uno spettro molto ampio, si verifica che l'energia nel range spettrale del sole si concentra col medesimo andamento del range visibile.

Per una verifica qualitativa dell'omogeneità sul piano immagine è sufficiente leggere ancora una volta i Full Field Spot Diagram (fig. 4.36) e i Geometric Encircled Energy monocromatici (fig. 4.40). Grazie a questi due strumenti operiamo un confronto mediante variazione della lunghezza d'onda considerata al fine di apprezzare la variazione del percorso ottico di un raggio che attraversa il sistema in funzione della lunghezza d'onda.

Figura 4.38: CFS Layout figura 4.28 nel range solare

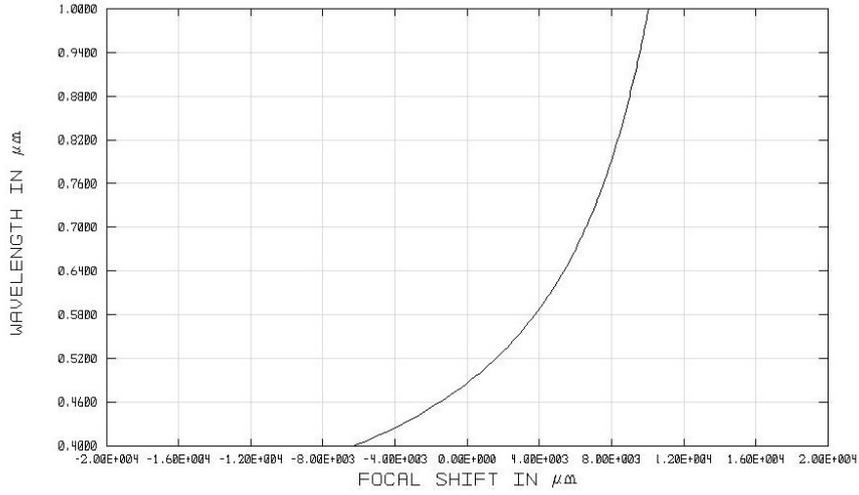
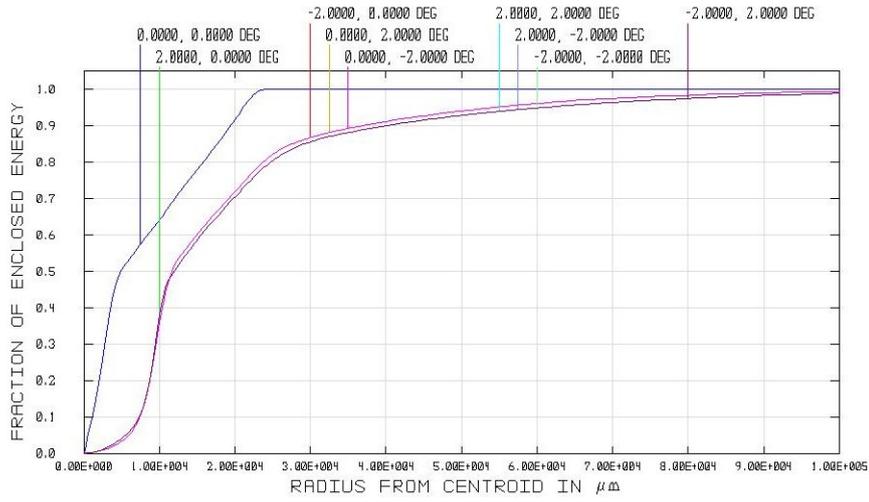


Figura 4.39: GEE Layout figura 4.28 nel range solare



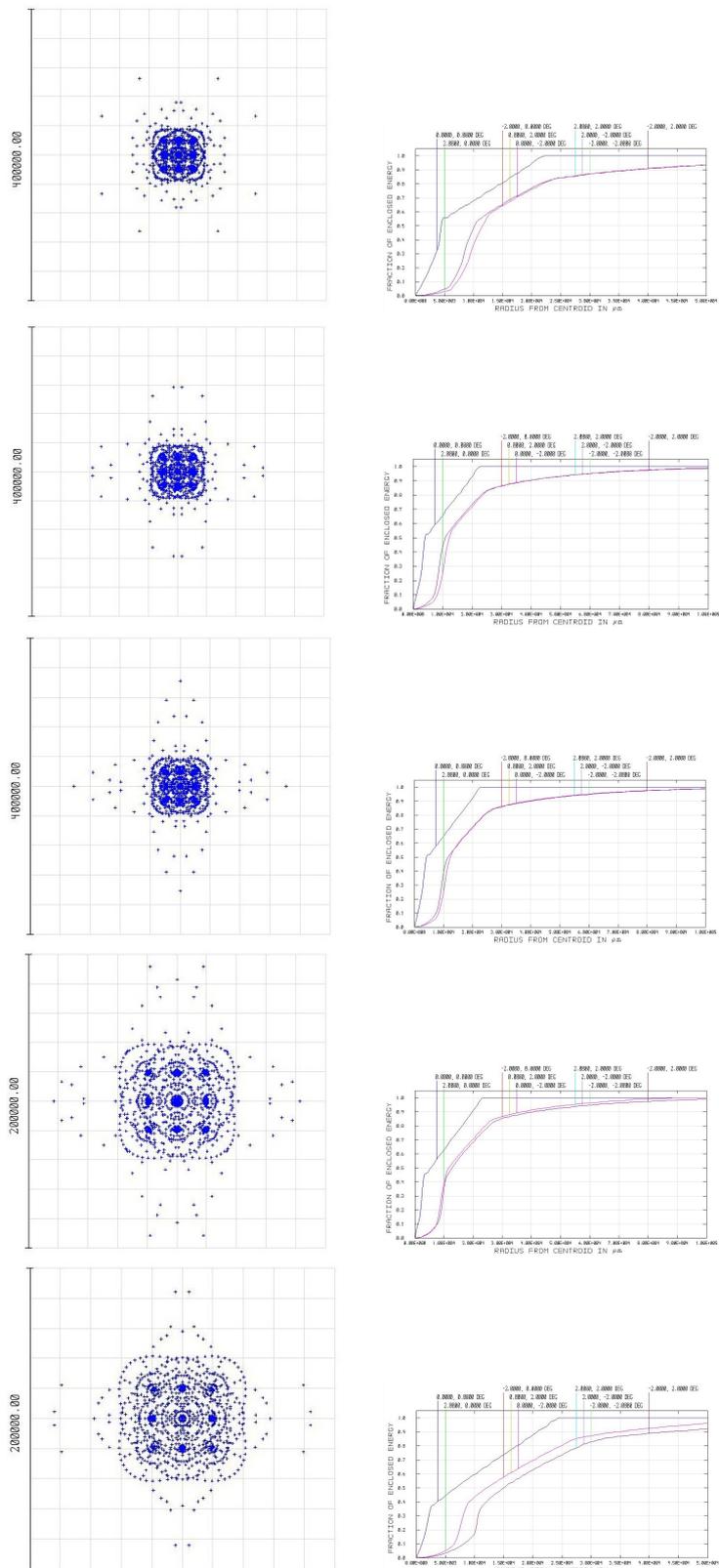


Figura 4.40: Full Field Spot Diagram⁵⁶ e Geometric Encircled Energy dall'alto al basso 1000,640,580,480,400 nm

Ancora una volta operando scelte in modo oculato è stato possibile ottenere un comportamento omogeneo in tutto il range di lunghezze d'onda considerato, che in questo caso che varia tra i 400nm e 1 μm .

4.4.3 Configurazione finale del sistema di concentrazione

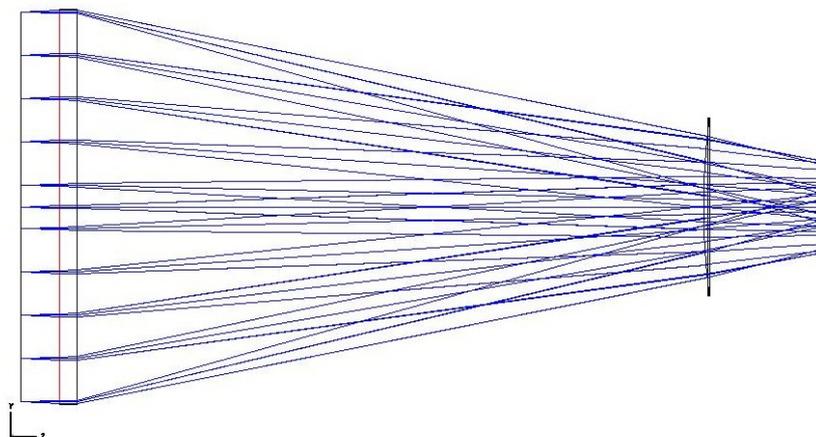
Viene proposta la configurazione finale del sistema di concentrazione che impiega come ottica primaria la lente di Fresnel.

Tutte le considerazioni e i rilevamenti che seguono vengono svolti in un range di lunghezze d'onda da 0.4 μm al 1 μm . A differenza del sistema precedente, come si vede dal Layout proposto (fig. 4.41), cambia la lente secondaria.

Le modifiche rispetto al precedente modello consistono nel invertire la posizione delle curvatura della lente piano convessa, operazione che ha oltretutto permesso di restringere lo spessore dell'ottica secondaria.

Tutti i restanti parametri costitutivi sono rimasti a grandi linee gli stessi, in tal modo il sistema che viene descritto può essere visto come una possibile evoluzione del precedente.

Figura 4.41: Versione finale del Layout



Il sistema sopra si ottiene inserendo nel LDE i seguenti dati:

Figura 4.42: LDE del Layout di figura 4.41

Surf.	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
ST0	Standard		Infinity	0.000000		250.000000 U	0.000000
2	Standard		Infinity	50.000000		250.000000	0.000000
3	Standard		Infinity	2.000000	PMMA	256.186383	0.000000
4	Fresnel		-624.268619 V	796.340000		256.352525	0.000000
5	Standard		885.375224 V	7.000000	SILICA	178.967034	0.000000
6	Standard		Infinity	146.716825		180.425081	0.000000
IHA	Standard		Infinity	-		152.652776	0.000000

Apertura lente primaria	500 mm
Focale lente primaria	796 mm
Materiale primaria	PMMA
Cono di accettazione	2°
f-numero	1,59
Focale lente secondaria	147 mm
Materiale secondaria	SILICA

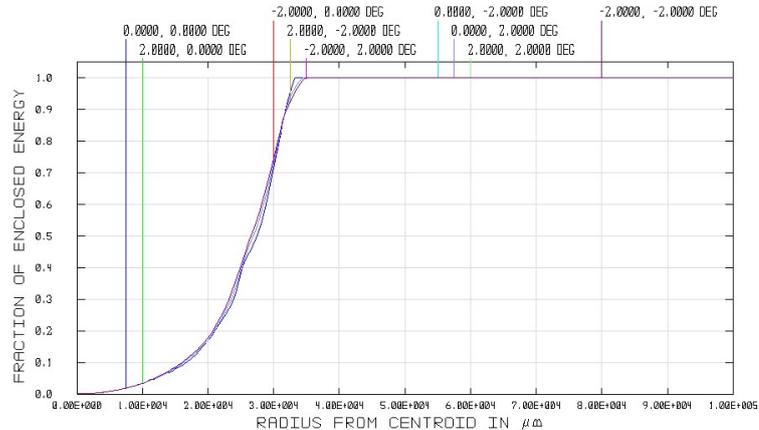
La ragione di un'ulteriore configurazione è quella di garantire qualitativamente una distribuzione ancora più efficace della radiazione entrante. Osservando i Geometric Encircled Energy fin'ora proposti rileviamo che nei primi μm viene spesso concentrata una quantità di radiazione importante rispetto alla totale.

Alla precedente osservazione arriviamo osservando la pendenza stessa dei GEE fin'ora considerati.

Una pendenza elevata comporta che in un disco il cui raggio è eccessivamente piccolo venga raccolta gran parte dell'energia della radiazione incidente, con il conseguente rischio di hot spot locali.

La nuova configurazione porta invece al seguente risultato(fig 56).

Figura 4.43: GEE policromatico del Layout figura 4.41



La pendenza iniziale è molto minore dei casi precedenti, quindi nell'ipotesi di essere in grado di poter contenere le dimensioni finali della cella fotovoltaica, questa configurazione si rivela una possibile interessante evoluzione.

Come ulteriore ipotesi, ragionevolmente, sia assunto che il fascio entrante tenda piuttosto di entrare da ogni angolazione, ad assumere una direnzione preferenziale.

Ne risulta quindi che potrebbero aver luogo delle indesiderate concentrazioni

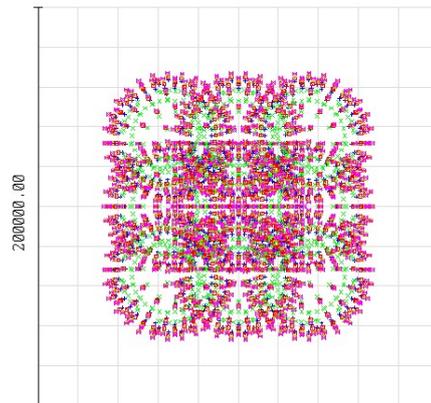
locali con, a seconda del angolo di ingresso, delle contrazioni minori con distribuzioni tuttavia accettabili.

Nel caso in cui non vi sia un fascio perfettamente centrato questa configurazione assicura certamente una distribuzione più efficace dello spot sul piano immagine, situazione che nella precedente configurazione, sebbene le grandezze siano praticamente le stesse, sarebbe mal sopportata visto i differenti principi di funzionamento.

Le modifiche dal precedente layout a quello attuale permettono evitare efficacemente gli hot spot con ricadute immediate sul costo del semiconduttore, che dovrà avere specifiche meno restrittive sotto l'aspetto della massima intensità entrante, quindi un risparmio sui costi.

Al fine di comprendere perchè questa configurazione funzioni meglio si osservi il Full Field Spot Diagram(fig. 4.44) .

Figura 4.44: FFSD del l. di fig. 4.41 con campo di vista 2 °tangenziali e sagittali

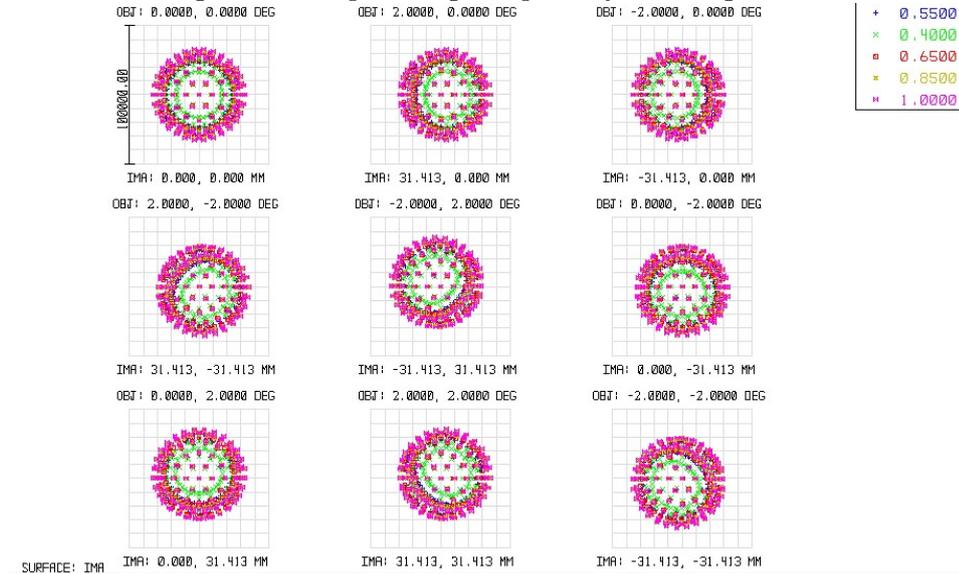


È immediato osservare qualitativamente come, a parità angolazione di ingresso, coi medesimi settings Zemax, vi siano concentrazioni locali di minor rilevanza.

Si giunge alla medesima conclusione osservando gli spot diagram nei possibili angoli incidenti(fig. 4.45) appartenenti al cono di accettazione.

Si osservarvi come la concentrazione usualmente presente in corrispondenza di un raggio, in questa configurazione viene dispersa in una corona, allontanando di fatto la possibilità di hot spot localizzati e garantendo al contempo una buona distribuzione di lunghezze d'onda al variare dei punti presi in esame sul target.

Figura 4.45: Spot Diagram per Layout di fig. 4.41



Grazie alla lettura dei Full Field Spot Diagram (fig. 4.44) e dei Geometric Encircled Energy monocromatici (fig. 4.46) è possibile verificare che vi è una corretta distribuzione spaziale su tutto lo spettro solare.

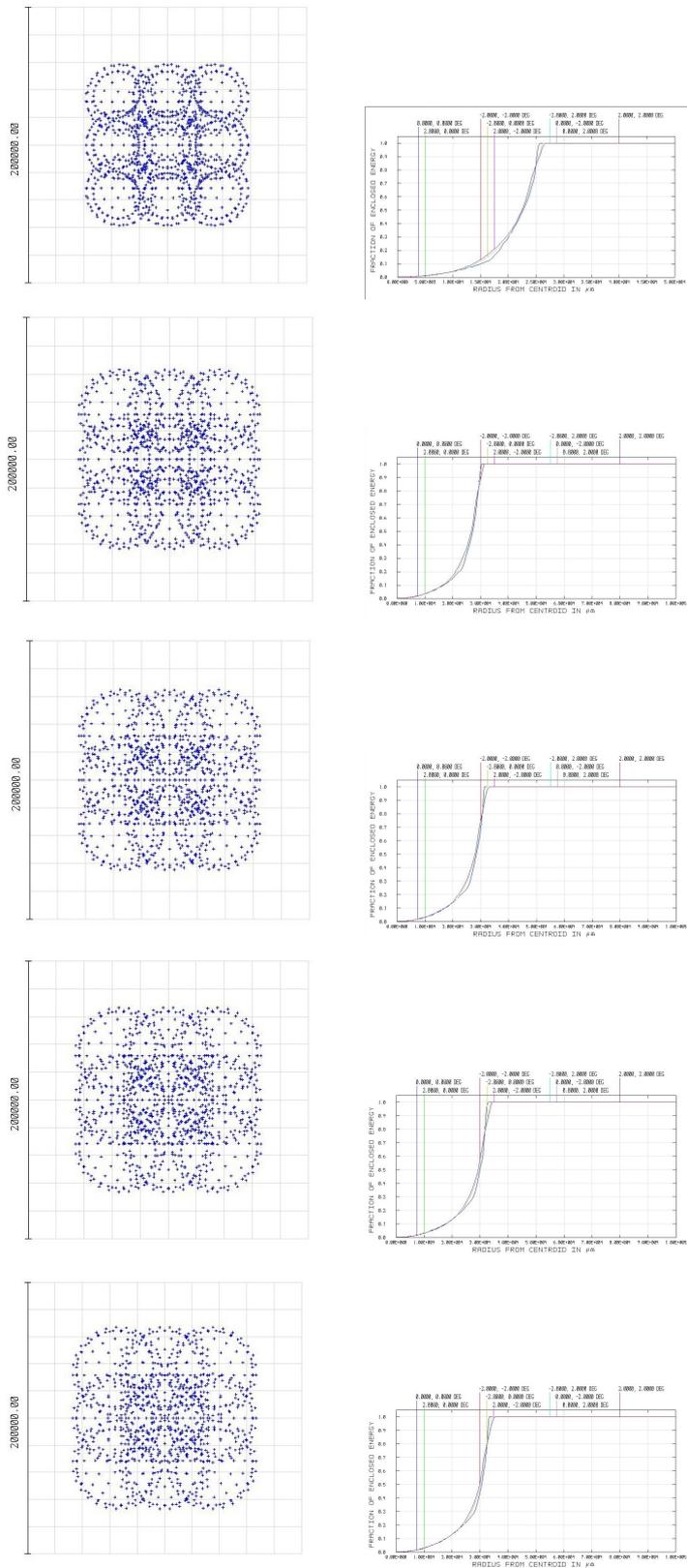
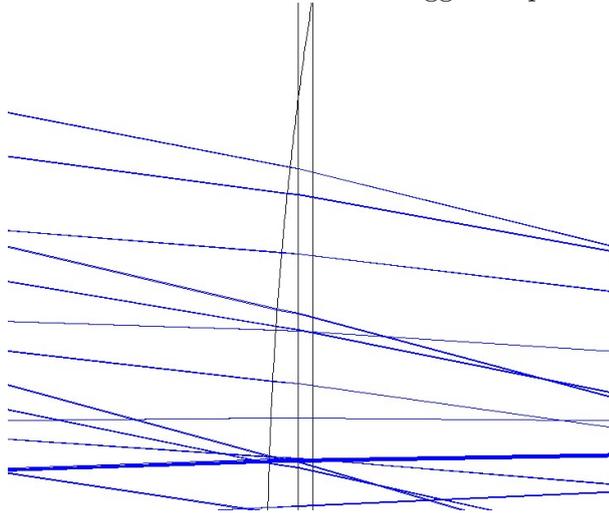


Figura 4.46: Full Field Spot Diagram e Geometric Encircled Energy dall'alto al basso 400,550,650,850,1000 nm

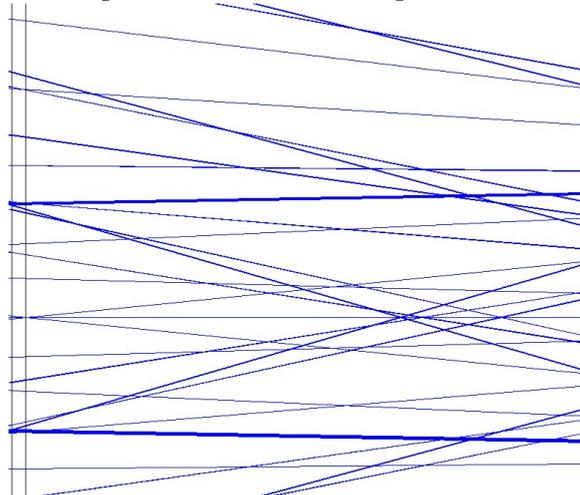
A carattere puramente illustrativo vengono proposti alcuni dattagli del Layout del sistema finale:

Figura 4.47: effetto della diffrazione dei raggi una porzione di lente



Con evidenza particolare è proposto il piano immagine

Figura 4.48: Piano immagine in rosso



Si osserva che nonostante il lavoro fin'ora svolto per rendere uniforme lo spot e svuotare la parte più centrale degli spot sul target, si possono osservare dei addensamenti di raggi a cui possiamo associare degli incrementi di concentrazione, che potrebbero essere degli spunti per procedere con appro-

fondimenti ed ulteriori migliorie.

Si riporta per completezza la tabella delle lenti standard prodotte dalla A.W.I. Industries (USA) Inc. Si osservano diverse lenti le cui focali, aper-

Figura 4.49: Tabella lenti standard Fresnel per il fotovoltaico

FRESNEL LENSES FOR SOLAR ENERGY COLLECTION APPLICATIONS							
Part Number	Fresnel Type	Focal Length (mm)	Grove Pitch (mm)	Aperture (mm)	Material	Thickness(mm)	Size (mm)
E16681-1	Circular Fresnel	50	0.3	100	PMMA	2.0	100X100
E16681-2	Circular Fresnel	400	0.3	780	PMMA	2.0	450X500
E16681-3	Circular Fresnel	1200	0.33	1900	PMMA	2.0	1400X1050
E16681-4	Circular Fresnel	1200	0.33	1900	PMMA	3.0	1400X1050
E16681-5	Linear Fresnel	150	0.3	150X500	PMMA	2.0	150X500
E16681-6	Linear Fresnel	1000	0.3	500X1000	PMMA	3.0	500X500

Focal length tolerance +/- 5%
Thickness tolerance +/- 0.5mm

ture e spessori sono familiari alle lenti di Fresnel introdotte nella simulazione.

Il produttore riporta inoltre che è possibile fabbricare delle lenti con dimensioni personalizzate, e data l'affinità della tabella standard con la lente di Fresnel impiegata, si può ipotizzare che con poche decine di dollari sia realizzabile il design proposto nell'ultima versione.

4.5 Considerazioni sulle dimensioni della lente secondaria

L'apertura della lente secondaria è una variabile utile anche al fine di caratterizzare la forma ed il comportamento degli spot sul piano immagine in funzione dell'angolo di ingresso, anche per raggi al di fuori del cono di accettazione.

Nell'ipotesi che la componente solare incidente al sistema ottico possa almeno in parte arrivare sul piano immagine e colpire zone del sistema fotovoltaico non interessate alla conversione, consegue che è possibile una situazione in cui il sistema fotovoltaico possa venir danneggiato. Eliminare i raggi entranti che portano a tale situazione è un risultato utile, infatti si potrebbe giungere a dover realizzare un sistema fotovoltaico caratterizzato

da specifiche meno costose.

Operare una vignettatura dell'immagine sui bordi della cella fotovoltaica è una possibile soluzione del problema.

In questa sezione viene descritto un modo semplice per giungere ad una parziale vignettatura mediante modulazione del diametro della lente secondaria. L'accorgimento è quello di diminuire di pochi millimetri il raggio della lente piano convessa, operazione che non comporta un incremento dei costi perchè lascia invariate tutte le altre caratteristiche del sistema e agisce solo sul diametro di una lente.

Vengono di seguito proposti due LDE equivalenti eccetto l'apertura della lente secondaria(fig. 4.50).

Figura 4.50: I due LDE messi a confronto

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
STO	Standard	Infinity	0.000000		250.000000 U	0.000000
2	Standard	Infinity	50.000000		250.000000	0.000000
3	Standard	Infinity	2.000000	PMMA	256.186383	0.000000
4	Fresnel	-624.268619 V	796.340000		256.352525	0.000000
5	Standard	885.375224 V	7.000000	SILICA	178.967034	0.000000
6	Standard	Infinity	146.716825		180.425081	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		152.652776	0.000000

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
STO	Standard	Infinity	0.000000		250.000000 U	0.000000
2	Standard	Infinity	50.000000		250.000000	0.000000
3	Standard	Infinity	2.000000	PMMA	256.186383	0.000000
4	Fresnel	-624.268619 V	796.340000		256.352525	0.000000
5*	Standard	885.375224 V	7.000000	SILICA	135.000000 U	0.000000
6*	Standard	Infinity	146.716825		136.000000 U	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		152.652776	0.000000

Apertura primaria	500 mm	Apertura lente primaria	500 mm
Focale primaria	624 mm	Focale lente primaria	624 mm
Materiale primaria	PMMA	Materiale primaria	PMMA
Cono di accettazione	2°	Cono di accettazione	2°
f-numero	1,248	f-numero	1,248
Focale lente secondaria	885 mm	Focale lente secondaria	885 mm
Materiale secondaria	SILICA	Materiale secondaria	SILICA
Apertura lente sec.	178 mm	Apertura lente sec.	135 mm

Il raggio della secondaria della seconda viene ridotto di 22 mm al fine di apprezzare l'utilità di porre la dovuta attenzione all'apertura della lente secondaria. Assieme alla modifica della lente piano convessa viene posto all'ingresso del sistema un raggio che entra con angolo tangenziale e sagittale compreso tra 0 e 5 gradi(fig. 4.51).

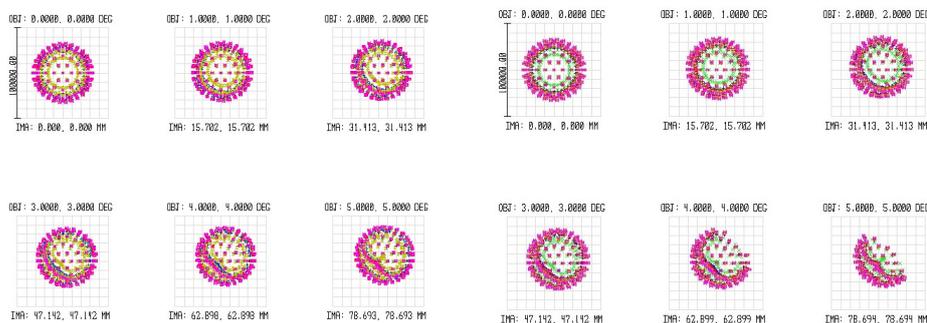
I Field Spot Diagram per le due differenti configurazioni(fig. 4.52) evidenziano come le ottiche propagano in modo diverso i raggi. In particolare nell'ottica in cui la dimensione della secondaria è modificata si osser-

Figura 4.51: Fascio entrante da 0° a 5°

Field Data								
Type:	<input checked="" type="radio"/> Angle (Deg)		<input type="radio"/> Object Height		<input type="radio"/> Parax: Image Height		<input type="radio"/> Real Image Height	
Field Normalization:	Radial							
Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VZX	VZY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	2	1	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	4	3	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	5	4	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	6	5	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	7	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	8	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	9	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	10	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	11	-2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	12	2	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

va come i fasci più esterni vengono vignettati mantenendo pur sempre la concentrazione a forma di corona.

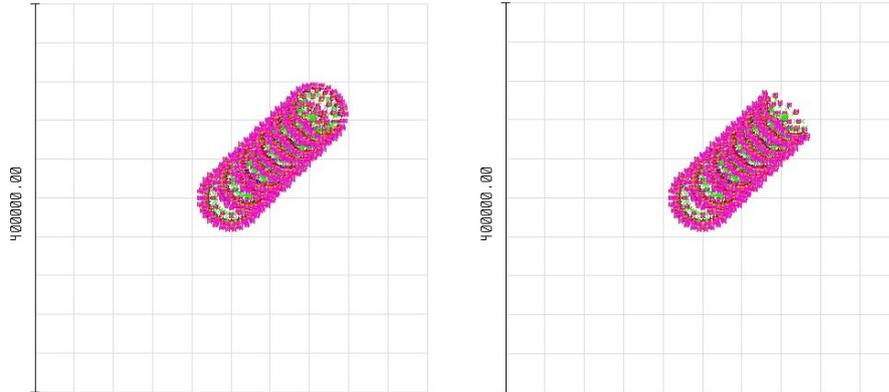
Figura 4.52: FSD messi a confronto per le due diverse configurazioni



L'effetto della variazione del raggio della lente secondaria può essere compreso globalmente grazie al confronto dei Full Field Spot Diagram nelle due diverse configurazioni (fig. 4.53).

All'aumentare dell'inclinazione del raggio entrante i fasci vengono proiettati con il classico spot a forma di corona ma vengono attenuati per effetto della vignettatura. Fenomeno caratteristico della vignettatura è proprio quello di operare l'attenuazione preferenziale sulla zona più lontana dal raggio principale ossia, quella che uscirebbe dal target.

Figura 4.53: FFSD per il fascio entrante di figura 4.51



4.6 Materiali impiegati

A titolo di completezza vengono inseriti i dati forniti dalla libreria di Zemax per i materiali impiegati nella simulazione delle lenti.

Glass Catalog	
Catalog: MISC.AGF	
Glass: POLYSTYR PYREX QUARTZ SAN SEAWATER SILICA	K1: 6.96166300E-001 D0: 2.2370E-005
Rename: SILICA	L1: 4.67914800E-003 D1: 0.0000E+000
Formula: Sellmeier 1	K2: 4.07942600E-001 D2: 0.0000E+000
Status: Standard	L2: 1.35120600E-002 E0: 0.0000E+000
Nd: 1.458464 Vd: 67.8214	K3: 8.97479400E-001 E1: 0.0000E+000
<input type="checkbox"/> Ignore Thermal Expansion	L3: 9.79340000E+001 Ltk: 0.0000E+000
<input type="checkbox"/> Exclude Substitution	TCE: 0.51
<input type="checkbox"/> Meta Material (Negative Index)	Temp: 20
Melt Freq: ? Comment: source: Handbook of Optics Vol. II	p: 2.2
Rel Cost: ? CR: ? FR: ? SR: ? AR: ? PR: ?	dPgF: 0
Save Catalog	Min Wavelength: 0.21000000
Save Catalog As	Max Wavelength: 3.71000000
Reload Catalog	
Exit	

Glass Catalog

Catalog: MISC.AGF

Glass: CR39
F_SILICA
KDP
LAF3
N15
PMMA

Rename: PMMA

Formula: Schott

Status: Standard

Nd: 1.491756 Vd: 57.4408

Ignore Thermal Expansion

Exclude Substitution

Meta Material (Negative Index)

Melt Freq: ? Comment: source: Handbook of Optics Vol. II

Rel Cost: ? CR: ? FR: ? SR: ? AR: ? PR: ?

A0: 2.18645820E+000 D0: 0.0000E+000
A1: -2.44753480E-004 D1: 0.0000E+000
A2: 1.41557870E-002 D2: 0.0000E+000
A3: -4.43297810E-004 E0: 0.0000E+000
A4: 7.76642590E-005 E1: 0.0000E+000
A5: -2.99363820E-006 Ltk: 0.0000E+000

TCE: 0
Temp: 20
p: 1.16
dPgF: 0
Min Wavelength: 0.36500000
Max Wavelength: 1.06000000

Save Catalog Insert Glass Sort By --> Name
Save Catalog As Cut Glass Glass Report Catalog Report
Reload Catalog Copy Glass Transmission Compute Nd/Vd
Exit Paste Glass Fit Index Data Fit Melt Data

Glass Catalog

Catalog: SCHOTT.AGF

Glass: BASF57
BASF64A
BK1
BK3
BK6
BK7

Rename: BK7

Formula: Sellmeier 1

Status: Obsolete

Nd: 1.516800 Vd: 64.1673

Ignore Thermal Expansion

Exclude Substitution

Meta Material (Negative Index)

Melt Freq: ? Comment:

Rel Cost: 1.00 CR: 2.00 FR: 0.00 SR: 1.00 AR: 2.00 PR: 2.30

K1: 1.03961212E+000 D0: 1.8600E-006
L1: 6.00069867E-003 D1: 1.3100E-008
K2: 2.31792344E-001 D2: -1.3700E-011
L2: 2.00179144E-002 E0: 4.3400E-007
K3: 1.01046945E+000 E1: 6.2700E-010
L3: 1.03560653E+002 Ltk: 1.7000E-001

TCE: 7.1
Temp: 20
p: 2.51
dPgF: -0.0009
Min Wavelength: 0.31000000
Max Wavelength: 2.32500000

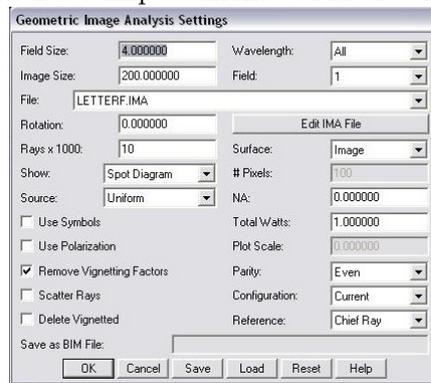
Save Catalog Insert Glass Sort By --> Name
Save Catalog As Cut Glass Glass Report Catalog Report
Reload Catalog Copy Glass Transmission Compute Nd/Vd
Exit Paste Glass Fit Index Data Fit Melt Data

Figura 4.54:

4.7 Confronto nella distribuzione sul piano immagine con e senza ottica secondaria

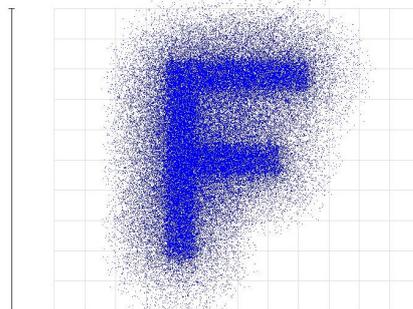
Al fine di offrire un termine di paragone sul miglioramento introdotto dall'ottica secondaria viene utilizzato uno strumento che simula la proiezione sul piano immagine di un fascio entrante con una forma asimmetrica per saggiarne le prestazioni delle due configurazioni chiave(fig.4.21 e fig. 4.41). Questo strumento viene utilizzato per dare una dimostrazione qualitativa del valore dei miglioramenti introdotti e di conseguenza tutti i commenti fatti. Viene posto all'ingresso del sistema una fascio a forma di "F", perpendicolarmente, monocromatico, delle dimensioni esatte della pupilla di ingresso(fig.4.55).

Figura 4.55: Impostazione del fascio entrante



Nell'immagine 4.56 è proposto il risultato prodotto dal sistema ottico che impiega esclusivamente la lente di Fresnel senza secondaria.

Figura 4.56: Fascio sul piano immagine senza ottica secondaria

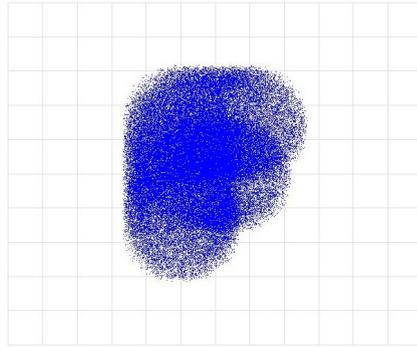


Sopra, sulla figura 4.56 è possibile apprezzare come la lente di Fresnel faccia convergere il fascio entrante e introduca una prima redistribuzione dei fasci entranti. È esattamente la conclusione a cui si è arrivati nella trattazione precedente e che ha portato a comprendere la necessità di integrare

l'ottica secondaria.

Nella 4.57 è riportato il prodotto dell'introduzione del medesimo fascio entrante utilizzando però la configurazione finale.

Figura 4.57: Fascio sul piano immagine senza ottica secondaria



La distribuzione è visibilmente più uniforme del caso precedente (fig. 4.56). Nonostante il fascio entrante sia di una forma innaturale la redistribuzione raggiunge la quasi totalità del target. Le osservazioni più rilevanti sono quindi che il fascio viene esteso a buona parte del target, non si rilevano hot spot evidenti e la forma del fascio entrante è migliore di quella che si ottiene con l'impiego di una singola ottica di Fresnel.

Capitolo 5

Conclusioni

In questo scritto i risultati raggiunti sono diversi:

- Consultazione autonoma di articoli scientifici che descrivono possibili implementazioni di sistemi fotovoltaici;
- Appresi i comandi e i tool fondamentali di Zemax;
- Portato a termine lo sviluppo di un sistema ottico qualitativamente promettente.

Il presente elaborato è stato portato avanti nell'ottica di osservazioni qualitative che hanno permesso mediante lo studio dei risultati proposti da Zemax a sviluppare un possibile Layout dalle prestazioni qualitativamente promettenti e dai costi relativamente esigui.

Non è tuttavia da dimenticare che per arrivare al risultato sopra è stato necessario consultare articoli scientifici del settore assieme a strumenti che permettono di cercare questi ultimi.

In fine lo sviluppo delle competenze per utilizzare Zemax è esso stesso un passo che ha comportato un certo impiego di energie ma che ha permesso di verificare i concetti appresi nella documentazione scientifica consultata.

Bibliografia

- [1] Vincenzi A. Sistemi Fotovoltaici, impianti solari in conto energia. 2006.
- [2] Groppi F. Zuccaro C. Impianti solari fotovoltaici. 2004.
- [3] Voci Mazzoldi Nigro. Elementi di Fisica-Onde. 2006.
- [4] Gordon J.M. Concentrator Optics. 2009.
- [5] Landsberg P.T. Theoretical limits of photovoltaic solar energy conversion. 2002.
- [6] Parretta A. Modelling of a 3D-CPCs for concentrating photovoltaic system. 2002.
- [7] Davis A. Kuhnlenz F. “*Optical Design using Fresnel Lens*”. In: *Optik e Photonik, No 4* (2007).
- [8] Naichia Yeh. “*Analysis of spectrum distribution and losses under Fresnel lenses*”. In: *Renewable and suitable Energy Reviews* (2010), pp. 2926–2935.
- [9] Antonio Luque. “*Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics?*” In: *Applied Physics Reviews* (2011).
- [10] Zillur. “*InGaN Based Multi Junction Concentrator Solar Cell*”. In: *International conference in Electrical and Computer Engineering* (2008).
- [11] Kwangsun. “*Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system*”. In: *OPTICS EXPRESS* (2010).
- [12] W.T. Xie. “*Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review*”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2010).
- [13] RALF LEUTZ. “*DESIGN OF A NONIMAGING FRESNEL LENS FOR SOLAR CONCENTRATORS*”. In: *Solar Energy Vol. 65* (1999).