

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

聚光型太陽模組效能提升與可靠度分析之研究

Research on performance improvement and reliability analysis of
concentration photo voltaic modules

計畫編號：107A026

受委託機關(構)：行政院原子能委員會核能研究所

計畫主持人：潘瑞文

聯絡電話：(公) 063032121ext.57756 (宅) 0926011959

E-mail address：juiwenpan@gmail.com

研究期程：中華民國 107 年 4 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 38 萬元

核研所聯絡人員：林澤洋

報告日期： 107 年 12 月 25 日

計畫參與人員及所屬單位

| 姓名 | 學歷 | 服務機構 |
|-----|-------|--------|
| 潘瑞文 | 博士 | 國立交通大學 |
| 黃啟倫 | 碩士研究生 | 國立交通大學 |
| 陳昱嘉 | 碩士研究生 | 國立交通大學 |
| 陳永達 | 碩士 | 國立交通大學 |

中文摘要

自從 1973 年石油危機以來，能源短缺已成為世界之重要議題，尤其以氣候變遷與環保意識提升，開發替代能源與再生能源非常受到重視。其中，太陽能是最具發展性的再生能源技術，因此許多國家開始積極發展太陽能發電，其中太陽能聚光鏡這個技術可以有效提升太陽能電池之發電效率及應用，具有高度發展潛力。傳統太陽能聚光鏡可區分為折射式與反射式，此兩種太陽能聚光鏡之共通點皆需搭配追日系統彌補可接受角不足的缺陷，以拉長發電運作的時間，因可接受度角的大小會限制不同時間太陽光入射至太陽能電池的角度，可是增加追日系統會造成成本大幅提升，並且須對追日系統進行維修保養以提升系統壽命，因此在此計畫我們提出一無須搭配追日系統之陣列透鏡平板式聚光鏡組應用於大面積平面(如窗、牆)。所提出的新型陣列透鏡平板式太陽能聚光鏡僅由陣列透鏡搭配二次光學原件組成，可接收入射角正負 7° 之光線、聚光比為 30 倍、厚度為 30mm。最後實現一無需搭配追日系統之陣列透鏡平板式太陽能聚光鏡。

英文摘要

Since the oil crisis in 1973, the energy shortage has become an important issue in the world, in particular the climate change and the environmental awareness rises. Therefore, to develop the alternative energy and renewable energy is very important. Among the alternative energies, the solar energy is the most evolution of technique. There are many countries actively research the solar cells. Among the solar technology the concentrator can effectively increase the solar cell optical efficiency and application. Therefore the concentrator has a high potential for development. The concentrator is divided into two categories: reflective and refractive. Both of them need the tracker device to offset the small angle of acceptance, that can increase the operating time a day. However, the tracker system will increase the cost. So in this research, we develop lens array concentrator system without the tracker for large flat plane of application (window or wall). The lens array concentrator is consist by lens array and secondary lens. The lens array concentrator it's half acceptance, concentration ratio, thickness is 7 degree, 30, and 30 mm, respectively.

目 錄

| | |
|------------------------|----|
| 目 錄..... | I |
| 中文摘要..... | 1 |
| 英文摘要..... | 2 |
| 作者及所屬單位..... | 3 |
| 壹、計畫緣起與目的..... | 3 |
| 貳、研究方法與過程..... | 6 |
| 一、建立太陽光源模型..... | 6 |
| (一) 太陽光光譜定..... | 6 |
| 1. AM0..... | 6 |
| 1. AM1..... | 6 |
| 1. AM1.5..... | 7 |
| (二) 採用 AM1.5..... | 7 |
| 二、建立陣列透鏡之單一初階聚光透鏡..... | 8 |
| (一) Zemax..... | 9 |
| 1. 設置 general..... | 9 |
| 2. 建立透鏡..... | 9 |
| 3. 進行優化..... | 9 |
| (二) LightTools..... | 9 |
| 1. 建立單一聚光透鏡..... | 9 |
| 2. 設置接收面..... | 9 |
| 3. 進行模擬..... | 10 |
| 4. 模擬和分析..... | 10 |
| (1) 可接受角..... | 10 |
| (2) 球面透鏡..... | 10 |
| (3) 非球面透鏡..... | 13 |
| (A) Conic..... | 15 |

| | |
|--|-----|
| (B) 4th order aspheric(Conic+4 th Order)..... | 17 |
| (C) 6th order aspheric(Conic+4th Order+6th order)... | 20 |
| (D) 6th order aspheric(Conic+4th Order+6th order+8th order) | 22 |
| (E)篩選和比較..... | 24 |
| 三、設計大可接受角之二次光學元件 | 26 |
| (一)建立二是光學元件 | 26 |
| 1.比較不同二次光學元件架構..... | 26 |
| (1)CAP | 26 |
| (2)不同二次光學元件的架構..... | 26 |
| (3)選擇二次光學元件 | 28 |
| (二) 模擬與分析..... | 28 |
| 1.可接受角 | 28 |
| 2.均勻度 | 28 |
| 3.二次光學元件之設計 | 29 |
| 4.結果 | 38 |
| 四、驗證量測 | 40 |
| (一)實驗過程 | 42 |
| (二)實驗結果 | 43 |
| 1.3mmx3mm 太陽能電池之測量..... | 43 |
| 2.10mmx10mm 太陽能電池之測量 | 45 |
| 五、容忍度公差分析 | 48 |
| 參、主要發現與結論..... | 522 |
| 肆、參考文獻..... | 53 |

中文摘要

自從 1973 年石油危機以來，能源短缺已成為世界之重要議題，尤其以氣候變遷與環保意識提升，開發替代能源與再生能源非常受到重視。其中，太陽能是最具發展性的再生能源技術，因此許多國家開始積極發展太陽能發電，其中太陽能聚光鏡這個技術可以有效提升太陽能電池之發電效率及應用，具有高度發展潛力。傳統太陽能聚光鏡可區分為折射式與反射式，此兩種太陽能聚光鏡之共通點皆需搭配追日系統彌補可接受角不足的缺陷，以拉長發電運作的時間，因可接受度角的大小會限制不同時間太陽光入射至太陽能電池的角度，可是增加追日系統會造成成本大幅提升，並且須對追日系統進行維修保養以提升系統壽命，因此在此計畫我們提出一無須搭配追日系統之陣列透鏡平板式聚光鏡組應用於大面積平面(如窗、牆)。所提出的新型陣列透鏡平板式太陽能聚光鏡僅由陣列透鏡搭配二次光學原件組成，可接收入射角正負 7° 之光線、聚光比為 30 倍、厚度為 30mm。最後實現一無需搭配追日系統之陣列透鏡平板式太陽能聚光鏡。

Abstract

Since the oil crisis in 1973, the energy shortage has become an important issue in the world, in particular the climate change and the environmental awareness rises. Therefore, to develop the alternative energy and renewable energy is very important. Among the alternative energies, the solar energy is the most evolution of technique. There are many countries actively research the solar cells. Among the solar technology the concentrator can effectively increase the solar cell optical efficiency and application. Therefore the concentrator has a high potential for development. The concentrator is divided into two categories: reflective and refractive. Both of them need the tracker device to offset the small angle of acceptance, that can increase the operating time a day. However, the tracker system will increase the cost. So in this research, we develop lens array concentrator system without the tracker for large flat plane of application (window or wall). The lens array concentrator is consist by lens array and secondary lens. The lens array concentrator it's half acceptance, concentration ratio, thickness is 7 degree, 30, and 30 mm, respectively.

作者及所屬單位

| 姓名 | 學歷 | 服務機構 |
|-----|-------|--------|
| 潘瑞文 | 博士 | 國立交通大學 |
| 黃啟倫 | 碩士研究生 | 國立交通大學 |
| 陳昱嘉 | 碩士研究生 | 國立交通大學 |
| 陳永達 | 碩士 | 國立交通大學 |

壹、計畫緣起與目的

近年來，因為全球暖化，使得全球平均溫度上升，CO₂（二氧化碳）濃度上升是造成溫室效應的主要原因，使用石油和煤炭產生電力是二氧化碳排放的主要來源。為了防止溫度進一步的升高，再生能源將會逐漸取代非再生能源，例如水力、風能和太陽能，其中太陽能是可輕易取得的能源，且儲量比其它替代能源還要來的多。太陽能電池之材料研究發展，其中以 III-V 族複合層的太陽能電池效率最高超過 40%，尤其近年以 Fraunhofer ISE/Soitecs 之太陽能電池效率高達 46%，因此 III-V 族如圖 1 的太陽能電池是理想的材料。然而其昂貴成本對應的提高單位效率及產業化是相當重要的議題。由於太陽能電池的效率不斷的提升，世界各國也極力的發展太陽能電池，用此能源也能減少各國的廢棄排放量來達到歐盟 RoHS 的相關規範要求，為了要做出高效率的太陽能電池，且達到低成本並且有效率的發電來達到我們的需求。以下為各類的太陽能電池發電量的比較：薄膜型太陽能(7%~12%)、晶圓型太陽能(12%~20%)、聚光型太陽能(31%~46%)、而傳統核能電廠(30%)。由上述可得知聚

光型太陽能電池在應用上具有極大的優勢與發展價值。為了減少 III-V 族太陽能電池的成本，聚光鏡被使用來減少太陽能電池的面積，也同時降低太陽能模組的成本。因此，在高成本的太陽能電池中使用在高效率聚光型太陽能發電 CPV(Concentration Photo Voltaic)，成為一個重要的議題，類似的研究成果各界人士也陸續的提出中。太陽能聚光鏡主要分成兩大類，第一類為反射式太陽能聚光鏡如圖 2，反射式太陽能聚光鏡擁有多項優點，例如：較大的聚光倍率、較小的 F-number，且無色散，但缺點就是製造上對角度的公差尤其嚴格，因其入射光於反射面偏差 θ 時，會造成反射 2θ 的誤差，又因大多太陽能聚光鏡的可接受角都很小，因此在製作的公差上要求相當精準，否則製作上有些微誤差時效率就會大幅下降。第二類為折射式太陽能聚光鏡如圖 3，雖然折射式太陽能聚光鏡的倍率較小、F-number 較大，其角度敏感性相對反射式太陽能聚光鏡來說較不敏感，此兩類太陽能聚光鏡之共通點為都需搭配追日系統，因為在光學元件結構中，不同時刻的光，經大氣入射至聚光鏡的入射角度不同，當偏離垂直入射角時常會使聚焦點移出太陽能電池之外，甚至全反射或折射出聚光鏡外導致效率瞬間降低。可是增加追日系統會造成成本大幅提升，還須針對感測器與步進馬達定期校正，並且須對追日系統進行維修保養以提升系統壽命，設計上，我們於光學軟體 LightTools 上針對可接受度角進行設計，並將入射

於聚光鏡之光線各角度進行模擬驗證。在本研究我們提出一無需搭配追日系統之陣列透鏡平板式太陽能聚光鏡，為了減少對於角度之敏感性，因此我們挑選折射式太陽能聚光鏡為設計原型，不同之處在於使用陣列透鏡取代折射稜鏡並搭配二次光學原件以達到高均勻度與高可接受角

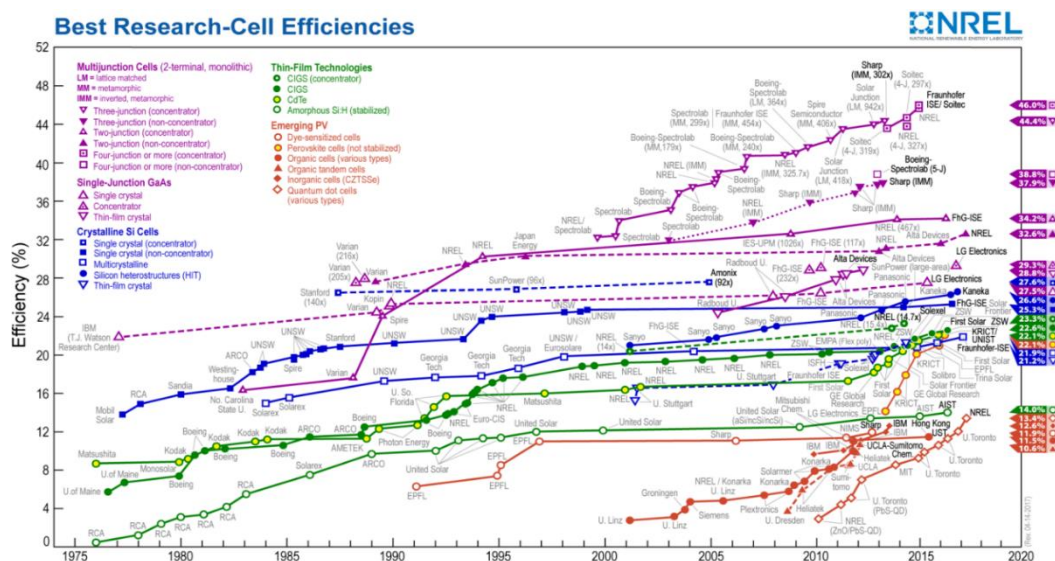


圖 1 III-V 族複合層的太陽能電池發展 (來源 NREL)

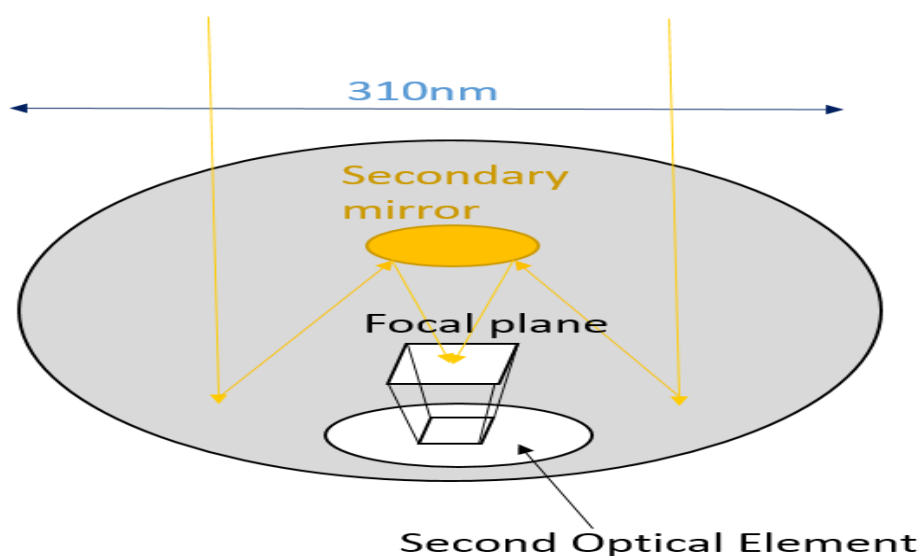


圖 2 反射式太陽能聚光鏡

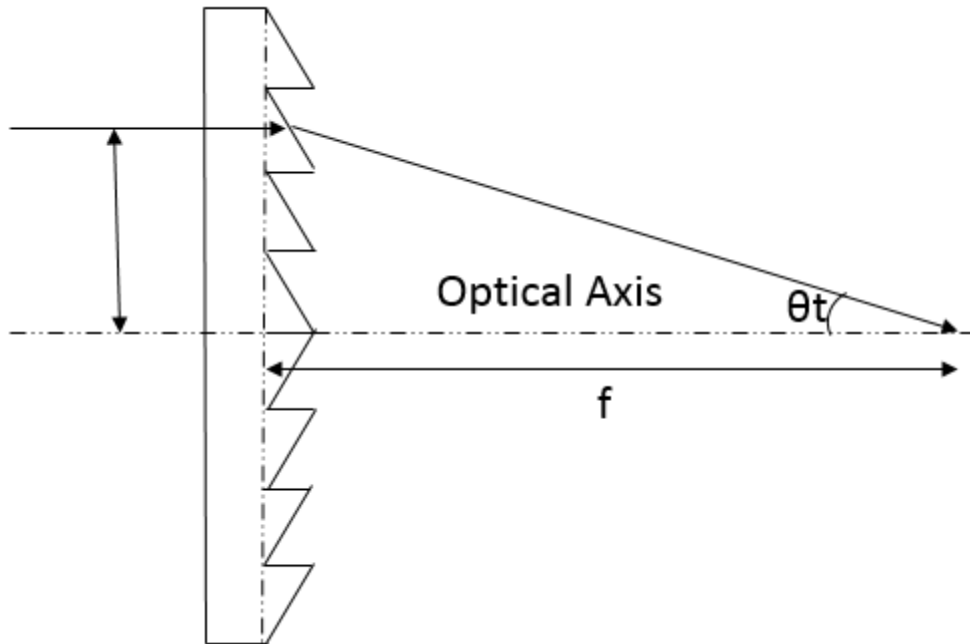


圖 3 折射式太陽能聚光鏡

貳、研究方法與過程

本計劃實施步驟如下：

一、 建立太陽光源模型

(一)太陽光光譜定：

AM 即 Air Mass，定義為穿過幾個大氣層厚度之太陽光 (Air Mass $\sim \sec(\theta)$)，不同 Air Mass 亦代表不同的太陽光光譜)，如圖 4

1. AM0 (於外太空，不穿過的大氣層) $\sim 1,400 \text{ W/m}^2$
2. AM1 ($\sec(\theta)=1 \rightarrow \theta \sim 0$) $\sim 1,000 \text{ W/m}^2$

3. AM1.5 ($\sec(\theta)=1.5 \rightarrow \theta \sim 45^\circ$) $\sim 844 \text{ W/m}^2$

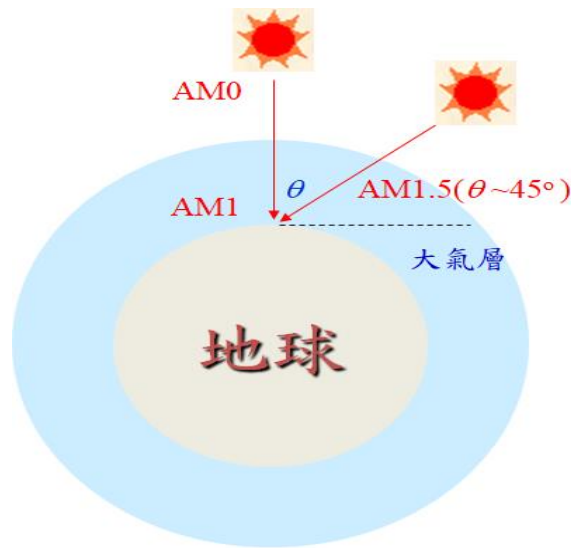


圖 4 AM0、AM1、AM1.5

(二)採用 AM1.5D

太陽光光源我們採用 AM1.5 之能量強度[1]，AM1.5 用來表示北半球於地面的平均照度，是指陽光透過大氣層後，與地表呈 45° 時的光強度，功率約 844 W/m^2 ，在國際規範(IEC 891、IEC 904-1)將 AM1.5 的功率定義為 1000 W/m^2 。其光譜為 400 nm 至 1500 nm 如圖 5，因於透鏡上折射率會隨波長增減，因此真實光對於陣列 CPV 鏡組需進行進一步優化。

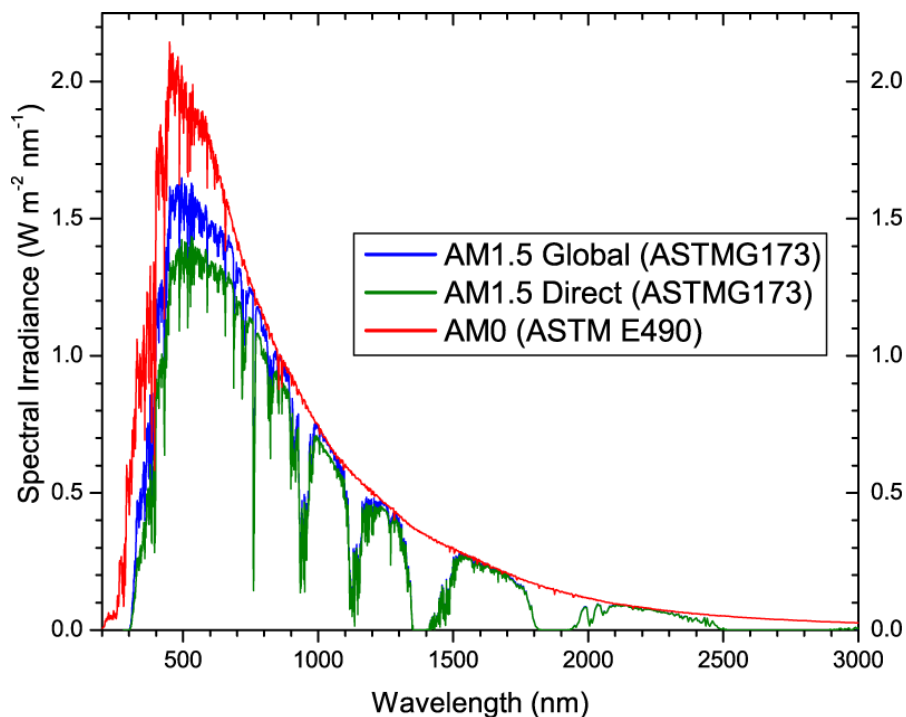


圖 5 太陽光源能量強度

二、建立陣列透鏡之單一初階聚光透鏡：

本計畫分成上下兩部分結構設計，上層為材質 PMMA 之聚光透鏡，下層則也採用 PMMA 之二次自由曲面透鏡覆蓋於 III-V 太陽能電池晶片之上[2,3]，因此我們先將核能所所提供之長寬各 3 mm 之太陽能電池以倍率 30 倍設計初階上層透鏡，並以光學模擬軟體 Zemax 模擬優化透鏡距焦倍率，再將參數建於光學模擬軟體 LightTools 模擬其效率和可接受角。

首先在 Zemax 中，設置基本參數，並建立單一初階聚光透鏡，進行模擬和優化，如圖 6，完成後再將參數輸入在 LightTools 進行

照明的模擬，並加以分析，如圖 7。

(一)Zemax：

1. 首先在 General 設置 EPD=18.541，並在 Lens Data Editor 裡面，STO 欄位中的 Glass 輸入 設置好的材質 PMMA，並給予中心厚度 2mm。
2. 在 STO 和 IMA 中插入一個欄位，並在 Radius 和 Thickness 設置變數，建立透鏡。
3. 打開 Merit Function Editor，給予適當指令限制厚度和有效焦距，進行優化

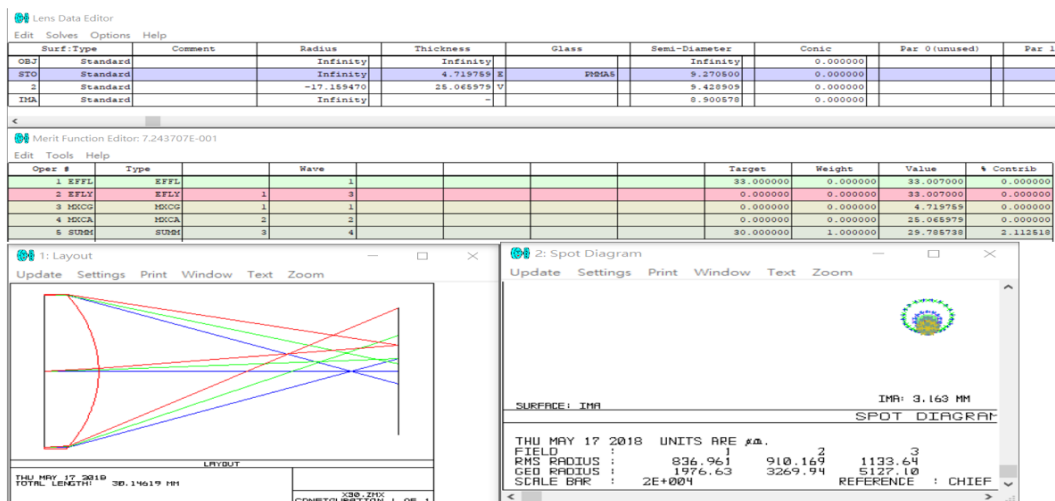


圖 6

(二) LightTools：

1. 首先建立單一聚光透鏡，並輸入 Zemax 優化完成後的參數。
2. 使用 Dummy Surface 設置 chip size 3mm x 3mm，並使用 Add Surface Receiver 設定為接收面 M

3. 進行模擬，並分析其光學效率和可接受角

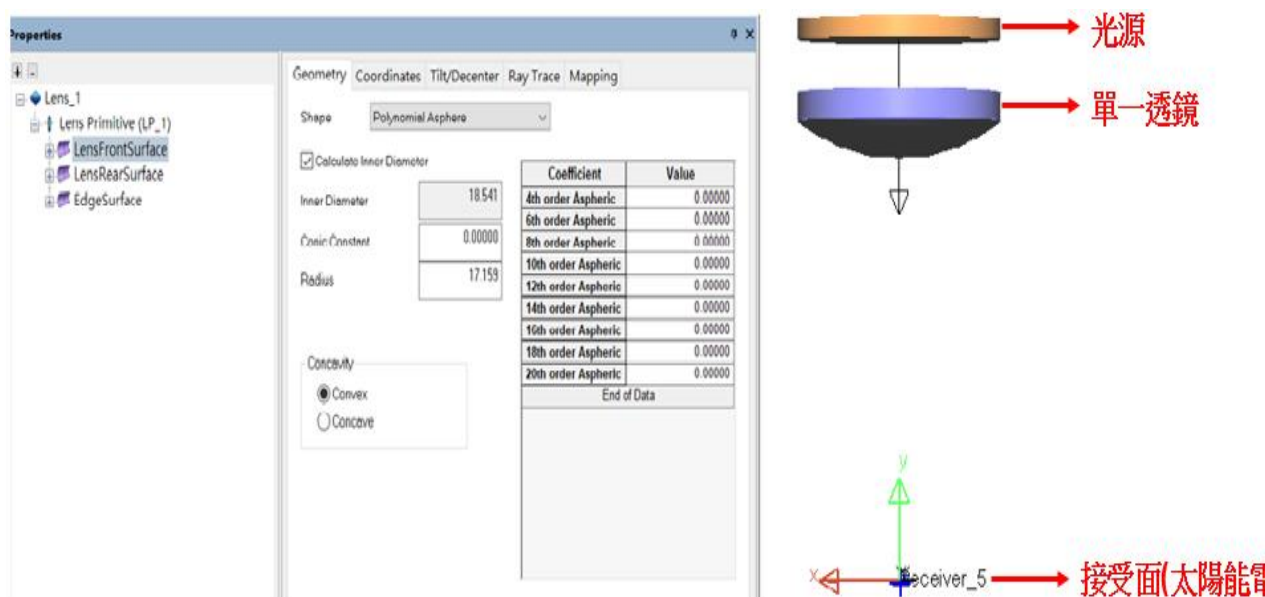


圖 7

4. 模擬和分析

(1) 可接受角

核能所給予可接受角[4]的定義，是聚光器可以收集到 50% 軸上功率的入射角度。

(2) 球面透鏡

當平行光通過球面透鏡，球面透鏡本身就會在成像上造成球差[5][6]，當球面透鏡造成的像差越大，就可能造成某部分的光落點在太陽能電池外，導致光學效率上的降低。

從 Zemax 模擬的過程中，可以透過 Spot Diagram 來看成像的

大小[7]，如圖 8，當 GEO RADIUS 大於 1500um(1.5mm)，則光的成像會大於 Chip Size 3mm，就會造成光學效率上的降低，如圖 9。

再將模擬結果，輸入到 LightTools 去分析光學效率和可接受角，結果如圖，可以從圖 10 中觀察其趨勢：光學效率會隨 F/#的上升而上升，而可接受角會隨 F/#的上升而下降。如果從至少要達到 80%的光學效率的前提下，再從不同的 F/#中挑選出最佳的可接受角的標準來看，可以選出在 F/#=1.78 的時候，可以得到 87.23%的光學效率和 3.03° 的可接受角，如表格 1，由於隨著 F/#下降，而光學效率大幅的降低，導致無法得到更好的可接受角。

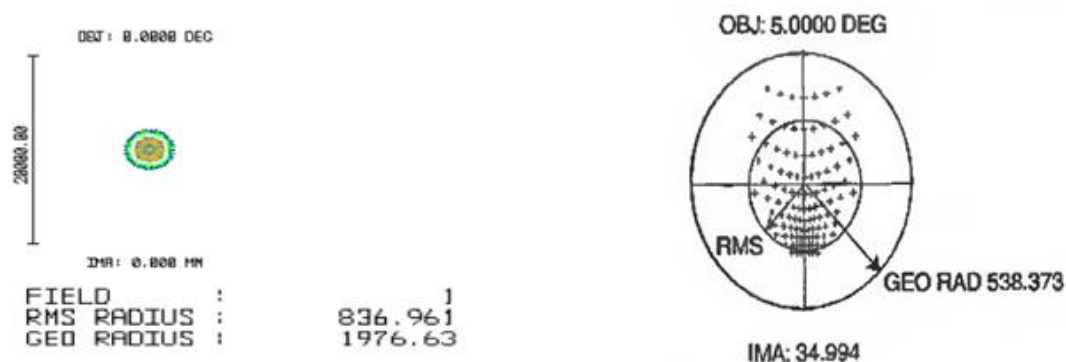


圖 8

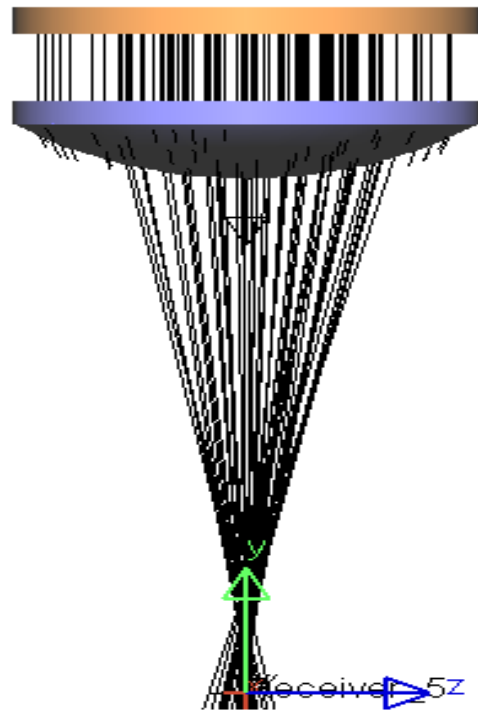


圖 9

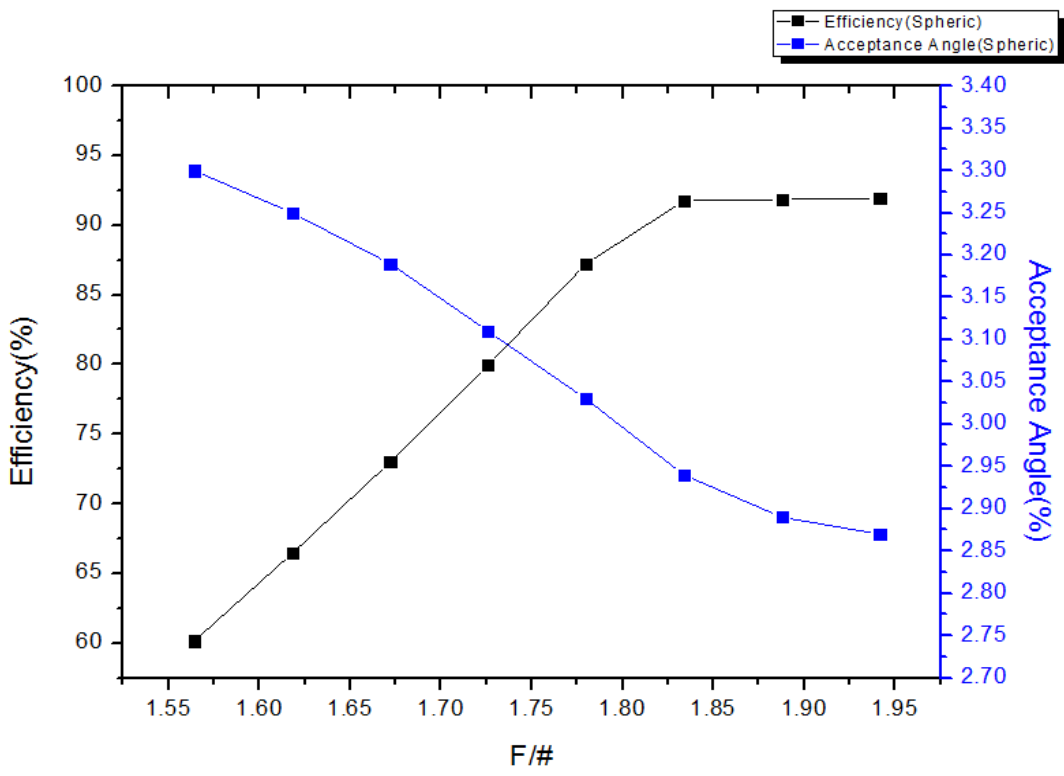


圖 10

| F/# | Efficiency (%) | Acceptance Angle(Degree) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1.94 | 91.93 | 2.96 |
| 1.89 | 91.86 | 2.89 |
| 1.83 | 91.76 | 2.94 |
| 1.78 | 87.23 | 3.03 |
| 1.73 | 79.96 | 3.11 |
| 1.67 | 72.99 | 3.19 |
| 1.61 | 66.43 | 3.25 |
| 1.56 | 60.15 | 3.3 |

表格 1

(3) 非球面透鏡

由於球面透鏡本身造成的球差，迫使架構本身的光學效率和可接受角受到限制，造成影響，因此把球面透鏡改變為非球面透鏡，並在 Conic Constant、4th order aspheric、6th order aspheric 和 8th order aspheric 之間做比較和篩選，而非球面透鏡在 PMMA 上的加工、製成上並不會有太昂貴的花費和困

難[8]，並且能有效解決像差的問題和帶來很多效益[9]，大大地提升了整體架構的效能。

例如：當有效 $F/\#=1.56$ 的時候，將球面透鏡改為 Conic 非球面透鏡，則球差會得到很大的改善，從 ZEMAX 的 Spot Diagram 中，就能看到的 RMS RADIUS 和 GEO RADIUS 數值從 1393um 和 4489um，降低到 600um 和 1069um，數值有很大的降低，如圖 11；從 LightTools 的照明分析結果來看，效率也從 60.15% 提升到 91.82%，獲得很大的提升，如圖 12。

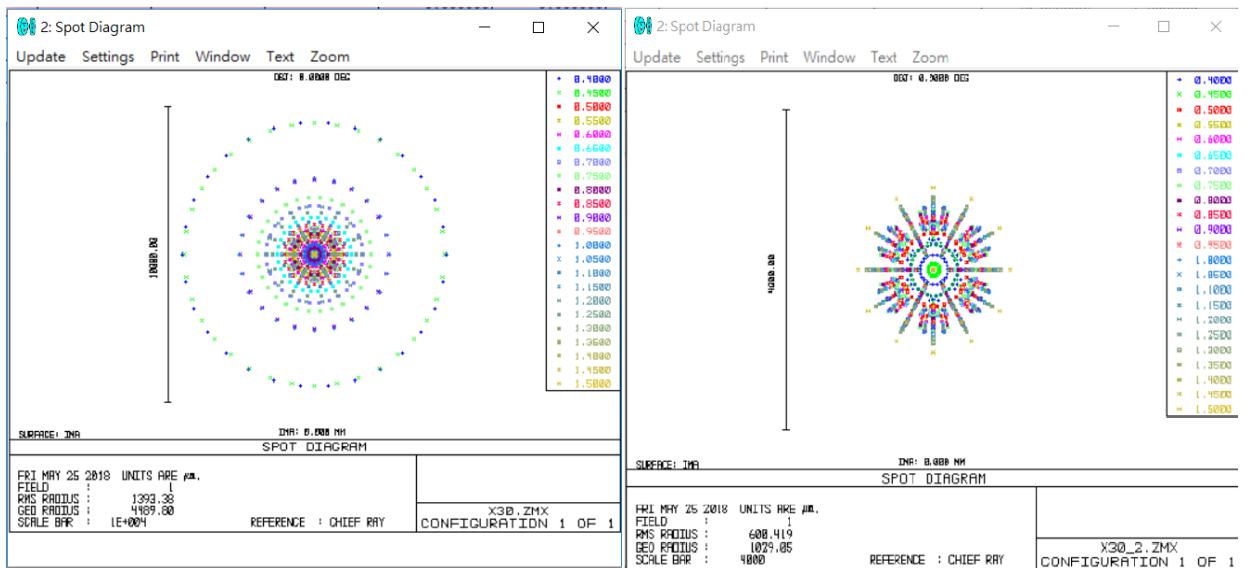


圖 11

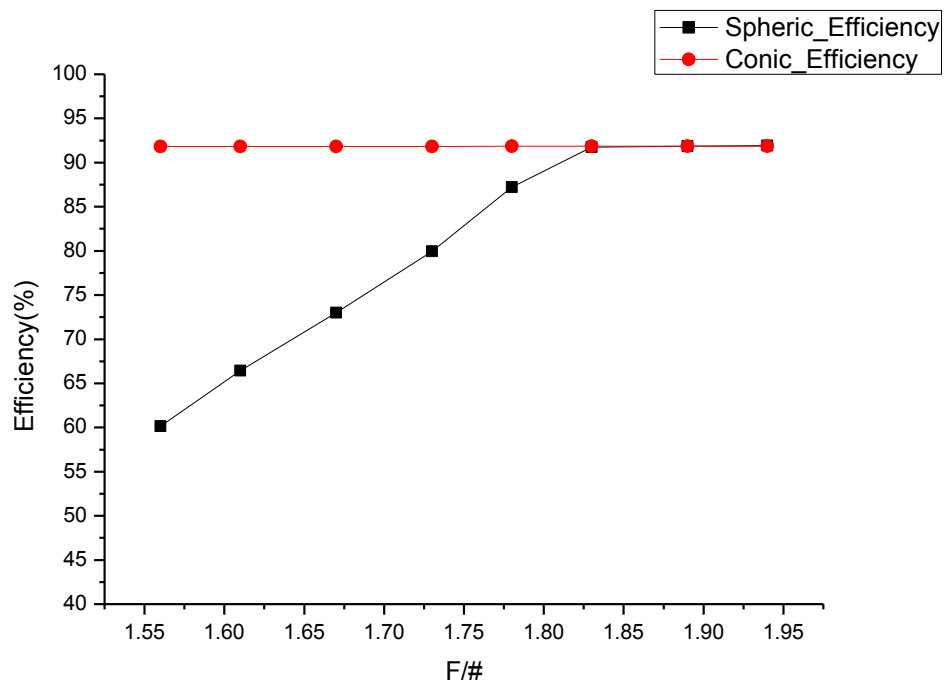


圖 12

(A) Conic

當球面透鏡，改變為非球面透鏡 Conic，可以看到光學效率獲得了很大的改善，幾乎都維持在 91.8% 左右，而可接受角會有一個高峰，如圖 13。如果從至少要達到 80% 的光學效率的前提下，再從不同的 F/# 中挑選出最佳的可接受角的標準來看，可以選出在 F/#=1.29 的時候，可以達到 91.8% 的光學效率和 2.93° 的可接受角，為最佳解答，如表格 2

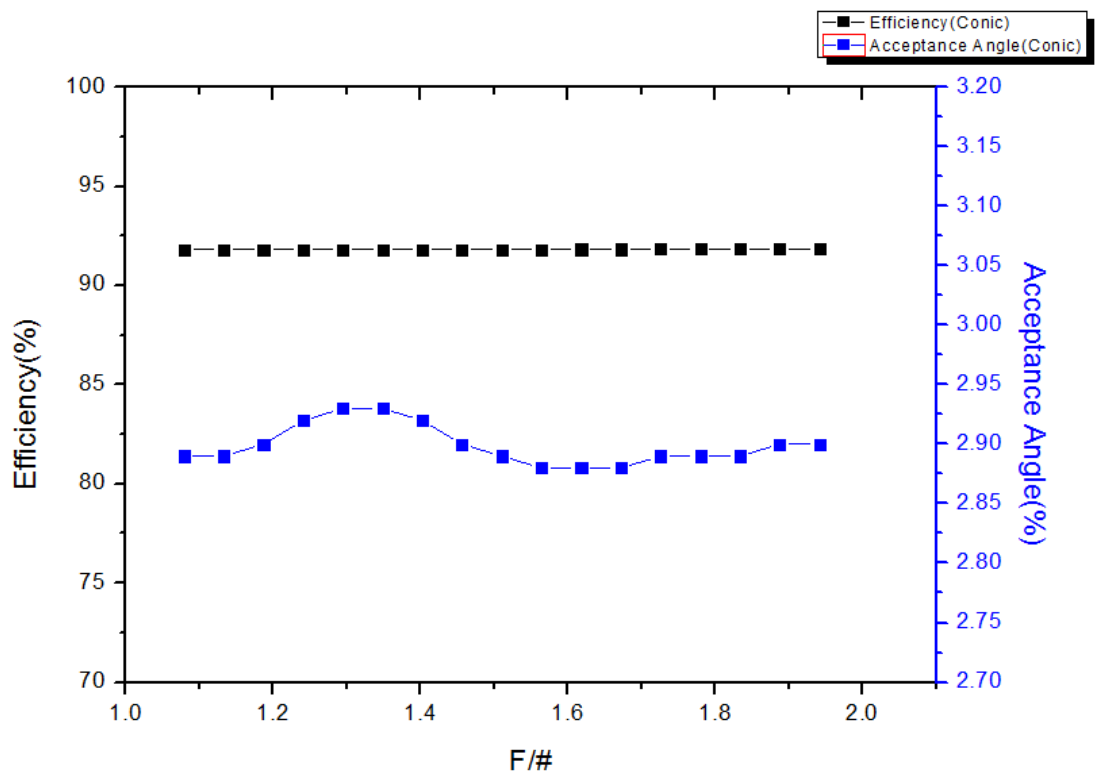


圖 13

| F/# | Efficiency (%) | Acceptance Angle(Degree) |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1.94 | 91.85 | 2.9 |
| 1.89 | 91.85 | 2.9 |
| 1.83 | 91.84 | 2.89 |
| 1.78 | 91.84 | 2.89 |
| 1.73 | 91.83 | 2.89 |

| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| 1.67 | 91.83 | 2.88 |
| 1.61 | 91.82 | 2.88 |
| 1.56 | 91.82 | 2.88 |
| 1.51 | 91.81 | 2.89 |
| 1.46 | 91.81 | 2.9 |
| 1.4 | 91.81 | 2.92 |
| 1.35 | 91.80 | 2.93 |
| 1.29 | 91.81 | 2.93 |
| 1.24 | 91.79 | 2.92 |
| 1.19 | 91.79 | 2.9 |
| 1.13 | 91.79 | 2.89 |
| 1.07 | 91.79 | 2.89 |

表格 2

(B) 4th order aspheric(Conic+4th Order)

當非球面做到 4 階的時候，從趨勢上來看，光學效率一樣也維持在 91.8% 左右，而可接受角會有一個高峰，如圖 14。如果從至少要達到 80% 的光學效率的前提下，

再從不同的 F/# 中挑選出最佳的可接受角的標準來看，可以選出在 F/#=1.29 的時候，可以達到 91.8% 的光學效率和 2.94° 的可接受角，為最佳解答，如表格 3

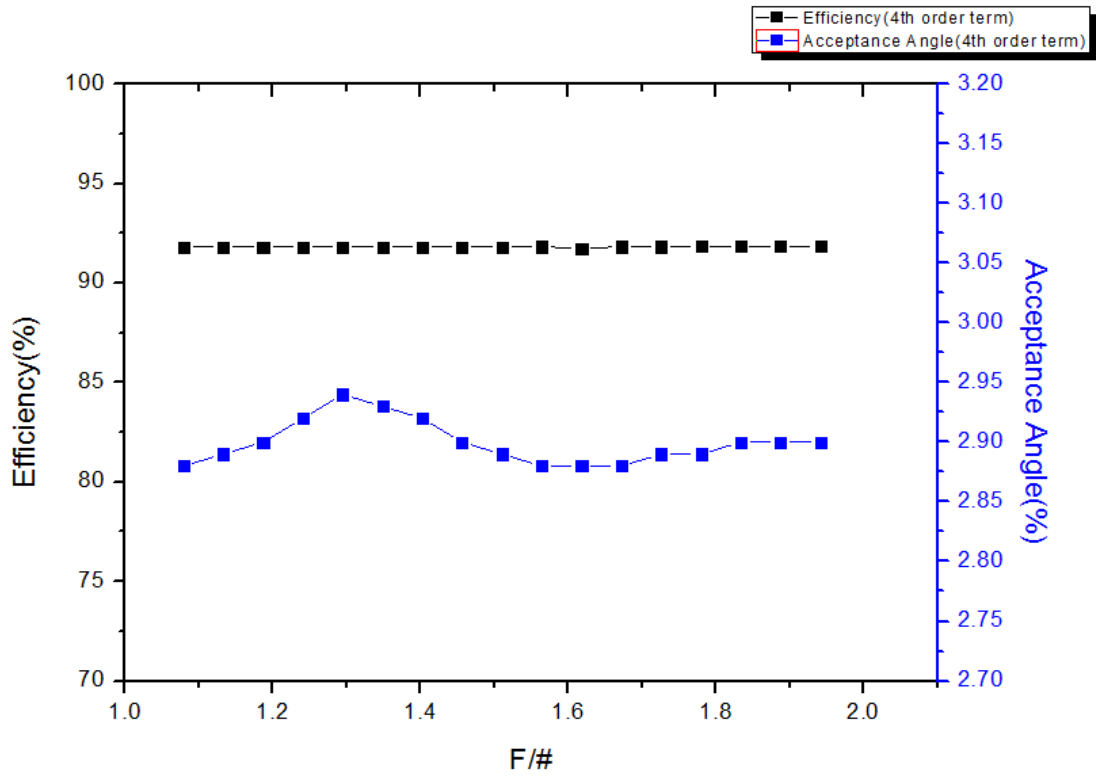


圖 14

| F/# | Efficiency (%) | Acceptance Angle(Degree) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1.94 | 91.83 | 2.9 |
| 1.89 | 91.83 | 2.9 |
| 1.83 | 91.83 | 2.9 |

| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| 1.78 | 91.83 | 2.89 |
| 1.73 | 91.83 | 2.89 |
| 1.67 | 91.83 | 2.88 |
| 1.61 | 91.74 | 2.88 |
| 1.56 | 91.82 | 2.88 |
| 1.51 | 91.82 | 2.89 |
| 1.46 | 91.81 | 2.9 |
| 1.4 | 91.81 | 2.92 |
| 1.35 | 91.80 | 2.93 |
| 1.29 | 91.80 | 2.94 |
| 1.24 | 91.80 | 2.92 |
| 1.19 | 91.80 | 2.9 |
| 1.13 | 91.79 | 2.89 |
| 1.07 | 91.79 | 2.88 |

表格 3

(C) 6th order aspheric(Conic+4th Order+6th Order)

當非球面做到 6 階的時候，從趨勢上來看，光學效率則是維持在 85.23% 到 87.94 之間，而可接受角在 $F/\#=1.4$ 的時候會有一個高峰，如圖 15。如果從至少要達到 80% 的光學效率的前提下，再從不同的 $F/\#$ 中挑選出最佳的可接受角的標準來看，可以選出在 $F/\#=1.4$ 的時候，可以達到 85.38% 的光學效率和 3.15° 的可接受角，為最佳解答，如表格 4，在可接受角上，明顯優於球面鏡在 $F/\#=1.78$ 的時候，有 3.03° 的可接受角。

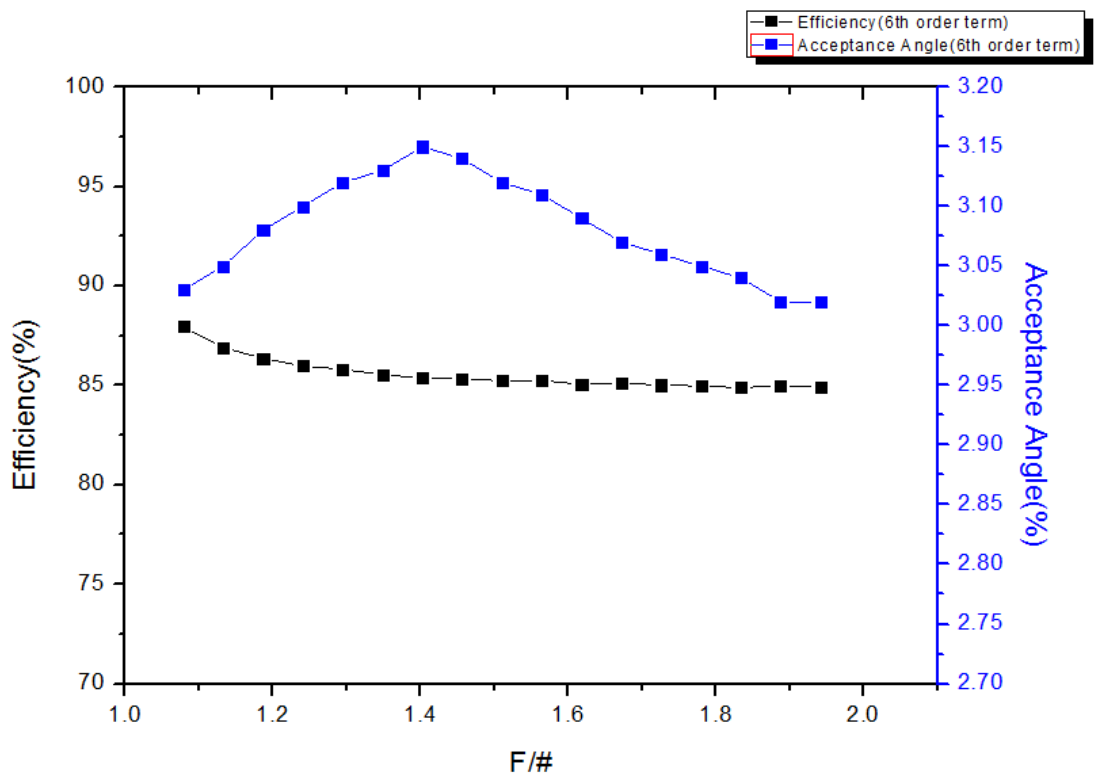


圖 15

| F/# | Efficiency (%) | Acceptance Angle(Degree) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1.94 | 84.92 | 3.02 |
| 1.89 | 84.98 | 3.02 |
| 1.83 | 84.89 | 3.04 |
| 1.78 | 84.98 | 3.05 |
| 1.73 | 85.02 | 3.06 |
| 1.67 | 85.12 | 3.07 |
| 1.61 | 85.06 | 3.09 |
| 1.56 | 85.24 | 3.11 |
| 1.51 | 85.23 | 3.12 |
| 1.46 | 85.34 | 3.14 |
| 1.4 | 85.38 | 3.15 |
| 1.35 | 85.53 | 3.13 |
| 1.29 | 85.81 | 3.12 |
| 1.24 | 85.98 | 3.1 |

| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| 1.19 | 86.36 | 3.08 |
| 1.13 | 86.90 | 3.05 |
| 1.07 | 87.94 | 3.03 |

表格 4

(D) 8th order aspheric(Conic+4th Order+6th Order+8th Order)

當非球面做到 8 階的時候，從趨勢上來看，光學效率則是維持在 84.89% 到 85.57 之間，如圖 16。如果從至少要達到 80% 的光學效率的前提下，再從不同的 F/# 中挑選出最佳的可接受角的標準來看，可以選出在 F/#=1.78 的時候，可以達到 85.57% 的光學效率和 3.13° 的可接受角，為最佳解答，如表格 5。

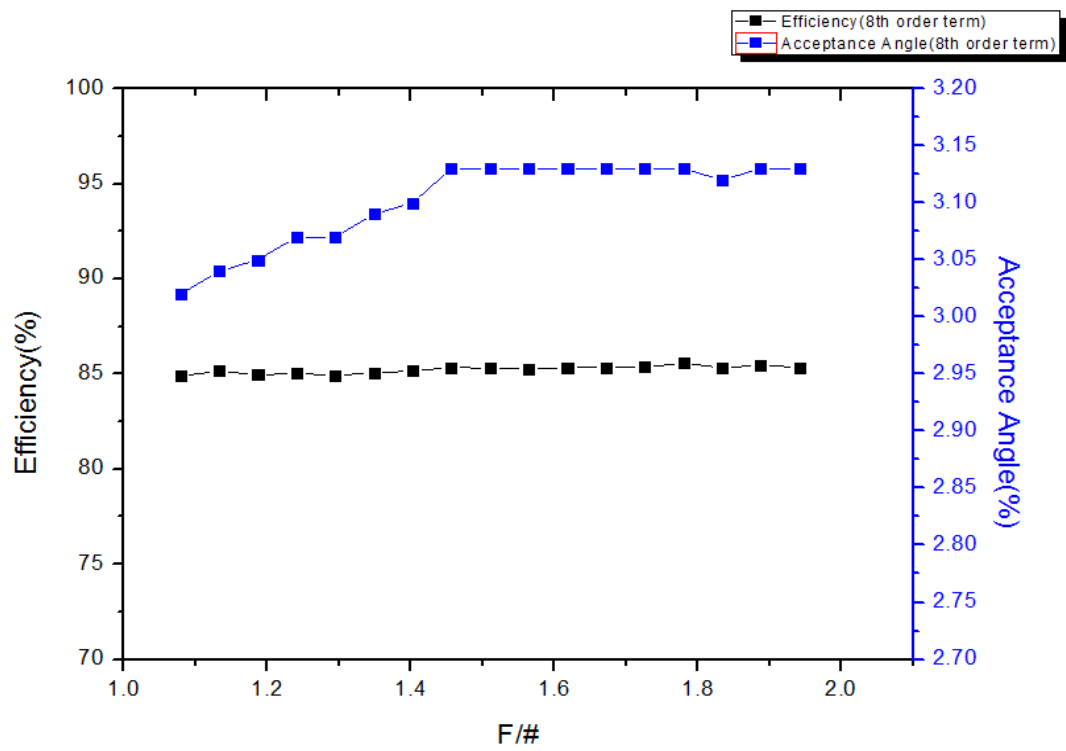


圖 16

| F/# | Efficiency (%) | Acceptance Angle(Degree) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1.94 | 85.35 | 3.13 |
| 1.89 | 85.46 | 3.13 |
| 1.83 | 85.34 | 3.12 |
| 1.78 | 85.57 | 3.13 |
| 1.73 | 85.36 | 3.13 |
| 1.67 | 85.34 | 3.13 |

| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| 1.61 | 85.33 | 3.13 |
| 1.56 | 85.28 | 3.13 |
| 1.51 | 85.33 | 3.13 |
| 1.46 | 85.33 | 3.13 |
| 1.4 | 85.16 | 3.1 |
| 1.35 | 85.05 | 3.09 |
| 1.29 | 84.94 | 3.07 |
| 1.24 | 85.03 | 3.07 |
| 1.19 | 84.96 | 3.05 |
| 1.13 | 85.16 | 3.04 |
| 1.07 | 84.89 | 3.02 |

表格 5

(E) 篩選和比較

為了顧及架構本身的效能，先從至少要達到 80% 的光學效率的前提下，再從不同的 F/# 中挑選出最佳的可接受角的標準來挑選，並分別比較各類型在光學效率和可接受角下的差異，如表格 6。

從表格 6 中的結果排出優劣順序，最佳解的型態為 6th order aspheric，在 F/#=1.4 時，可以達到 85.38% 的光學效率和 3.15° 的可接受角。次之是 8h order aspheric，在 F/#=1.78 時，可以達到 85.57% 的光學效率和 3.13° 的可接受角，再來是 Spheric，在 F/#=1.78 時，可以達到 87.23% 的光學效率和 3.03° 的可接受角，接著是 4h order aspheric，在 F/#=1.29 時，可以達到 91.8 的光學效率和 2.94° 的可接受角，最後是 Conic，在 F/#=1.29 時，可以達到 91.81% 的光學效率和 2.93° 的可接受角。

最後從中，選擇出 6th order aspheric 作為非球面的型態，從表格 5 中，也能發現非球面透鏡的可接受角和效率更優於球面透鏡。

| Type | F/# | Efficiency | Acceptance Angle |
|--------------------------------|------|------------|------------------|
| Spheric | 1.78 | 87.23 | 3.03 |
| Conic | 1.29 | 91.81 | 2.93 |
| 4 th order aspheric | 1.29 | 91.80 | 2.94 |
| 6 th order aspheric | 1.4 | 85.38 | 3.15 |
| 8 th order aspheric | 1.78 | 85.57 | 3.13 |

表格 6

三、設計大可接受角之二次光學元件

二次透鏡設計製作於太陽能電池之上，並於光學模擬軟體 LightTools 模擬，其目的為將不同入射角造成的焦距位移經自由曲面之貝茲曲線的設計，折射至太陽能電池晶片上，此外 0 度入射時亦可增加均勻度，以確保太陽光聚焦時的均勻度，防止熱點效應於太陽能電池晶片產生單位面電阻而減低發電效率。

(一)建立二次光學元件

1. 比較不同二次光學元件架構

(1)CAP

對於 CPV 光學常用的一種評價函數 concentration-acceptance product[10]，被定義為 $CAP = \sqrt{C_g} \sin \alpha$ ，其中 C_g 為聚光比， α 為可接受角(聚光器可以收集到 90% 軸上功率的入射角度)

(2) 不同二次光學元件的架構

針對不同二次光學元件的架構[11]，做比較和瞭解[12,13]，如圖 17，許多文獻都有在聚光器架構上，加入二次光學元件，去達到高均勻度與高可接受角，整體效能都會明顯優於單一聚光透鏡，因此為了達到大角度的收光之餘，並還要能維持足夠的光學效率的情況下，加入二次光學元件會是一個非常好的選擇、手段之一。

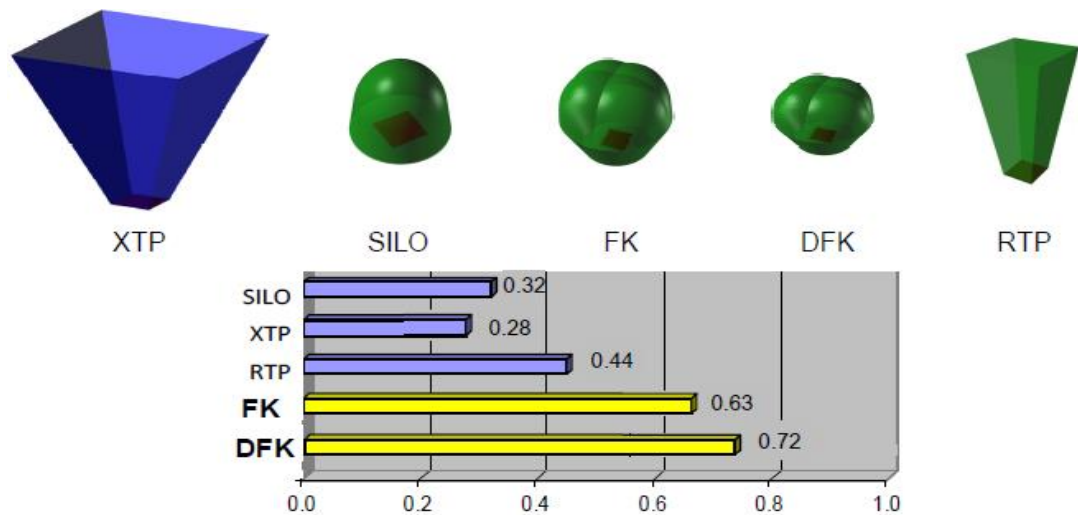


圖 17

圖 17 展示了兩種 Köhler 聚光器 (FK 和 DFK) 和其他傳統的基於菲涅耳的 CPV 替代品之間的對比。從上圖中，可以找到各自對應的二次光學元件。從左到右，我們可以找到：反射 (用光學設計中的 X 表示) 截頂金字塔 (XTP)、SILO、FK、DFK; 和折射截頂金字塔 (RTP)。在下面的部分中，顯示了五個聚光器的 CAP 值之間的比較，兩種 Köhler 聚光器 (FK 和 DFK) 都優於其他聚光器。固定入瞳面積(625cm²)和可接受角 ($\alpha = \pm 1^\circ$)，然後去瞭解 F/#、Cg 和 cell sizes 相應的變化，其中 F-RXI 的聚光比最大，RTP 的 F/#最小，如圖 18 的 POE 入瞳面積 (625 cm²) 和相同的可接受角 ($\alpha = \pm 1^\circ$)，它們的相應的太陽能電池，從中心原點處，向下移動。f/#值和聚光比在左圖。

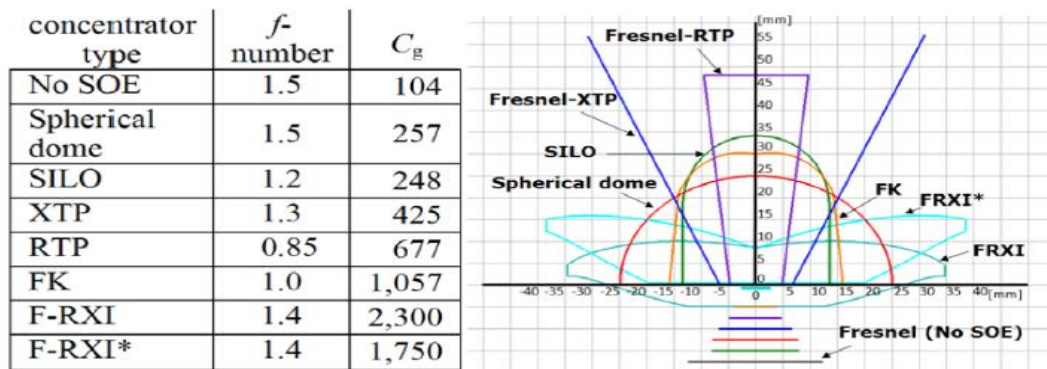


圖 18 比較聚光器的橫截面，所有這些聚光器都具有相同

(3) 選擇 SILO 做為本計畫之二次光學元件

圖 18，為不同種的二次光學元件，由於本計畫使用折射式，並且以比例尺來看，其他類型的二次光學元件體積更大、厚度更厚，更會造成光學效率上的問題，並考慮搭配於單一非球面透鏡，故從上述中選擇 SILO 做為本計畫的二次光學元件，並於光學模擬軟體 LightTools 模擬，其目的為將不同入射角造成的焦距位移經自由曲面之貝茲曲線的設計，折射至太陽能電池晶片上。

(二) 模擬和分析

1. 可接受角

核能所給予可接受角[3]的定義，是聚光器可以收集到 50% 軸上功率的入射角度。

2. 均勻度

顧名思義，均勻度代表光位於太陽能電池上，能量分部的均勻程度，為了學術上的探討，將其量化，我們所使用的均勻度定義如下：

$$U = \frac{C}{\sum(I_{n,m} - I_{avg})^2} \quad [14]$$

n, m = number of mesh , $C = 10^{18}$, $I_{n,m}$ is the intensity of the each mesh at the receiver , I_{avg} is the average intensity in all meshes , and C is constant .

3. 二次光學元件之設計

首先，先評估二次光學元件的厚度、光學效率、和均勻度之間的關係，在從中選出合適的厚度，並以此為前提下作設計，達到可接收入射角正負 7° 之標準，如圖 19、表格 7，我們可以從圖表當中，瞭解其中的趨勢，當二次光學元件的厚度增加，則其光學效率會減少，但均勻度會上升，因此我們從中選擇 trade-off 的點，作為厚度來當作我們設計的起始值進行自由曲面之優化，因此我們選擇厚度 5.5mm 為我們的設計架構。首先，在太陽光正向入射情況下，我們根據邊緣光線理論去優化單一聚光透鏡(POE)之邊緣光線[15]去設計二次光學元件，確保能量全部傳遞到太陽能電池上沒有損失。接下來考慮均勻度去調整二次光學元件之自由曲面。最後考慮可接受角去設計出完整二次光學元件。圖 20 為厚度 5.5mm

時，太陽能電池上的能量分布。

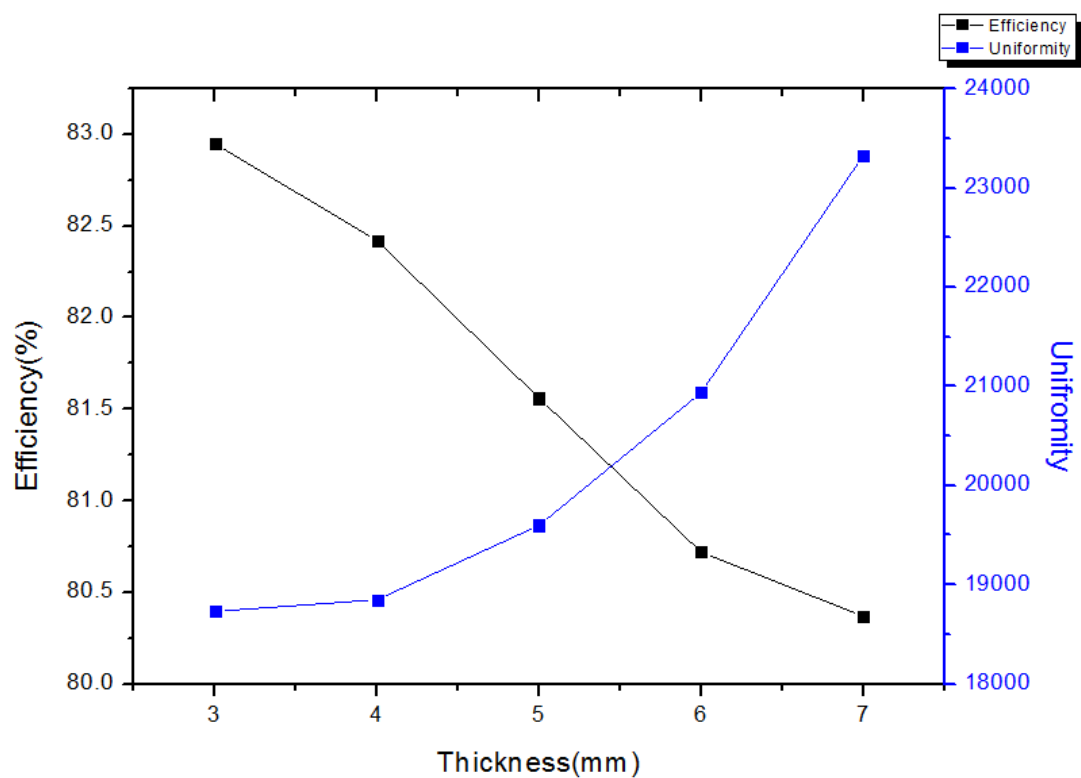


圖 19

| Thickness (mm) | Efficiency (%) | Uniformity |
|-------------------|-------------------|------------|
| 3 | 82.95 | 18730 |
| 4 | 82.42 | 18848 |
| 5 | 81.56 | 19601 |
| 6 | 80.72 | 20937 |
| 7 | 80.37 | 23326 |

表格 7

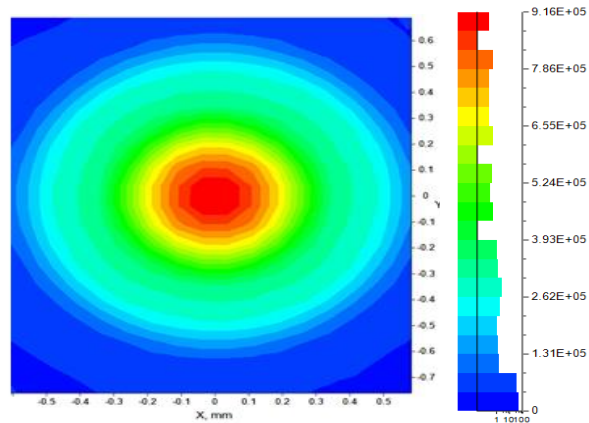


圖 20

在設計過程中，我們使用 LightTools 裡面 Analysis 中 Ray Path，用來分析其光線的走向和能量的收集，例如圖 21、圖 22。由圖 21、圖 22 可得知，主要收集於太陽能電池上的光線，和沒有收集到太陽能電池上的光線的分布情形，和能量的比例，以此圖為例，在厚度 5.5mm 時，太陽能電池接收到紅色線的光，其光學效率為 80.74%，從 Power 比例上來算，可以計算能量流失為藍色線的光約為 3.36% 的能量 ($80.74\% * 0.00015873 / 0.0038094 = 3.36\%$)，則其餘能量因為微乎其微，所以可以忽略不計。

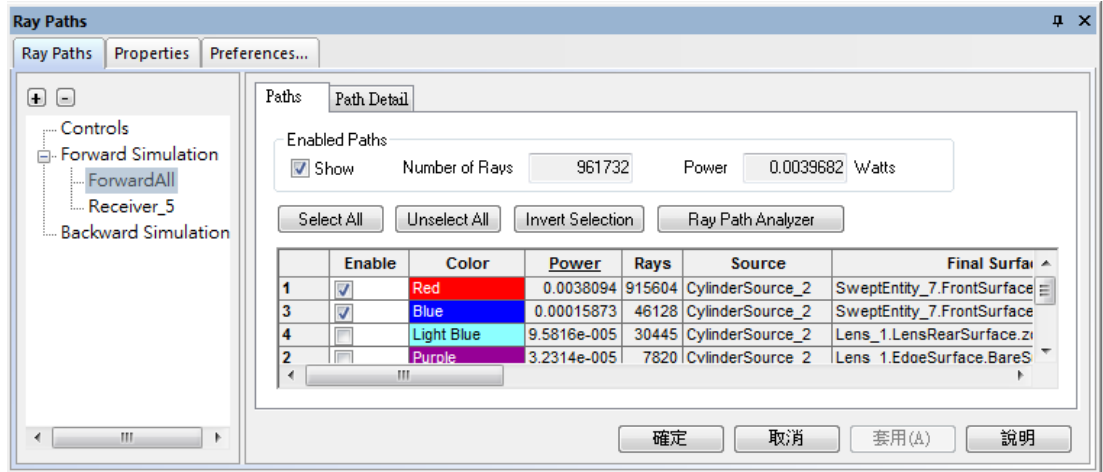


圖 21

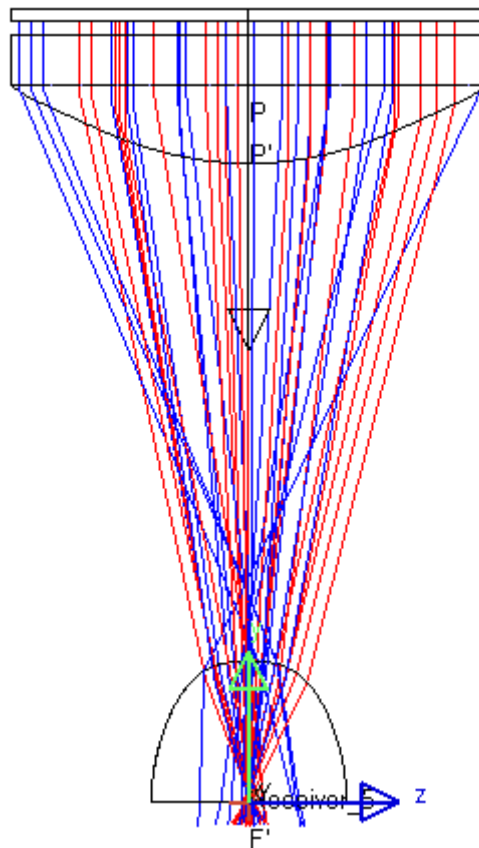


圖 22

為了分析二次光學元件的物理特性，我們做了兩張圖表，
圖十一為在入射光為 0 度的狀況下，比重(Weight)對應到的

效率(Efficiency)和均勻度(Uniformity)，比重為表面彎曲的程度，圖 23 為在入射光為 0 度的狀況下，比重(Weight)對應到的均勻度(Uniformity)和可接受角(Acceptance angle)。

從圖 23 和表格 8 中，分析其趨勢，我們可得知當比重從 0.1 上升到 0.8 時，光學效率和均勻度都會降低，但是對於光學效率的影響並不會太大(從 62.06%降低到 61.21%)，則物理意義就是當二次光學元件表面的彎曲程度越大，則會造成均勻度上越小，而效率會些微的降低。而當比重(Weight)>0.8 時，則會因為彎曲程度太大造成變形，使其趨勢改變。

從圖 24 和表格 9 中，分析其趨勢，我們可得知當比重從 0.1 上升到 0.75 時，均勻度會降低，而可接受角會提升，則物理意義就是當二次光學元件表面的彎曲程度越大，雖然會造成均勻度上的減少，但是更有能力收集較大角度的光線，如圖 25、圖 26。而當比重(Weight)>0.75 時，則會因為彎曲程度太大造成變形，使其趨勢改變。

為了應證我們的論點，我們引用其他 Paper 的內容來相互呼應[16][17]，如圖 27，從圖中比較 Dome A 和 Dome B，比重(Weight)較小的 Dome A，光學效率和 Dome B 持平，但是可接受角相對較小，而能量分布明顯比 Dome B 更為均

勻，如圖 28 能量分布圖。

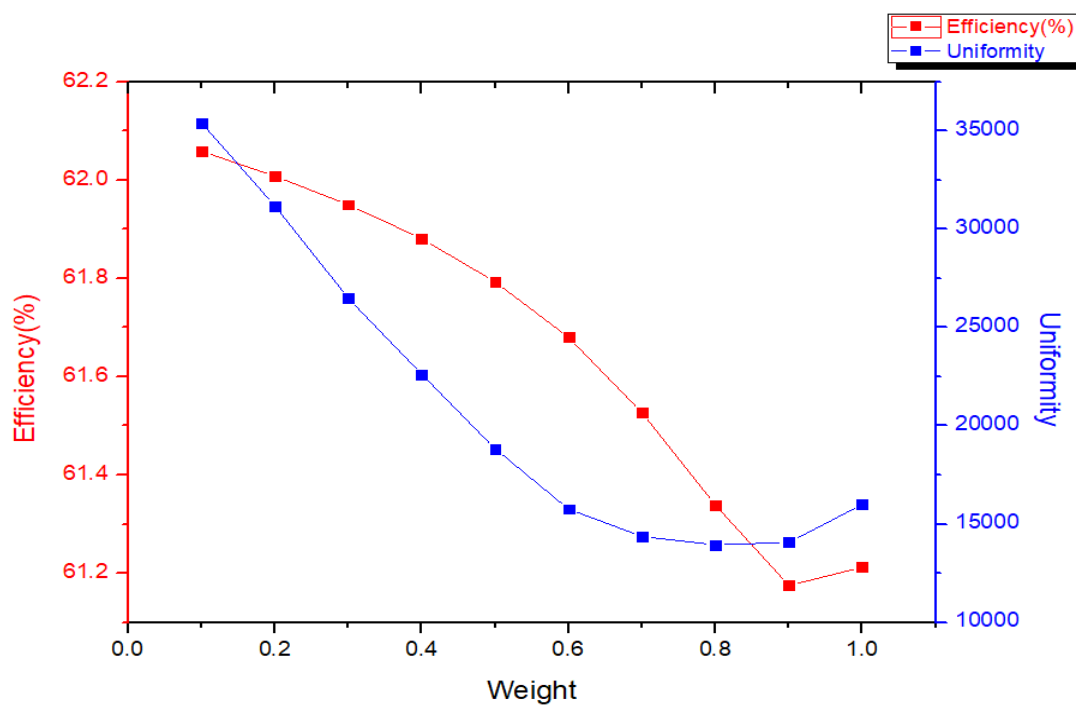


圖 23

| Weight | Efficiency | Uniformity |
|--------|------------|------------|
| 0.1 | 62.059 | 35411.64 |
| 0.2 | 62.008 | 31186.61 |
| 0.3 | 61.95 | 26483.51 |
| 0.4 | 61.881 | 22612.54 |
| 0.5 | 61.793 | 18830.31 |
| 0.6 | 61.68 | 15765.11 |
| 0.7 | 61.527 | 14367.27 |
| 0.8 | 61.339 | 13939.28 |
| 0.9 | 61.175 | 14067.42 |
| 1 | 61.212 | 15998.53 |

表格 8

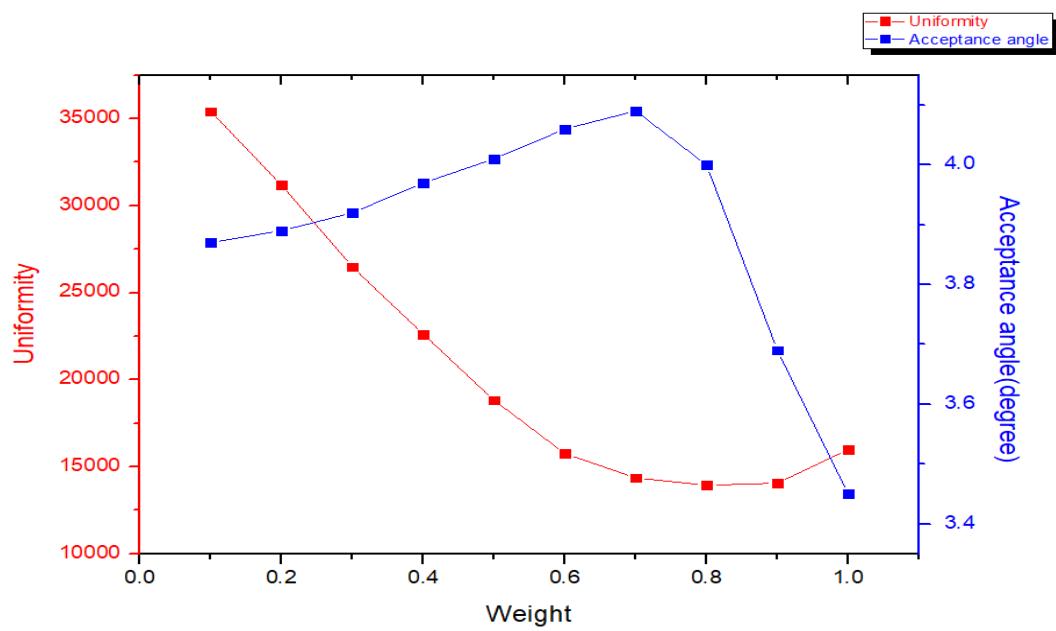


圖 24

| Weight | Acceptance angle | Uniformity |
|--------|------------------|------------|
| 0.1 | 3.87 | 35411.64 |
| 0.2 | 3.89 | 31186.61 |
| 0.3 | 3.92 | 26483.51 |
| 0.4 | 3.97 | 22612.54 |
| 0.5 | 4.01 | 18830.31 |
| 0.6 | 4.06 | 15765.11 |
| 0.7 | 4.09 | 14367.27 |
| 0.8 | 4 | 13939.28 |
| 0.9 | 3.69 | 14067.42 |
| 1 | 3.45 | 15998.53 |

表格 9

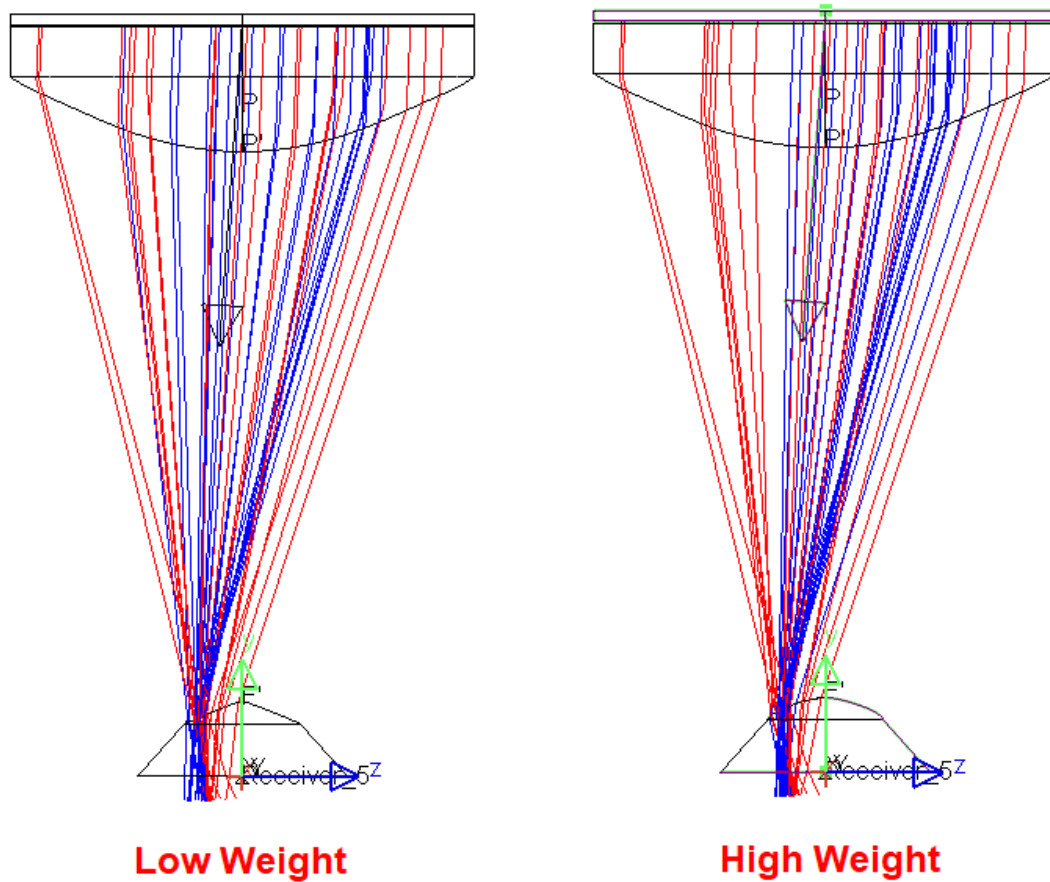


圖 25

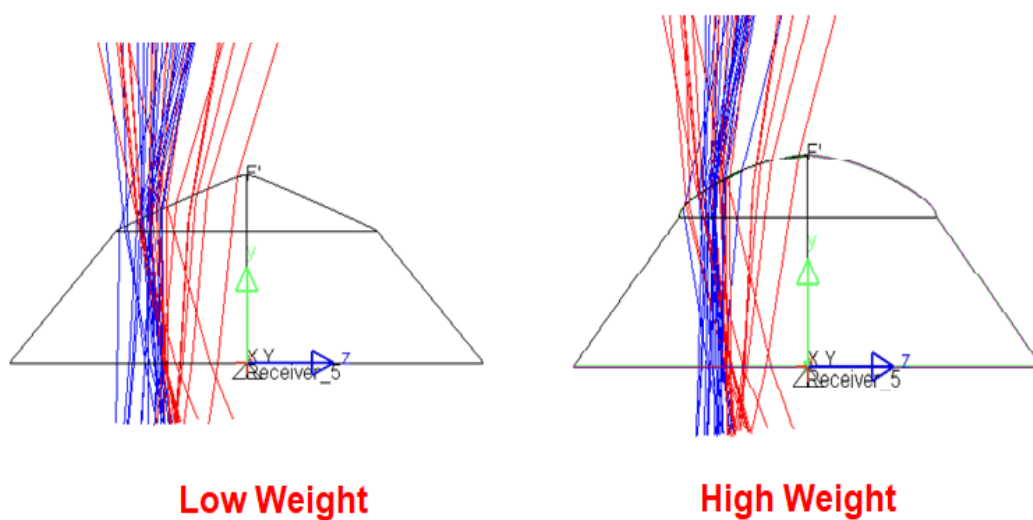


圖 26

| SOE | Optical Efficiency | $\theta_{90\%}$ | $\theta_{80\%}$ |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Without SOE | 0.80 | ± 0.42 | ± 0.56 |
| Reflexive Truncated Cone | 0.89 | ± 0.52 | ± 0.66 |
| Reflexive Truncated Pyramid | 0.88 | ± 0.52 | ± 0.69 |
| CPC | 0.87 | ± 1.40 | ± 1.60 |
| Dome A | 0.86 | ± 0.58 | ± 0.74 |
| Dome B | 0.86 | ± 0.94 | ± 1.14 |

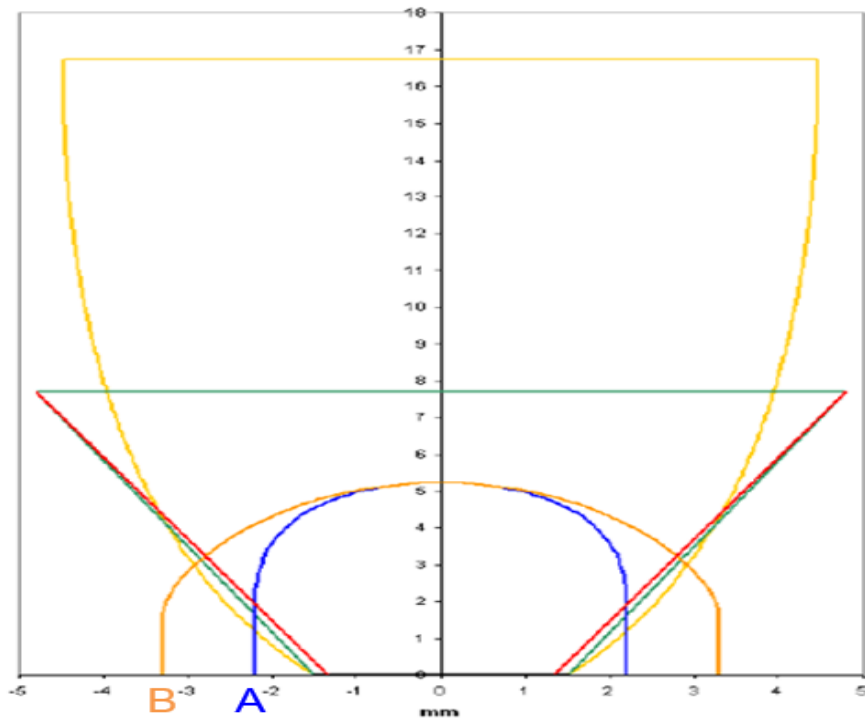


圖 27

Dome A

Dome B

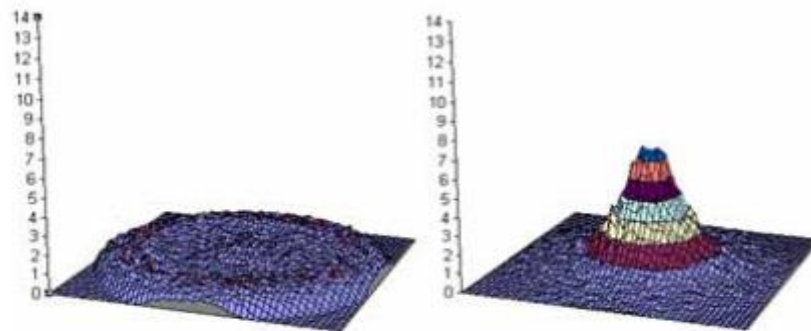


圖 28

4. 結果

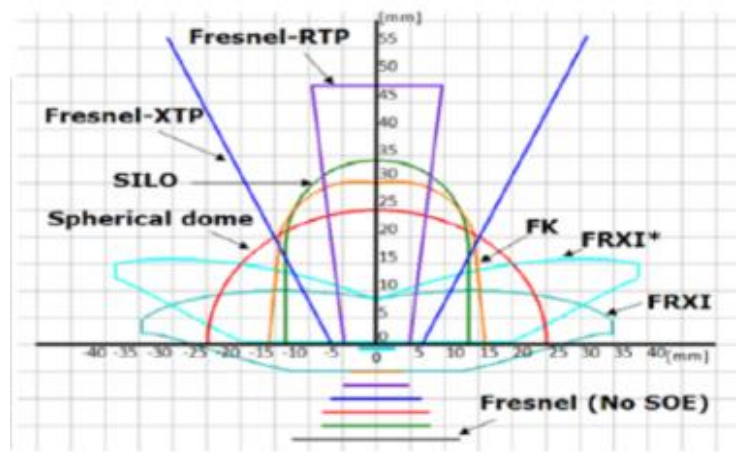
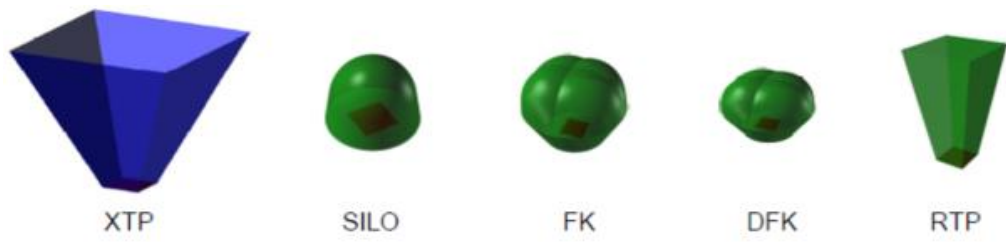


圖 18

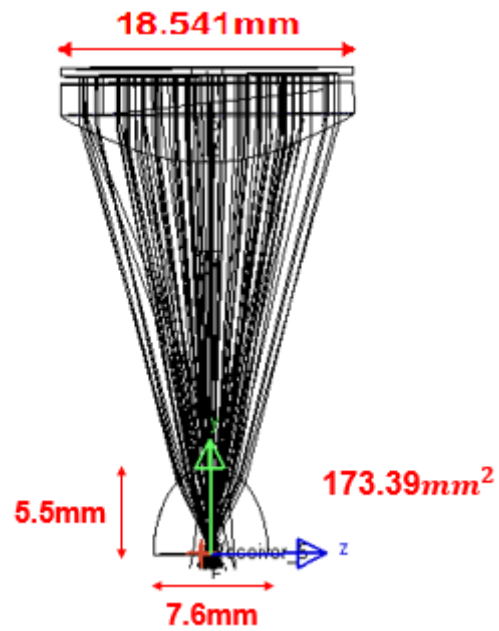


圖 29

| Efficiency (%) | Acceptance Angle (Degree) | Volume (mm^2) |
|-------------------|------------------------------|----------------------|
| 80.73 | 7.00 | 173.39 |

表格 10

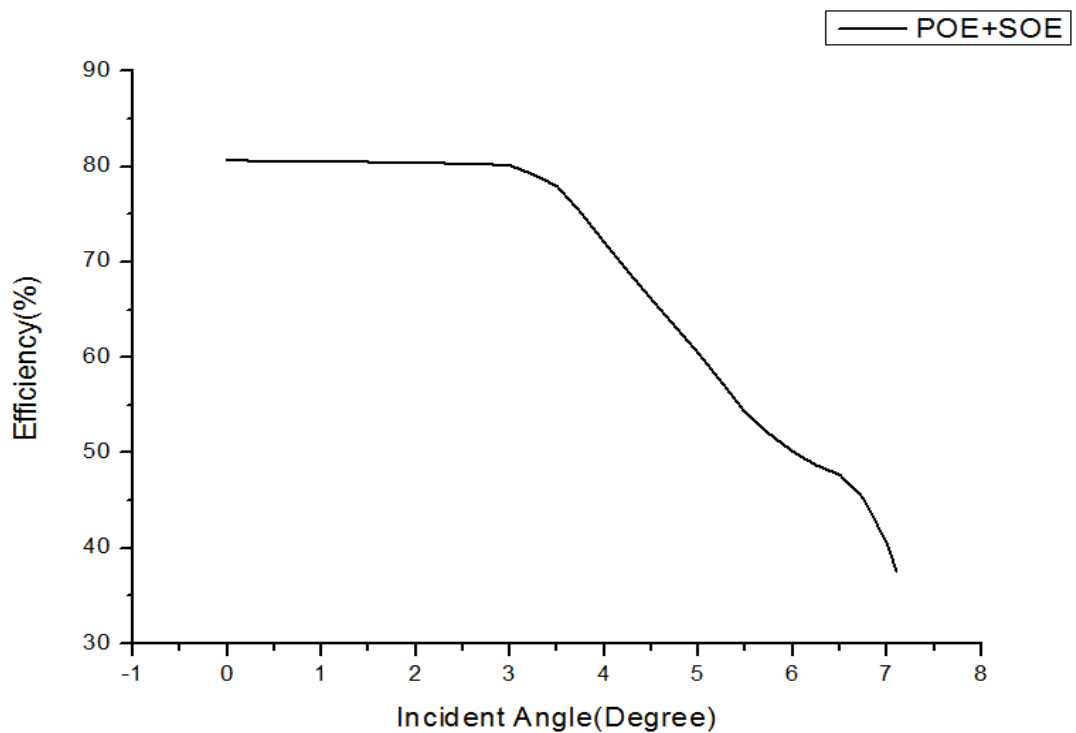


圖 30

圖 18 為不同種的二次光學元件，由於本計畫使用折射式，並且以比例尺來看，其他類型的二次光學元件體積更大、厚度更厚，更會造成光學效率上的問題，故使用 SILO 的二次光學元件為基礎下做設計。

我們從圖 19，二次光學元件之厚度對應光學效率(Efficiency)和均勻度(Uniformity)之中的 Tradeoff 點 5.5mm 做設計的起始值，

然後再厚度較小的情況下，由於像差 COMA 的效應下，無法達到可接收入射角正負 7° 之標準，故漸漸將二次光學元件厚度加厚，最後設計出 5.5mm

最終設計結果規格如下，厚度為 5.5mm 的二次光學元件(如圖 29)，體積為 173.39mm^2 ，光學效率為 80.73%，可接受角能達到 7° ，剛好達成本計畫可接收入射角正負 7° 之標準，其入射角之於光學效率的影響，隨著入射角越高，相對的光學效率就會降低，如圖 30。

四、驗證量測:

將設計好的光學元件，尋找廠商加工出成品，如圖 31、32(圖 31 為主要光學元件 POE，為了配合機構上的需要，故最外圍多了 1mm 的區域方便夾取)，並至東海大學實驗室裡的太陽光模擬器中時計測量，如圖 33，並使用核能所提供的太陽能電池，做為量測，如圖 34、圖 35，分別為 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 的裸晶太陽能電池和以陶瓷做為基板並打好線的 $5.5\text{mm}\times 5.5\text{mm}$ 和 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 太陽能電池，圖 34 為 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 、 $5.5\text{mm}\times 5.5\text{mm}$ 和 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 之太陽能電池及其極性圖(圖 35)。



圖 31



圖 32

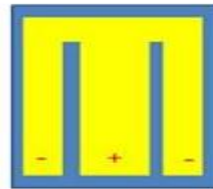


圖 33



圖 34

10x10cell 的約23.5mm*34.5mm，厚0.42mm(極性如圖)



5.5x5.5cell 的約15mm*25mm，厚0.42mm(極性如圖)



圖 35

(一)實驗過程

在實驗過程中，我們只有測量 3mmx3mm 和 10mmx10mm 的太陽能電池，且因為成本上的考量，在非球面透鏡和二次光學元件並無鍍膜，故穿透率可能會不佳，故在實際的光學效率測量上，無法對應到軟體設計之結果。由於 5.5mmx5.5mm 的太陽能電池，在陶瓷基板上周圍的膠膜，使得二次光學元件無法貼平於太陽能電池上，故只使用 3mmx3mm 和 10mmx10mm 的太陽能電池做為量測。在機構上，我們有用現有的工具，做為量測上的準直和轉動，如圖 36，也有實際用軟體去設計出合適的機構，如圖 37。

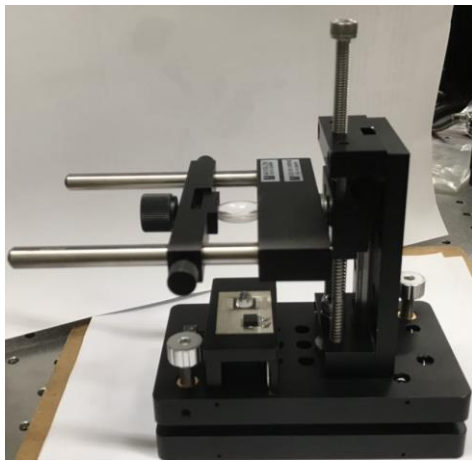


圖 36

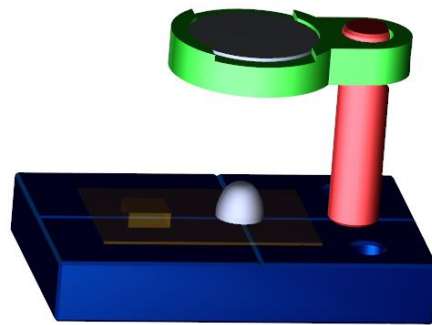


圖 37

實驗過程如圖 38、39，在 3mmx3mm 太陽能電池的實際量測上，由於 3mmx3mm 的太陽能電池為裸晶的狀況，故還要用顯微鏡去下針，在可接受角的測量上，會造成很多不便和

困難，故其值必存在著誤差。

在 10mmx10mm 的太陽能電池的實際量測上，由於我們當初的設計，是設計在 3mmx3mm 的太陽能電池的情況下，因此我們在不一樣大小的太陽能電池上，沒辦法去測量和檢驗可接受角，並且在效率的測量上，會因為太陽能電池的大小差異，使得太陽能電池會有熱點效應，導致影響 fill factor，使得太陽能電池的轉換效率變得很差，且無法評估。

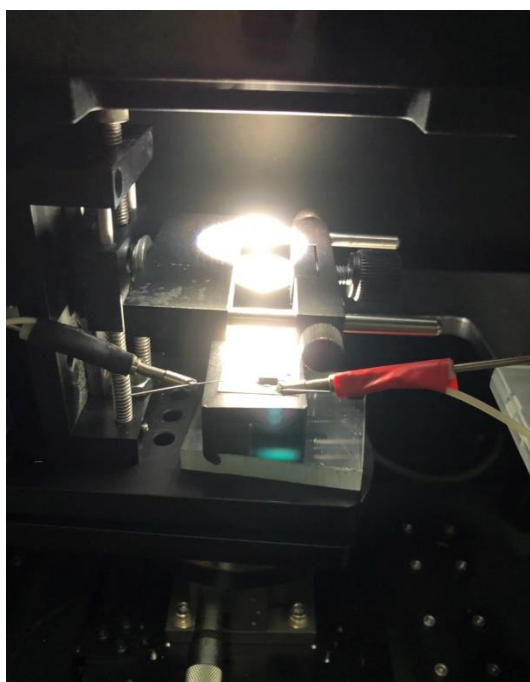


圖 38

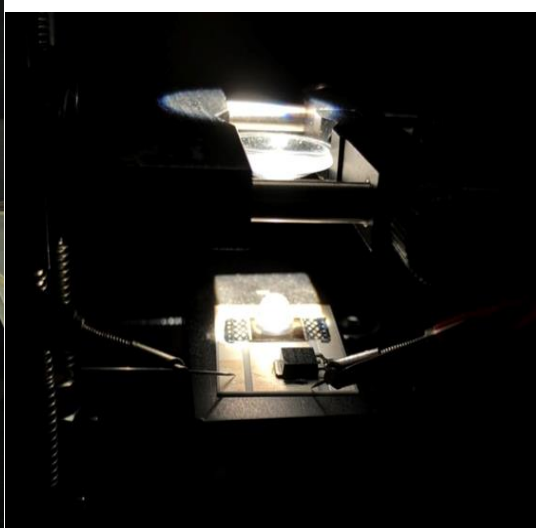


圖 39

(二) 實驗結果

1. 3mmx3mm 太陽能電池之測量

3mmx3mm 的太陽能電池實際測量結果如表格 11 和表格 12，表格 11 的 without POE+SOE 為沒有加非球面透鏡和二次

光學元件下的量測值，而 POE+SOE 則是在有加非球面透鏡和二次光學元件下的量測值。而表格 12 則是在有加非球面透鏡和二次光學元件的情況下，去量測光線角度造成光學效率的影響(如圖 40)，去測量其可接受角有沒有確實大於 7° ，在相同光源下，量測電流會固定在 0.06mA ，其他測量值也是如此。

如表格 11，在入射角 0° 的狀況下輸出是 2.59，而在入射角 7° 的狀況下輸出是 1.71，根據核能所給予的可接受角定義(可以收集到 50% 軸上功率的入射角度)，在入射角 7° 的狀況下，仍達到軸上功率的 50% 以上($1.71 > 1.295$)，代表著我們的設計，確實是能達到可接受角 7° 以上。

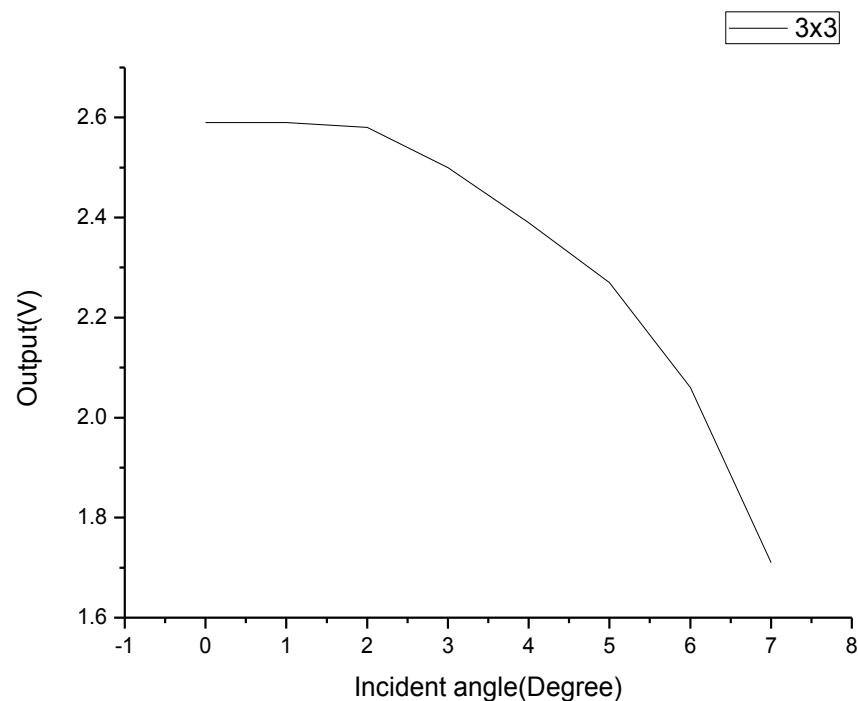


圖 40

| | Output(V) |
|-----------------|-----------|
| Without POE+SOE | 2.49 |
| POE+SOE | 2.59 |

表格 11

| Incident angle(Degree) | Output(V) |
|------------------------|-----------|
| 0 | 2.59 |
| 1 | 2.59 |
| 2 | 2.58 |
| 3 | 2.5 |
| 4 | 2.39 |
| 5 | 2.27 |
| 6 | 2.06 |
| 7 | 1.71 |

表格 12

2. 10mmx10mm 太陽能電池之測量

3mmx3mm 的太陽能電池實際測量結果如表格 13 和表

格 14，表格 13 的 without POE+SOE 為沒有加非球面透鏡和二次光學元件下的量測值，而 POE+SOE 則是在有加非球面透鏡和二次光學元件下的量測值。

表格 14 則是在沒有加非球面透鏡和二次光學元件下的量測值，Area ratio 則是剩餘的面積比例，例如 Area ratio=0.8，則是遮住太陽能電池面積的 2 成，只有 8 成的太陽能電池面積有照光，透過這種方式將部分面積逐漸遮住，使照光的面積越來越少，透過結果來計算和討論 fill factor 對太陽能電池所帶來的影響，如表格 15。

從表格 15 中，實際上我們只有量測 area ratio 從 1~0.2，area ratio=0.09 的 fill factor 則是透過用 area ratio=1~0.2 的結果中，找出符合的方程式去預估的，如表格 16 和圖 41，當照光的面積越來越小，我們可以發現 fill factor(FF)會變得越來越小，當 Area ratio 從 1 到 0.2，則 fill factor 從 0.85 掉到 0.009，轉換效率也從 28.8% 降到 0.301%，所以當我們用 10mmx10mm 的太陽能電池做測量的時候，必定會受到 fill factor 很大的影響，故轉換效率變得很差且無法預期，透過這種方式，也可以瞭解到，均勻度對於太陽能電池和轉換效率上，影響非常大。

| | Output(V) |
|-----------------|-----------|
| Without POE+SOE | 2.53 |
| POE+SOE | 2.586 |

表格 13

| | Area ratio | Voc |
|--------------------|------------|-------|
| Without POE+SOE | 1 | 2.53 |
| | 0.8 | 2.52 |
| | 0.5 | 2.47 |
| | 0.2 | 2.39 |
| | 0.09 | 2.52 |
| POE+SOE | 0.09 | 2.586 |

表格 14

| | Area ratio | Voc | Jsc | Pm | Pin | FF | EFF(%) |
|--------------------|------------|-------|--------|--------|--------|----------|--------|
| Without POE+SOE | 1 | 2.53 | 0.06 | 0.1295 | 0.4526 | 0.858717 | 28.8 |
| | 0.8 | 2.52 | 0.048 | 0.1295 | 0.3621 | 0.548148 | 18.311 |
| | 0.5 | 2.47 | 0.03 | 0.1295 | 0.2263 | 0.218455 | 7.153 |
| | 0.2 | 2.39 | 0.012 | 0.1295 | 0.0905 | 0.036123 | 1.144 |
| | 0.09 | 2.52 | 0.0054 | 0.1295 | 0.0407 | 0.00902 | 0.301 |
| POE+SOE | 0.09 | 2.586 | 0.0054 | 0.1295 | 1.222 | 0.00902 | 0.114 |

表格 15

| FF Curve | $y = \text{Intercept} + B1 \cdot x + B2 \cdot x^2$ |
|-----------|--|
| Intercept | 0.00176 |
| B1 | 0.00402 |
| B2 | 0.85198 |

表格 16

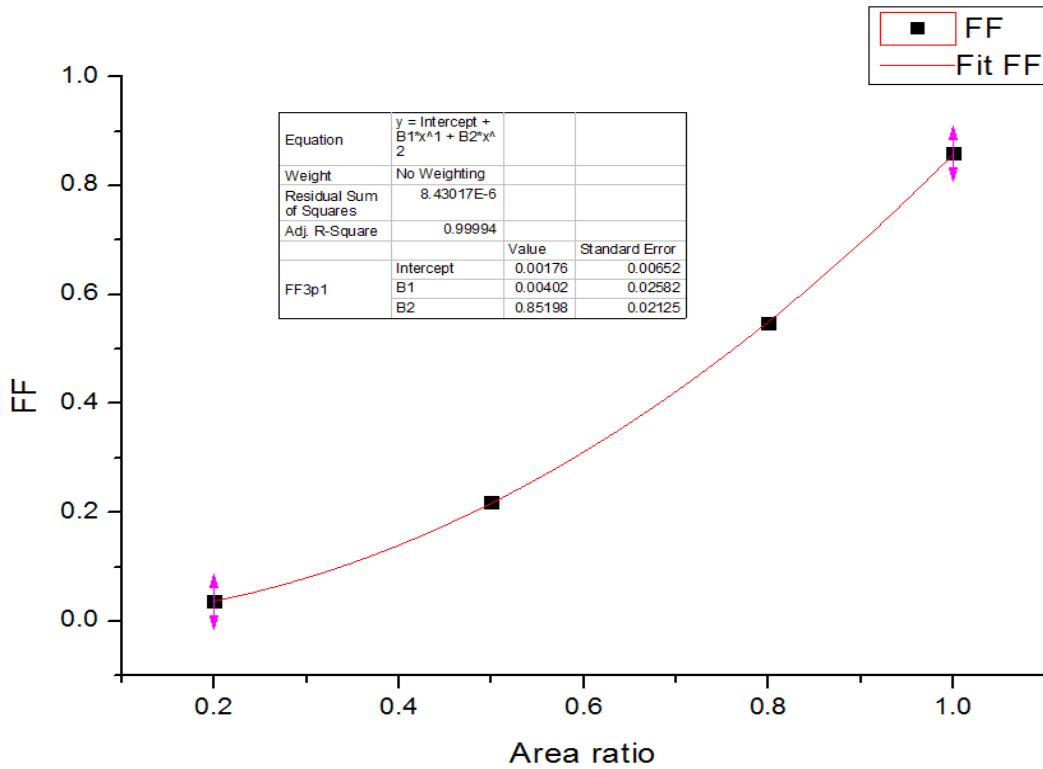


圖 41

五.容忍度公差分析

我們主要是透過LightTools去做太陽能電池模組組裝的公差分析，計算其組裝公差容忍度，與整體性能表現。此公差分析是使用LightTools中的Tolerancing，然後選擇裡面的蒙地卡羅分析Monte Carlo Results，做100個取樣點，參數是主要光學元件(POE)和二次光學元件(SOE)的Decenter和Tilt，如表格17，來模擬組

裝上的公差，如圖 42 所示，最後模擬出來的結果，如圖 43，x 軸是取樣點，總共有 100 個取樣點，而 y 軸則是隨機取樣後，計算出來的光學效率差異量，由此可知，組裝上的公差對光學效率的影響是在 1.3% 以內，從結果上來看，組裝上的公差，對效率並不會造成太大的影響，如圖 44，則是組裝上的公差對於均勻度的影響，x 軸是取樣點，總共有 100 個取樣點，而 y 軸則是隨機取樣後，計算出標準差(Standard Deviation)，再將標準差透過均勻度公式(在設計大可接受角之二次光學元件的部分裡的模擬與分析)換算成均勻度和均勻度差異量，差異量為負值意思是相較於原本的均勻度，變差多少百分比的意思，並非均勻度為負值，而當標準差越小，則表示接收面上彼此之間的能量越相近、能量分佈越平均，故標準差越小，就代表均勻度越高，換算出來的均勻度數值也會越高，從圖 44 的結果來看，組裝上的公差對於均勻度的影響，大約是落在 6.3% 到 -9.8% 之間。

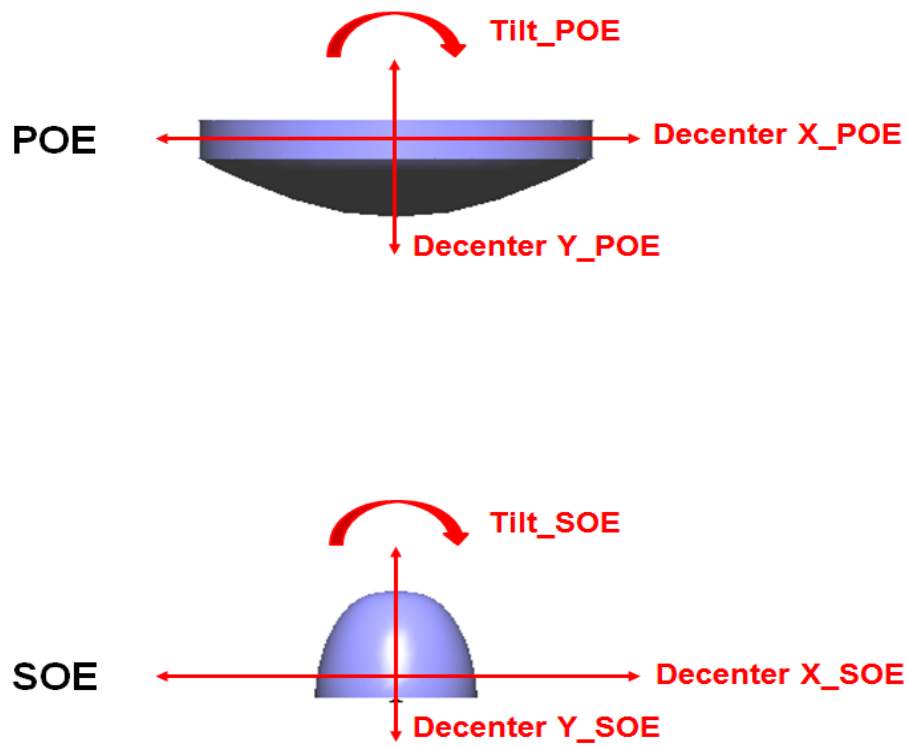


圖 42

| Parameters | Tolerance range |
|----------------|---------------------|
| Decenter X_POE | $\pm 0.01\text{mm}$ |
| Decenter Y_POE | $\pm 0.3\text{mm}$ |
| Tilt_POE | $\pm 0.01^\circ$ |
| Decenter X_SOE | $\pm 0.01\text{mm}$ |
| Decenter Y_SOE | $\pm 0.01\text{mm}$ |
| Tilt_SOE | $\pm 0.01^\circ$ |

表格 17

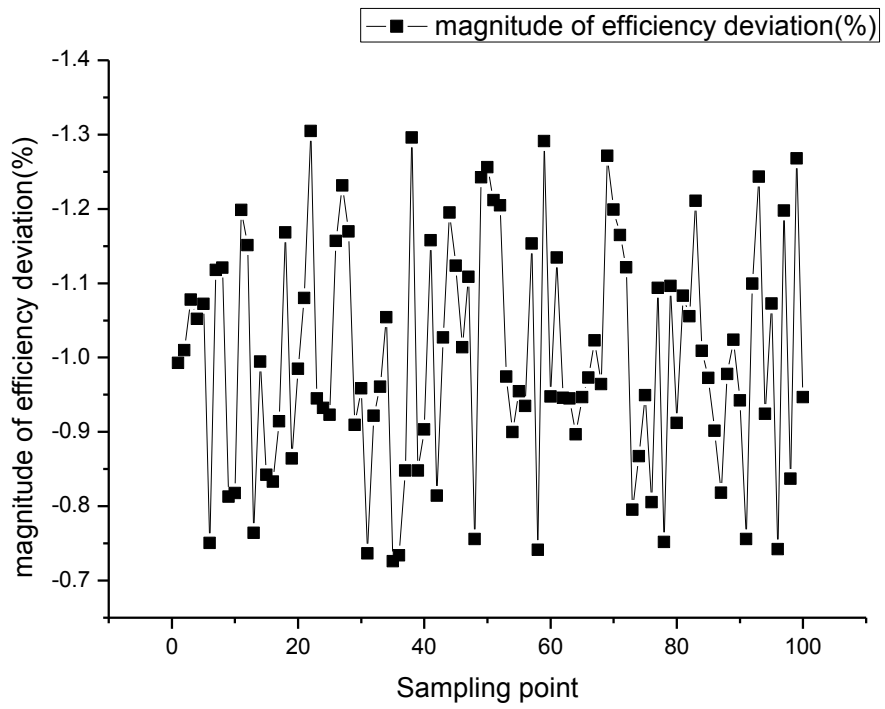


圖 43

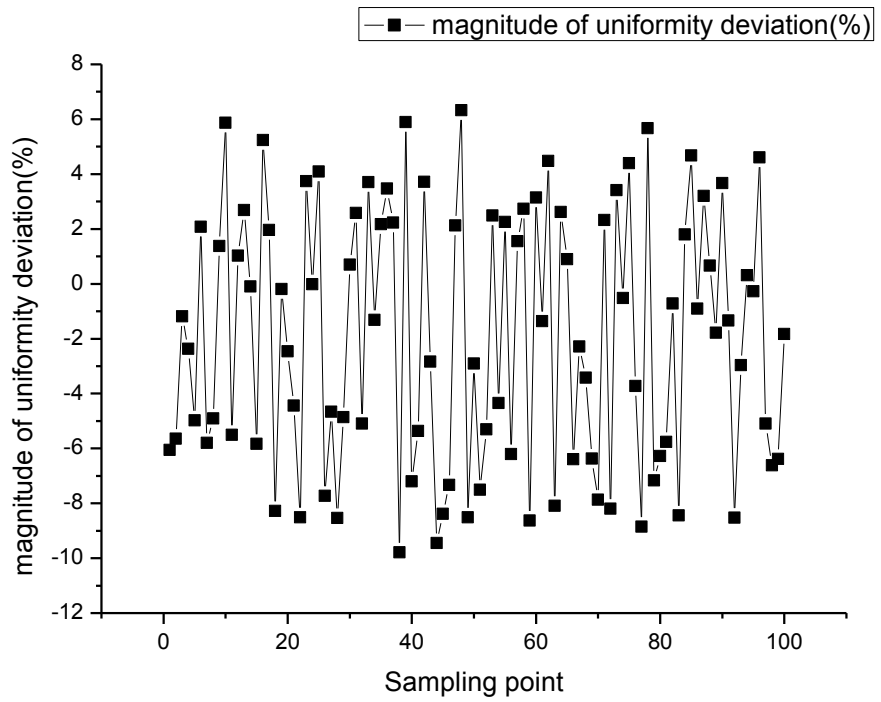


圖 44

參、主要發現與結論

透過光學軟體 Zemax 和 LightTools 的搭配下，成功設計和優化出，達到可接受角 7° 的太陽能聚光鏡，完成本計畫的最終目的，從我們驗證測量的實驗過程部分中，也證明了，此設計確實能達到 7° 的可接受角，但有礙於一些實驗上的困難和光學元件的成本問題(無光學鍍膜)，因此無法得到準確、較好的光學效率，但仍並不影響可接受角的計算和測量。

相對地，為了追求大角度的可接受角，必定會犧牲了均勻度，從我們驗證測量的實驗過程部分中，透過逐漸減少 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 太陽能電池的照光面積，藉此來計算 fill factor 和太陽能電池的轉換效率，從結果可以發現當照光的面積比例越小，則會有較小的 fill factor，導致太陽能電池的轉換效率越差，其物理意義就是均勻度對於 fill factor 和太陽能電池轉換效率上，有著舉足輕重的影響，因此在達到高的光學效率之餘，也需要有足夠的均勻度，太陽能電池才能提供好的轉換效率，否則均勻度不佳導致轉換效率太差，太陽光最終也無法有效地轉換成電力。

肆、參考文獻

- [1] Reference Solar Spectral Irradiance:Air Mass 1.5 ,
Website <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/aml.5/>
- [2] Guter W, Schone J, Philipps S P, Steiner M, Siefer G,
Wekkeli A, Welser E, Oliva E, Bett A W and Dimroth F 2009
Current-matched triple junction solar cell reaching 41.1%
conversion efficiency under contrated sunlight Appl.
Phys. Lett. 94 223504
- [3] Kinsey G S, Sherif R A, Pien P, Hebert P, King R R
and Aldrich D 2008 Towards commercialization of
concentrator multijunction photovolataic modules Proc.
33rd IEEE PVSC
- [4] R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez, Nonimaging
optics, (Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2005)
- [5] Geary J M 2002 Aberrations in general Introduction to
Lens Design with Zemax Example (Richmond: Willmann-Bell)
p 68 - 70
- [6] Warren J. Smith, “Modern Optical Engineering ” ,
p. 71-p.101, (4th ed. McGraw-Hill, 2007)
- [7] Joseph M. Geary, “introduction to lens design” ,

p. 87, (Willmann-Bell, 2002)

[8] C.-C. Kuo, Z.-Y. Lin “Rapid manufacturing of plastic aspheric optical lens”

[9] All About Aspheric Lenses. Website

<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/all-about-aspheric-lenses/>

[10] P. Benitez and J. C. Miñano, “Concentrator Optics for the next generation photovoltaics” . in Next Generation Photovoltaics: High Efficiency through Full Spectrum Utilization, A. Marti, A. Luque, ed. (Taylor & Francis, CRC Press, London, 2004)

[11] P. Zamora, P. Benítez, L. Yang, J. C. Miñano, J. Mendes-Lopes, and K. Araki, “Photovoltaic performance of the dome-shaped Fresnel-Köhler concentrator,” Proc. SPIE 8468(84680D), 84680D (2012), doi:10.1117/12.929698.

[12] M. Buljan, P. Benítez, R. Mohedano, and J. C. Miñano, “Improving performances of Fresnel CPV systems: Fresnel RXI Köhler concentrator,” in Proceedings of 25th EU PVSEC, 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Valencia, 2010), pp. 930 – 936

- [13] J. C. Miñano, P. Benítez, P. Zamora, M. Buljan, R. Mohedano, and A. Santamaría, “Free-form optics for Fresnel-lens-based photovoltaic concentrators,” *Opt. Express* 21(S3), A494 – A502 (2013).
- [14] J.W. Pan, J.Y. Huang, C.M. Wang, H.F. Hong, Y.P. Liang, “High concentration and homogenized Fresnel lens without secondary optics element,” *Opt Commun*, 284 (19) (2011), pp. 4283–4288
- [15] P. A. Davies, “Edge-ray principle of nonimaging optics,” *J. Opt. Soc. Am. A* 11(14), 1256–1259(1994).
- [16] Victoria M, Domínguez C, Antón I, Sala G. Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses. *Optics Express* 2009;17(8): 6487 – 6492. DOI:10.1364/OE.17.006487
- [17] P. Zamora, P. Benítez, L. Yang, J. C. Miñano, J. Mendes-Lopes, and K. Araki, “Photovoltaic performance of the dome-shaped Fresnel-Köhler concentrator,” *Proc. SPIE* 8468(84680D), 84680D (2012), doi:10.1117/12.929698.