

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽光照明混光與特性分析
Analysis of Light Mixing Characteristics of Sunlight Illumination

計畫編號：1062001INER006

受委託機關(構)：國立東華大學光電系

計畫主持人：王智明

聯絡電話：03-8634189

E-mail address：wangcm@gms.ndhu.edu.tw

研究期程：中華民國 106 年 4 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 45 萬元

核研所聯絡人員：林澤洋

報告日期：106 年 11 月 28 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	8
參、主要發現與結論.....	25
肆、參考文獻.....	26

中文摘要

核能研究所物理組在過去發展了微型化聚焦型太陽能電池模組，與傳統大型聚焦型太陽能電池模組相比，微型化太陽能電池可利用傳統發光二極體（LED）封裝技術，且在熱管理上具有較不易過熱的優勢。本計劃旨在分析核能所現有微型化聚焦型太陽能電池模組在同時具有直射以及散射光源照射下，太陽能電池接收面上的光場分佈。可以預期的是，散射光源無法有效匯聚在微小的 III-V 族化合物多接面太陽能電池上。因此，我們將以 III-V 族化合物多接面太陽能電池接收直射光，散射光則在 III-V 太陽能電池周圍設置矽基太陽能電池或染料敏化太陽能電池來接收之。一般來說，太陽散射光依天候狀況可高達 60%，若能有效接收散射光，則可大幅提升太陽能電池效率。本計劃的執行將從基礎的聚焦透鏡材料折射率量測開始，到透鏡曲面的量測與光學模型重建，最後將量測分析在直射以及散射光源照射下太陽能電池接收面上的光場分佈，並評估在實際太陽光場照射下，同時以 III-V 太陽能電池及染料敏化太陽能電池來接收直射及散射光的太陽能電池模組效率。混光(漫射光+直射光)提高後的效率，可加強太陽光室內照明所需的功率及光通量

Abstract

The aim of this project is to develop an optical model of micro-CPV solar cell under both directly illumination and scattering illumination. The optical field distribution at solar cell surface will be analyzed using optical ray tracing method. It is challenge to focus the scattering light on the III-V solar cell. Therefore, low cost solar cell, for example: silicon solar cell or DSSC solar cells, will be arranged to be adjacent with III-V solar cell for harvesting diffuse solar radiation. Depending on the weather, The scattering light can be as high as 60% of solar light which is usually cannot be harvested using concentration lens. If one can harvest the diffuse solar light, the efficiency of CPV can be significantly enhanced. In this project, the refractive index of concentration lens providing by INER will be first measured using spectral ellipsometer. The surface profile of the lens will be also measured using commercial surface profiler. The optical field distribution at solar cell will be analyzed under both directly illumination and scattering illumination. The efficiency of the hybrid CPV module will be evaluated under direct/diffuse solar input light.

壹、計畫緣起與目的

目前市場主流的聚光型太陽電池模組 (Concentrator photovoltaics, CPV)，不論是折射式或是反射式聚光型太陽能模組，皆有體積過於龐大，在生產製造或是安裝模組的過程，增加原物料成本與人工組裝的成本壓力，在終端使用上，龐大的 CPV 系統也增加了追日系統的能量損耗。因此，將 CPV 系統微型化將可進一步降低 CPV 成本以及提升發電效率。

過去幾年，一系列的微型化方法被提出，其中，繞射式的相關研究由於大多受限於嚴重的色散，因此不適合應用在寬頻譜 CPV 系統。因此在本計劃中，我們直接將繞射式的研究跳過不予回顧。

2016 年，J. W. Pen 等人提出了一個平面式的微光學 CPV 系統，其光學架構如圖一所示，研究論文中改善的方法，為設計提出利用微光學聚光透鏡取代傳統長焦距的 Fresnel lens 透鏡，再搭配波導以及微稜鏡結構，其設計了僅僅厚度為 9mm 的微光學聚光器，大幅縮小了 CPV 聚光系統的尺寸，在 300 倍的聚光倍率下，聚光透鏡模組的理論光學效率約 81%，厚度比傳統設計少 2.93mm。

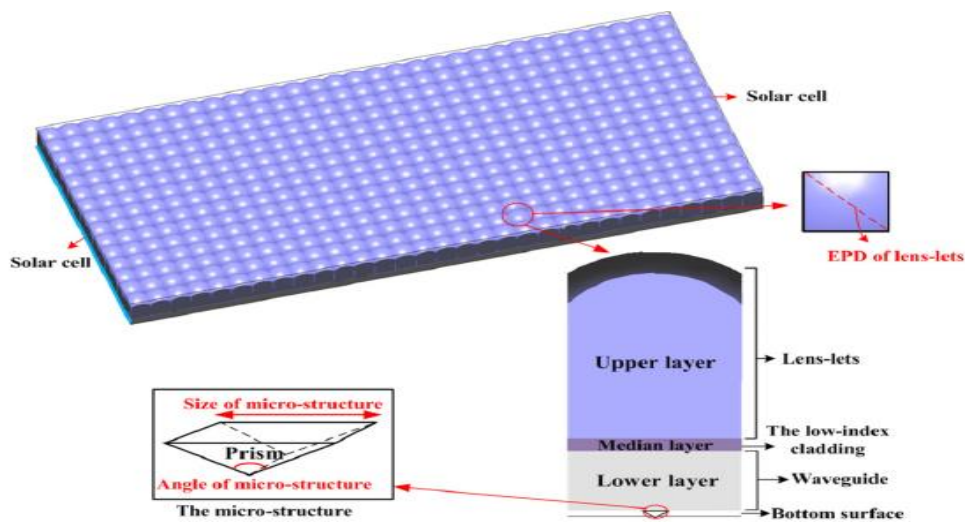
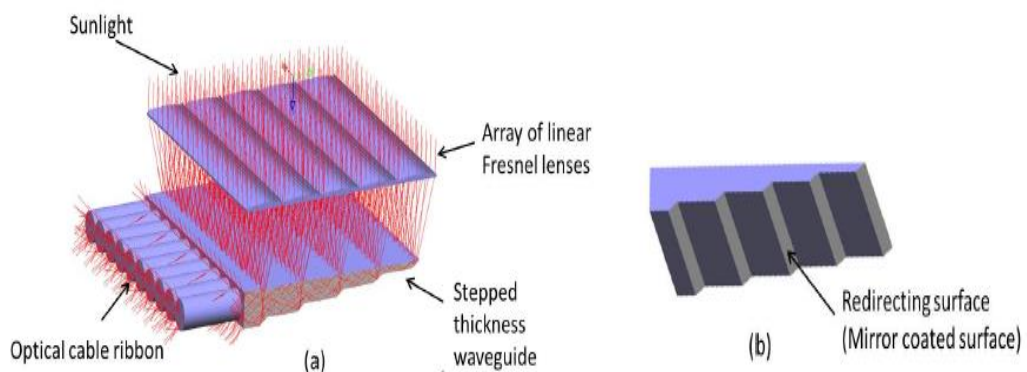


Figure 1. Schematic diagram of the planar micro-optic concentrator.

圖一 平面式微光學聚光器[1]

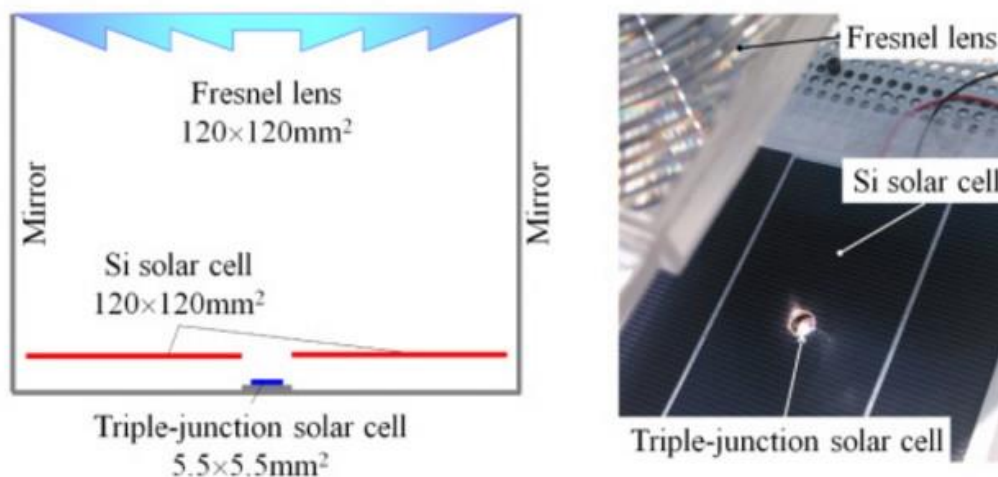
同樣在2016年 Seoyong Shin 等人提出大尺寸微光學聚光器搭配階梯式光導元件之研究，其光學架構如圖二所示，該研究團隊研究動機在於比較微結構與光導管的光傳導損耗，研究論文中也接上光纖做為太陽光的傳導。此研究設計提出改用一維微光學柱狀透鏡取代 Fresnel lens 透鏡縮小聚光焦距，搭配階梯式光導管，做為聚光透鏡與光纖的第二階的光學元件，該研究係以商用軟體 LightTools 軟體模擬分析，均勻化分佈的聚光透鏡模組其理論光學效率約 56%。



圖二 大尺寸微光學聚光器搭配階梯式光導元件[2]

過去的研究顯示，使用微光學透鏡可以有效縮小 CPV 系統。然而，透鏡在焦平面可以視為一個傅式轉換平面。不同的入射角度將落在焦平面的不同空間位置。也就是說，微小的三五族晶片只能接收到幾近垂直入射的太陽光，太陽的散射光將無法有效被接收。

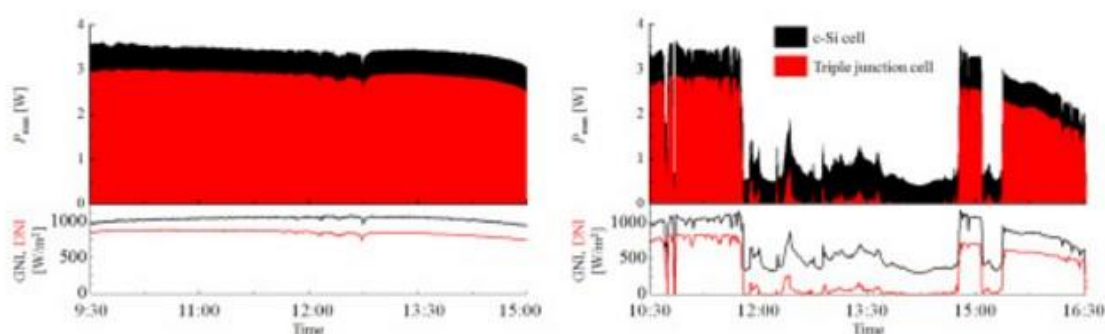
2014 年，日本名古屋研究團隊提出一種複合式的 CPV 系統，該研究團隊在 III-V 族化合物多接面太陽能電池周圍裝設單晶矽太陽能電池（如圖三所示），以 III-V 族化合物多接面太陽能電池接收太陽直射光，以單晶矽太陽能電池接收太陽在大氣中的散射光，藉此巧妙的架構將一般 CPV 系統難以接收的散射光收集轉換成電能。



圖三 III-V 族太陽能電池與單晶矽太陽能電池複合式 CPV 系統 [3]

在該配置中，直接入射的太陽輻射會經由菲涅爾透鏡聚焦並穿過 Si 太陽能電池中心的圓形孔聚集到 III-V 太陽能電池上，而其他通過菲涅爾透鏡的漫射太陽輻射則會被周圍的矽太陽能電池所捕獲。

由於不同時間下全天日照光場特性也會有所改變，可想而知的是太陽能電池的發電效率也會有所不同。圖四為 2013 年 8 月 22 日（晴天時）(左)和 9 月 18 日（部分多雲）(右)根據時間變化以最大發電功率所作的圖表。該研究團隊發現，一般 CPV 模組為只有 III-V 太陽能電池的發電功率，而改良的 CPV 模組則是 III-V 太陽能電池及矽太陽能電池的發電功率總合，從圖中可發現即使當 III-V 太陽能電池在 DNI 幾乎為零的狀態下而不發電時，內置的矽太陽能電池也會提高整體的發電量。



圖四 因不同日照時間，所產生的不同直射/散射能量比太陽能電池輸出能量圖[3]。

在此我們先定義一個散射比率 $\gamma = (GNI - DNI)/GNI$ ，其中 GNI 為 global normal irradiation，DNI 為 direct normal irradiation。GNI 包括了太陽直射以及漫射的能量，DNI 僅代表太陽直射的能量，因此 $GNI - DNI$ 即代表了太陽光在大氣中漫射的分量。在晴天的狀況下平均散射比率 $\gamma = (GNI - DNI)/GNI = 0.18$ ，平均 $DNI = 848 \text{ W/m}^2$ ，改良後的 CPV 模塊的潛在發電量比常規 CPV 模塊的潛在發電量大 1.19 倍。在多雲的狀況下（平均上 $\gamma = 0.64$, $DNI = 318 \text{ W/m}^2$ ）此潛

在發電量會增加至 37.3 倍。

太陽光的直射光與散射光比例受天候與緯度的影響，一般來說直射/散射能量比約 7:3。矽基太陽能電池一般在弱光發電效能甚低，因此上述的 III-V 族太陽能電池周圍與單晶矽太陽能電池在散射光的光能轉換效率十分有限。本計劃擬利用適合在弱光下操作的太陽能電池，如染料敏化太陽能電池或是鈣鈦礦太陽能電池作為吸收太陽散射光，藉此提升 III-V 族太陽能電池周圍與單晶矽太陽能電池複合式 CPV 的整體轉換效率。預計能提升原本單純 CPV 系統效率 1-2% 以上。

本計劃利用核能所物理組現有微型化聚焦型太陽能電池模組在同時具有直射以及散射光源照射下，太陽電池接收面上的光場分佈。我們將以 III-V 族化合物多接面太陽能電池接收直射光，散射光則在 III-V 太陽能電池周圍設置矽基太陽能電池或染料敏化太陽能電池來接收之，藉此解決散射光將無法有效被接收的問題。

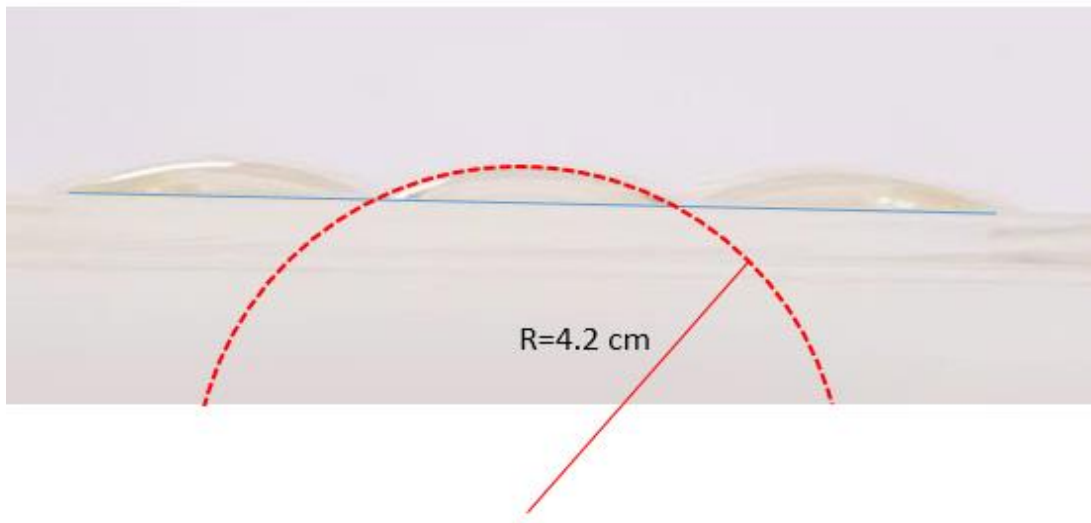
貳、研究方法與過程

我們首先先利用核能所物理組所提供的透鏡組進行在太陽光照射下的光場分佈實驗。透鏡外觀如圖五所示，透鏡組為一個 3×3 陣列，單一透鏡的尺寸為 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 。我們首先先以準直雷射光束量測透鏡後焦長，量測結果約 6 cm 。



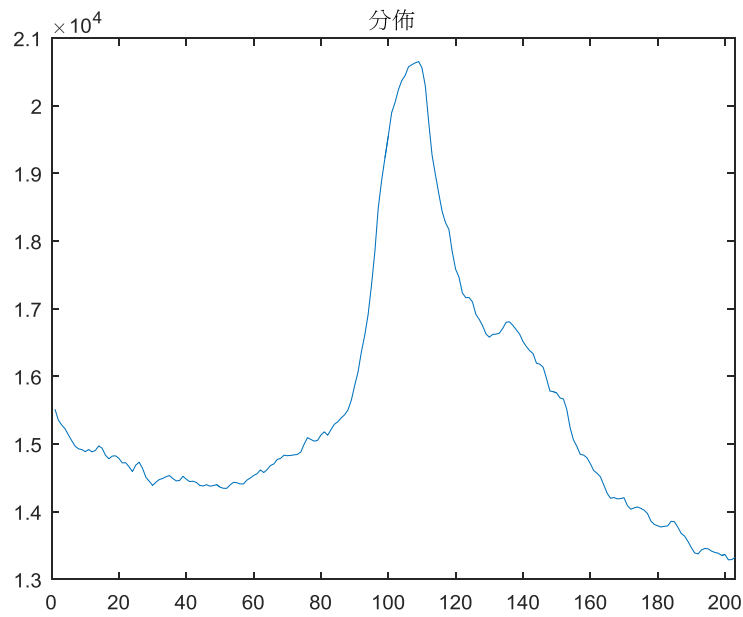
圖五 透鏡外觀照片

除了直接量測透鏡後焦長之外，我們也嘗試量測透鏡的曲率半徑，如圖六所示，我們利用量測水珠與界面的接觸角的架設拍攝透鏡的側面，再以商用軟體回歸透鏡的曲面，量測的曲率半徑為 4.2 cm 。我們將這個曲率半徑在利用光束追跡軟體分析其後焦長，結果與利用平行光量測後焦長之結果相符。



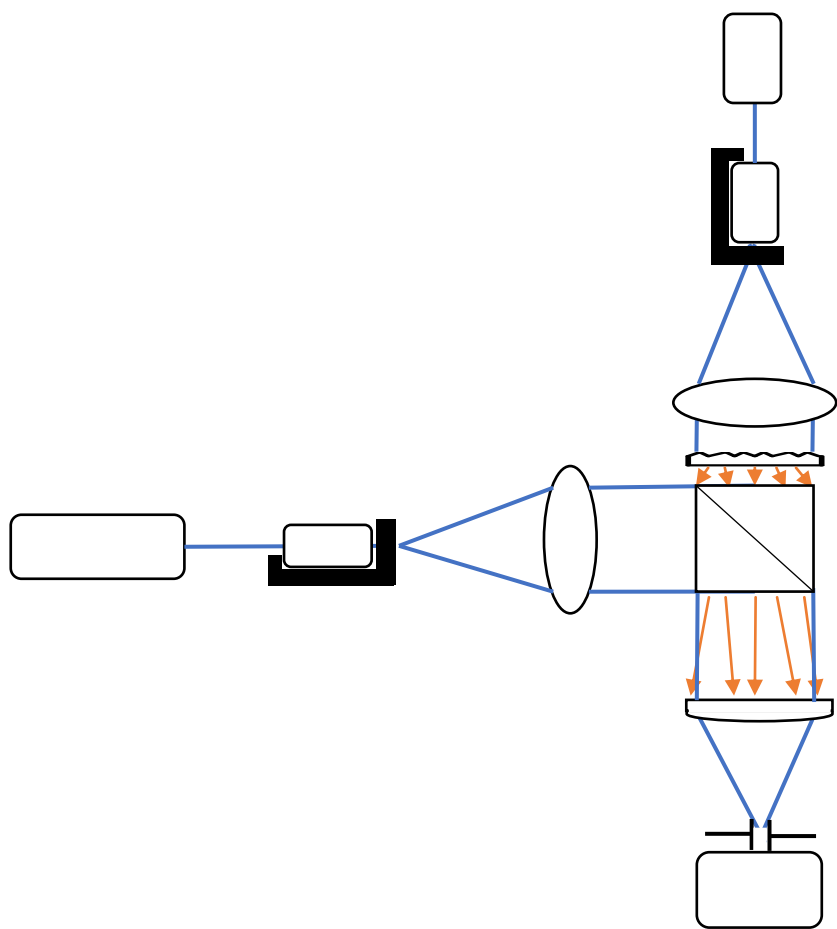
圖六 透鏡曲面量測圖

在透鏡聚焦面光場分布的量測方面，我們將透鏡放置在太陽光底下，並將透鏡組朝向太陽，使太陽光正向入射透鏡組，在焦平面放置一個屏幕，試圖直接以拍照的方式取得在同時包含直射太陽光以及漫射太陽光的聚焦情形，隨後再利用 Matlab 程式繪出通過聚焦中心的一維能量分布圖。其結果如圖七所示，由於直射/漫射光在焦平面上的能量密度相差太大，因此影像在聚焦中心點上已經過飽和，而在遠離聚焦中心點的位置則曝光量不足，因此不能直接以拍照的方式一次取得散射/漫射光在焦平面上的光場分佈。



圖七 直射/漫射光在焦平面上光場分布圖

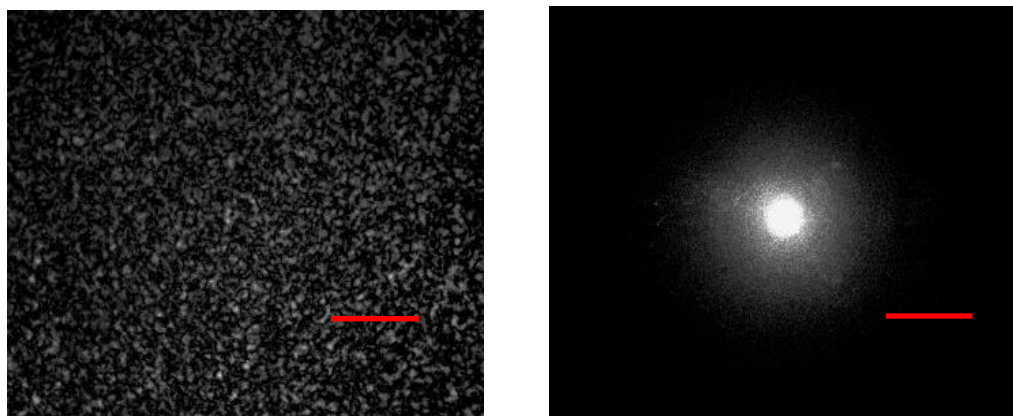
為了解決這個光場分佈量測問題，我們設計了一個量測系統，其架構簡圖如圖八所示。我們以兩個獨立雷射分別作為直射/漫射光源。直射雷射光源經擴束後，入射一個 50/50 分光鏡，經分光鏡反射後垂直入射 3×3 透鏡陣列的中心。漫射光源則直接入射一貼近分光鏡的毛玻璃，使光源發散，發散光源穿透分光鏡後入射透鏡陣列。在量測直射光源在焦平面的能量分佈時，我們只打開直射光源，量測在聚焦平面上的能量。相反的，在量測散射光源在焦平面的能量分佈時，我們只打開散射光源，量測在聚焦平面上的能量。



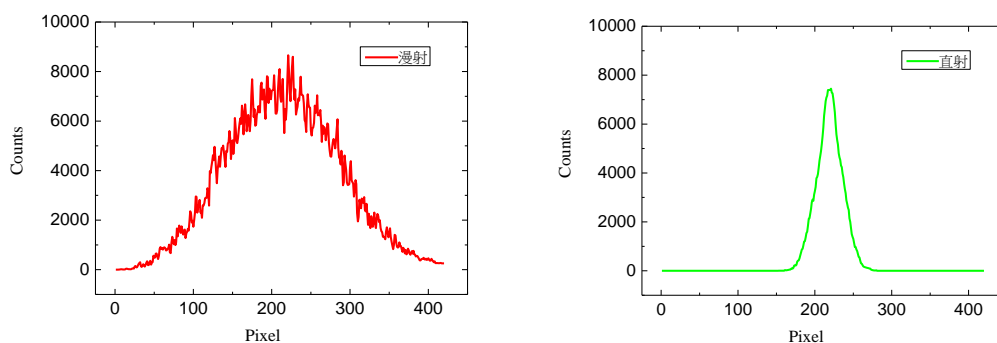
圖八 直射/漫射光源光場分佈量測系統架設圖

由於幾何光學系統是一個線性系統，光場能量可以線性疊加，因此我們可以將直射/漫射分開量測再將量測結果線性疊加，如此可以避免偵測器的動態範圍不足使得焦平面中心過飽和而邊緣曝光量不足的問題。由於時間的關係，目前量測實驗尚在進行中。我們預期藉由此一自製的量測系統可以控制前述的散射比例 $\gamma = (\text{GNI} - \text{DNI})/\text{GNI}$ 。未來我們將可在不受天候條件的影響下，量測在不同散射比例下，接收直射光的三五族太陽能電池及周圍接收散射光的染料敏化太陽能電池分別的光電轉換效率。從圖九可以看出漫射光均

勻分布在焦平面上，而直射光以 0.4mm 的光點大小聚焦，比商業 III-V 串聯太陽能電池的芯片尺寸稍小。由於我們使用 He-Ne 雷射的光源來證明在不同的入射光照射下的光分佈，可看到因為光波的空間同調性而產生的斑點。在太陽光照下的實際應用中，焦平面上的光學分佈是均勻的，沒有斑點，再利用 Matlab 程式分析其收光面光場分佈，其結果如圖十所示。



圖九 (a)漫射(b)直射光在透鏡焦平面上的光分佈



圖十 收光面光場分佈

除了實驗量測，我們還使用 LightTools 模擬光線分別以直射與散射的方式進入透鏡。模擬結構如圖十一 (a) 所示。由 3×3 透鏡陣列

組成，每個透鏡的尺寸為 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 。而透鏡上方的橘色部分為模擬光源且光源的尺寸設為與單個透鏡相同，下方的網格部分為接受器，且此系統的透鏡焦距是以實際的透鏡焦距設計，以求模擬結果能夠最接近實際狀況。假設光源位於中心的位置，在 $\gamma = 0.8$ 時的漫射光源下，可以看出光線在焦平面上的分布狀況，如圖十一 (b) 所示。



圖十一 (a)模擬的透鏡陣列 (b)在焦平面上的光分佈

圖十一 (b) 是一個 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的接收面，其大小與透鏡組相同，而我們照射光的位置是位於透鏡組中心，面積 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的直射/散射光源。這個聚焦型光學系統是每平移 2 cm 即呈現週期變化的線性不變 (shift-invariant) 系統，所以由透鏡組外為 8 個透鏡所照射的光，會同樣地入射到中心 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的接受面上，因此，我們可以將 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的接收面的接收能量，全部積分貢獻再中心 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的接受面做為計算太陽能電池的入射能量。

在模擬透鏡陣列的示意圖中，我們將接收器中心 $0.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 的大小設定為 III-V 族太陽能電池的面積，而接收器上 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的大小為鈣鈦礦太陽能電池的面積，另外最外圍的接收器大小為 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ ，並且我們將其定義為鈣鈦礦太陽能電池的有效入射光收光面，因為在實際使用上，光在通過中央透鏡以外的周圍透鏡時，光線經由折射後也會進入到位於中央的鈣鈦礦電池中。

圖十二為一系列不同 γ 太陽光照射下，聚焦面之光場分布圖，由於在聚焦點上，其照度(單位面積的光通量)會比周圍高很多，為了能夠同時看到聚焦以及散射光的光場分布，我們將照度取指數，我們可以發現，如預期的當 $\gamma = 0.05$ 時，大多數的能量都聚在中心 III-V 族電池的收光位置。當 γ 逐漸增大時，可以看到越來越多雜散光照射在 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 的收光面上，而這接雜散光，在傳統的聚焦型太陽能模組中是無法被利用的光，但在本計畫中，這些光有機會被鈣鈦礦太陽能電池所回收。

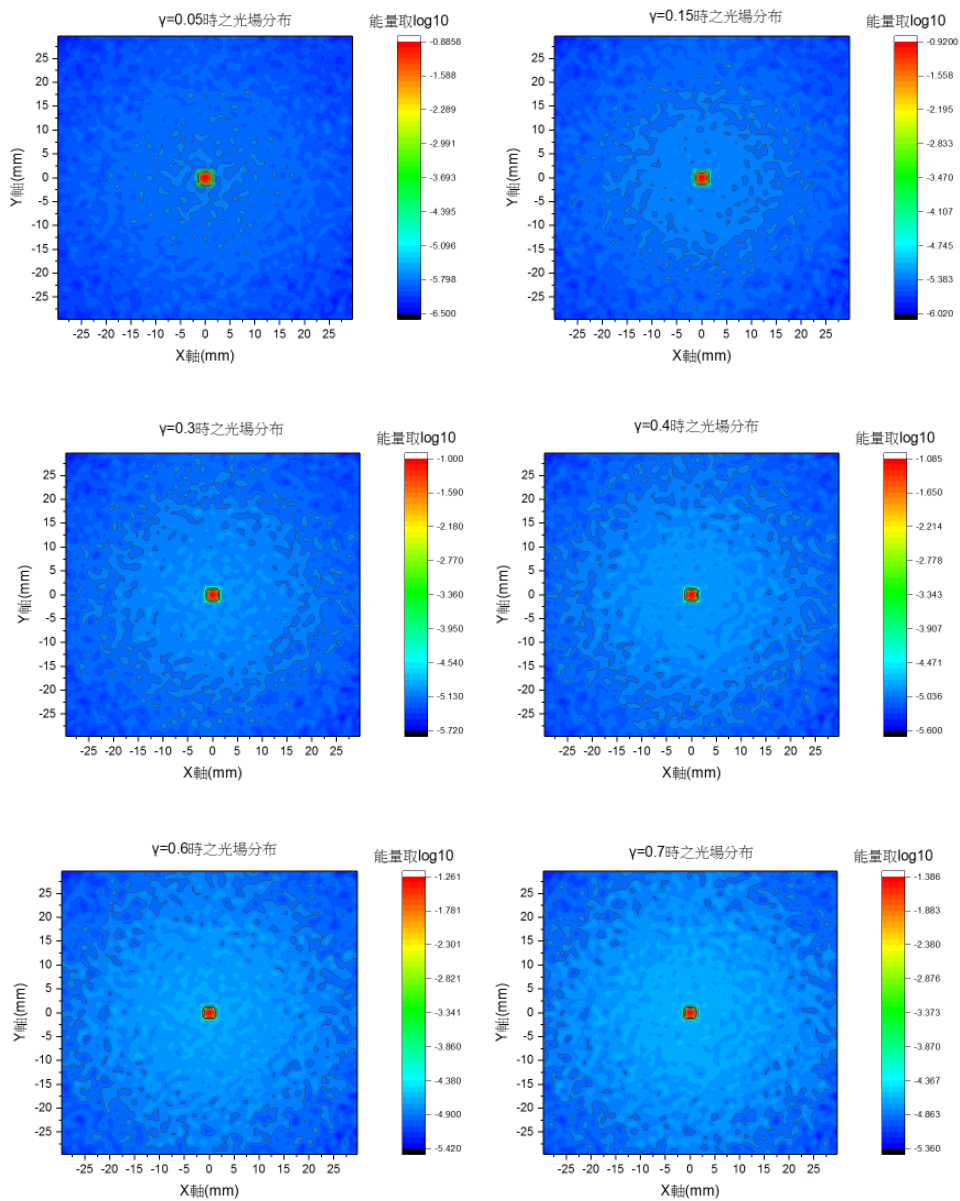
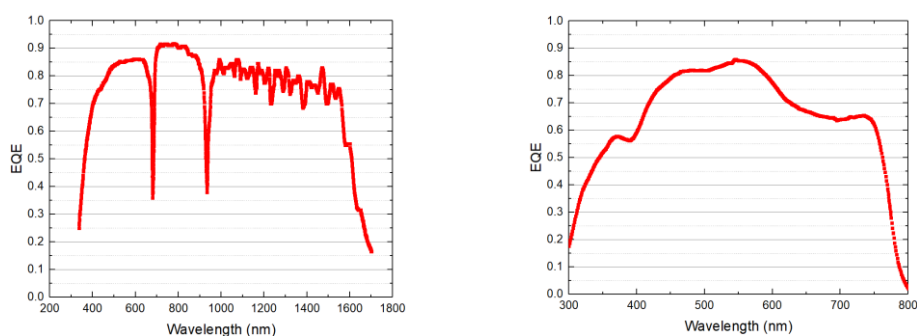


圖 十二 一系列不同 γ 太陽光照射下，聚焦面之光場分布圖

我們以 AM1.5 下的太陽光譜能量分布作為光源設定，並且光源的能量密度為 0.1 Watts/cm^2 ，模擬中的總功率(GNI)我們將其設定為 0.4 Watts ，而直射光功率(DNI)則分別定為 0.38 、 0.34 、 0.28 、 0.24 、

0.16、0.12、0.08 Watts，又 $\gamma = (GNI - DNI) / GNI$ ，可得出 γ 值為 0.05、0.15、0.3、0.4、0.6、0.7、0.8，藉此得出每個波長下的能量。

為了準確分析在 III-V 族電池的四周加裝染敏電池或鈣鈦礦太陽能電池所能額外收獲的能量，我們利用光線追跡分析不同波長的光入射到太陽能電池的有效吸收區域，也就是收光面扣除 III-V 族電池的面積。最後再以我們與核能所取得的 III-V 族太陽能電池的 EQE 分布(圖十三(a))以及學校實驗室取得的鈣鈦礦太陽能電池的 EQE 分布(圖十三(b))將太陽光計算成電流，將各波長下的電流積分，則可得到短路電流。而這個短路電流是 γ 的函數，亦即 $I_{sc}(\gamma)$ 。



圖十三 (a) III-V 族太陽能電池的 EQE 分布 (b)鈣鈦礦太陽能電池的 EQE 分布

太陽能電池的短路電流可以用以下簡單的公式估算：

$$J_{sc} = q \int \phi(\lambda) \times EQE(\lambda) d\lambda$$

其中 J_{sc} 為短路電流， q 為電子電量， $\phi(\lambda)$ 為各波長下的太陽光譜光通量， $EQE(\lambda)$ 為外部量子效率。由於外部量子效率已經考慮了電池

與空氣界面的反射，所以我們模擬上不需要再考慮直射/散射光打在太陽能電池上的 Fresnel loss。

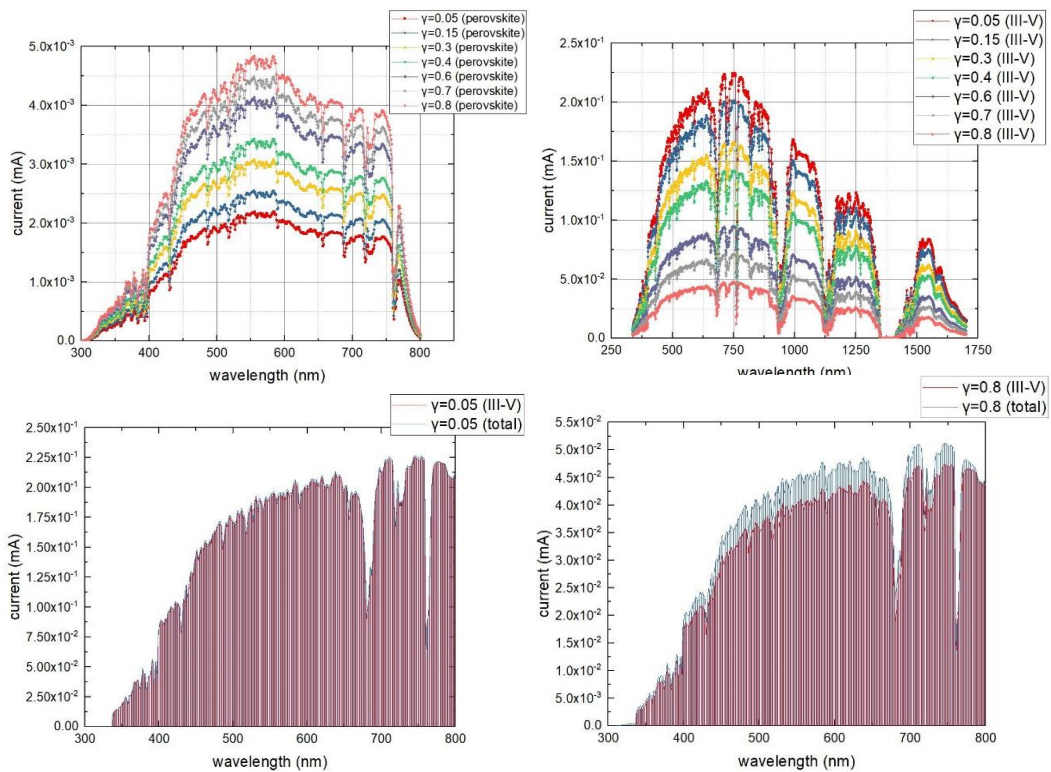
我們所使用的電流計算公式如下：

$$\frac{\text{入射光強}}{\text{收光面積}} \left(\frac{J}{s \cdot cm^2} \right) \times \frac{\text{波長} \times 10^{-9} (m)}{h \times c} \left(\frac{1}{J} \right) \times IPCE(EQE) \times \text{電子電量} (A \cdot s) \times \text{電池面積} (cm^2) \times 1000 = \text{電流} (mA)$$

以 $\gamma = 0.8$ 時，波長為 550nm 的光線為例，在收光面積為 (6cm x 6cm – 0.06cm x 0.06cm) 的接收器上所得到的能量約為 0.000113 Watts，在此波長下的鈣鈦礦太陽能電池的 EQE 為 0.855，並且電池的面積為 2cm x 2cm – 0.06cm x 0.06cm，因此所得的電流值為：

$$\frac{0.000113}{35.9964} \left(\frac{J}{s \cdot cm^2} \right) \times \frac{550 \times 10^{-9} (m)}{h \times c} \left(\frac{1}{J} \right) \times 0.85485 \times 1.6021892 \times 10^{-19} (A \cdot s) \times 3.9964 (cm^2) \times 1000 = 0.00475916 (mA)$$

在不同的 γ 值下計算所得的電流曲線圖如圖十四(a) (b) 所示，並且我們將 $\gamma = 0.05$ 及 $\gamma = 0.8$ 時的電流曲線圖做疊加後得到圖十四(c)及(d)。

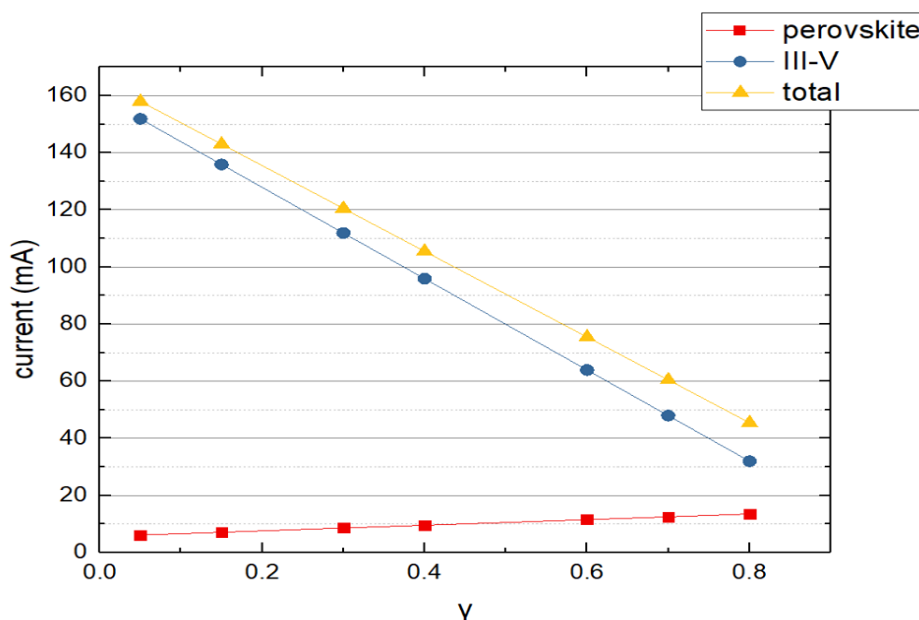


圖十四 (a)鈣鈦礦電池在不同 γ 下之電流 (b)III-V 族電池在不同 γ 下之電流(c) $\gamma = 0.05$ 時之電流疊加圖 (d) $\gamma = 0.8$ 時之電流疊加圖

圖中紅色面積部分為 III-V 族太陽能電池的電流，而藍色面積部分即是鋪設在周圍的鈣鈦礦太陽能電池所提供的電流，從上圖中可以發現，當 $\gamma = 0.05$ 時電流的差距並不明顯，但是當 $\gamma = 0.8$ 時能夠得到的額外電流便清晰可見，我們將 $\gamma = 0.8$ 時之鈣鈦礦電池的電流積分後約為 1.5mA，此電流值便相當於在相同的受光條件下，善加利用外圍散落的能量時所能夠獲得的電流增益。

隨著氣候的變化，直射與散射比將會有所不同，根據以上的模擬結果，在透鏡的焦平面上放置染料敏化太陽能電池或鈣鈦礦太陽

能電池來吸收散射光，確實可以有效地提升整個太陽光模組的效率，並且在散射光占比愈重時，電流增益會愈加明顯如圖十五。



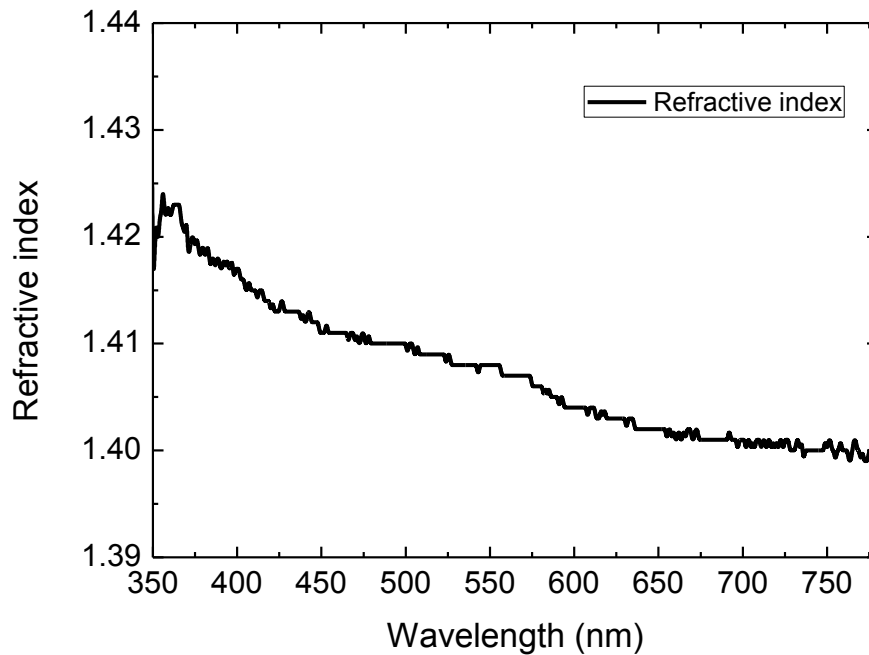
圖十五 在直射光入射角度為 0 度時，不同 γ 對應的電流

以一個開路電壓 0.78V 的染料敏化太陽能電池，在 FF=0.7 的情況下， $10.74\text{mA}/\text{cm}^2$ 短路電流密度的染敏電池效率大約是 5.86%，也就是說，若加裝此染敏電池在 III-V 族電池的四周，大致上可以額外貢獻 $1\text{sun} \times 5.86\% \times \gamma \text{ W}/\text{m}^2$ 。而我們於 8 月 10 號下午 2 點，當日氣壓為 1001.8hPa、氣溫 32.1°C 、相對濕度 62% 時，量測加入染料敏化太陽能電池後，可多產生 $3.11\text{mA}/\text{cm}^2$ 的電流，大約增加了 102mA 的電流量，但因當時量測時，來不及測量散射比率。而日後在測量時會先以一個長方形的紙筒套住其中一個透鏡，這樣在太陽光下就

只收得到直射光然後用 power meter or lux meter 量光強，再用一個 2 公分 x 2 公分的擋板擋直射光再量光強，然後把兩個值對除就知道當天當時的直射散射比。

透鏡陣列矽膠材質折射率量測

我們利用橢圓光譜儀量測核能研究所所提供的矽膠材質的邊緣量測矽膠折射率。橢圓儀訊號光主要來自於空氣/矽膠界面反射，而底層的矽膠/玻璃界面，由於矽膠厚度很厚，所以可以忽略，其干涉現象也可以忽略不計，因此我們可以直接利用單一面的反射訊號當作是 Bulk 材質的反射訊號，由 Bulk 反射訊號可以直接推算 pseudo-dielectric constant，而此 pseudo-dielectric constant 直接就是矽膠的介電係數，開根號則可求得矽膠折射率與波長的關係，如圖十六所示。由圖可以發現，矽膠的折射率在可見光波段介於 1.42 到 1.40 之間，其色散很低，非常適合做為寬頻工作的聚焦型太陽能電池的聚焦透鏡材質。

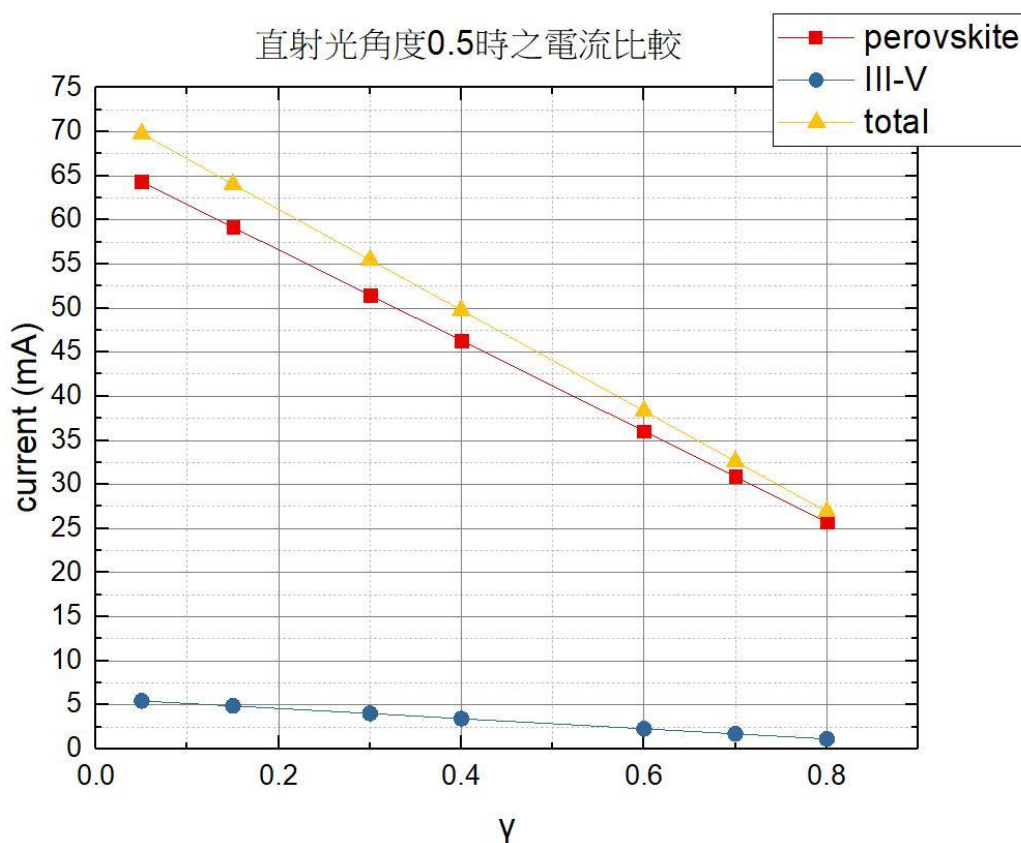


圖十六 矽膠折射率之色散量測圖

追日系統功差分析

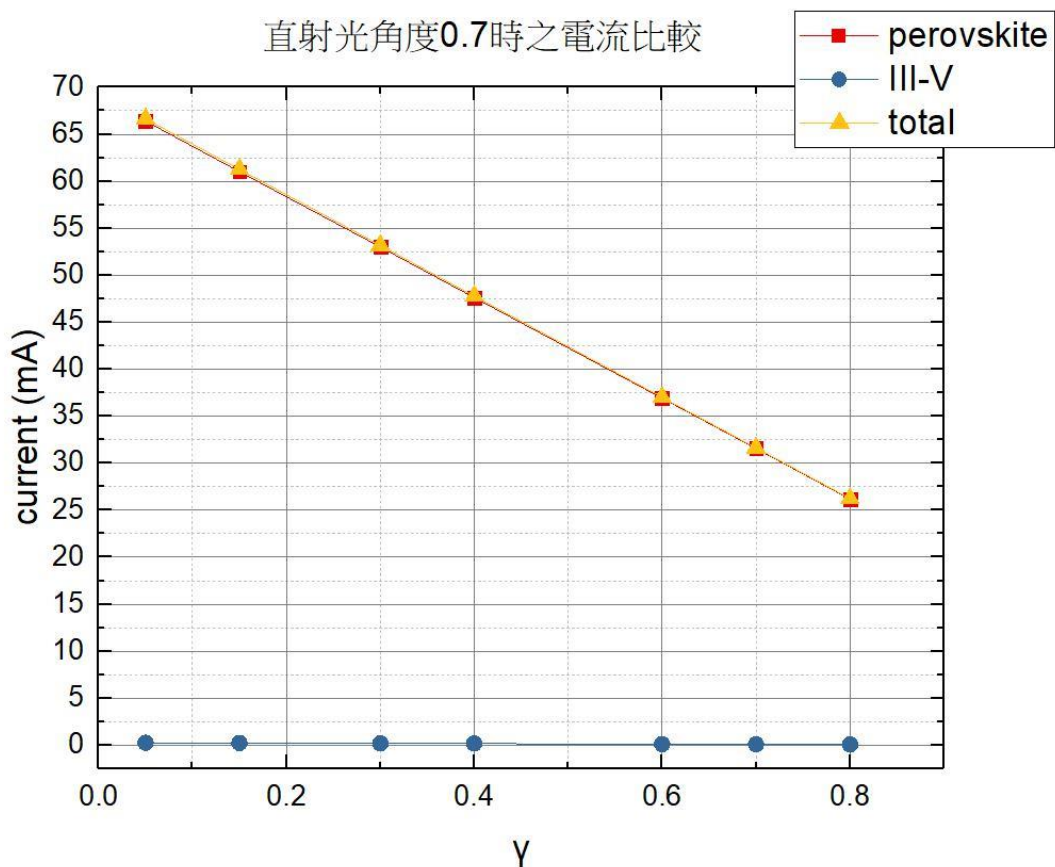
在追日系統的精準度功差分析中，我們分析在直射光以不同入射角微透鏡組，並分析在不同 γ 之下，其短路電流的變化。其中在入射度的情況已在圖十二中分析了。圖十七以及圖十八分別是直射光入射角度為 0.5 度以及 0.7 度的短路電流分析。由於本透鏡組系統沒有利用 2 次光學元件提升 III-V 族太陽能電池的收光角，所以由圖十七可以發現 III-V 族電池所提供的短路電流由 150 mA 銳減至 5mA，這是由於在 0.5 度入射時，大多數的光都無法照射在 III-V 族電池 0.6 mm x 0.6 mm 的收光面積上。但此時我們可以看到鈣鈦礦太

太陽能電池的短路電流由 6mA 提升至 65 mA，也就是說大約 40% 的電流可以被鈣鈦礦電池回收。



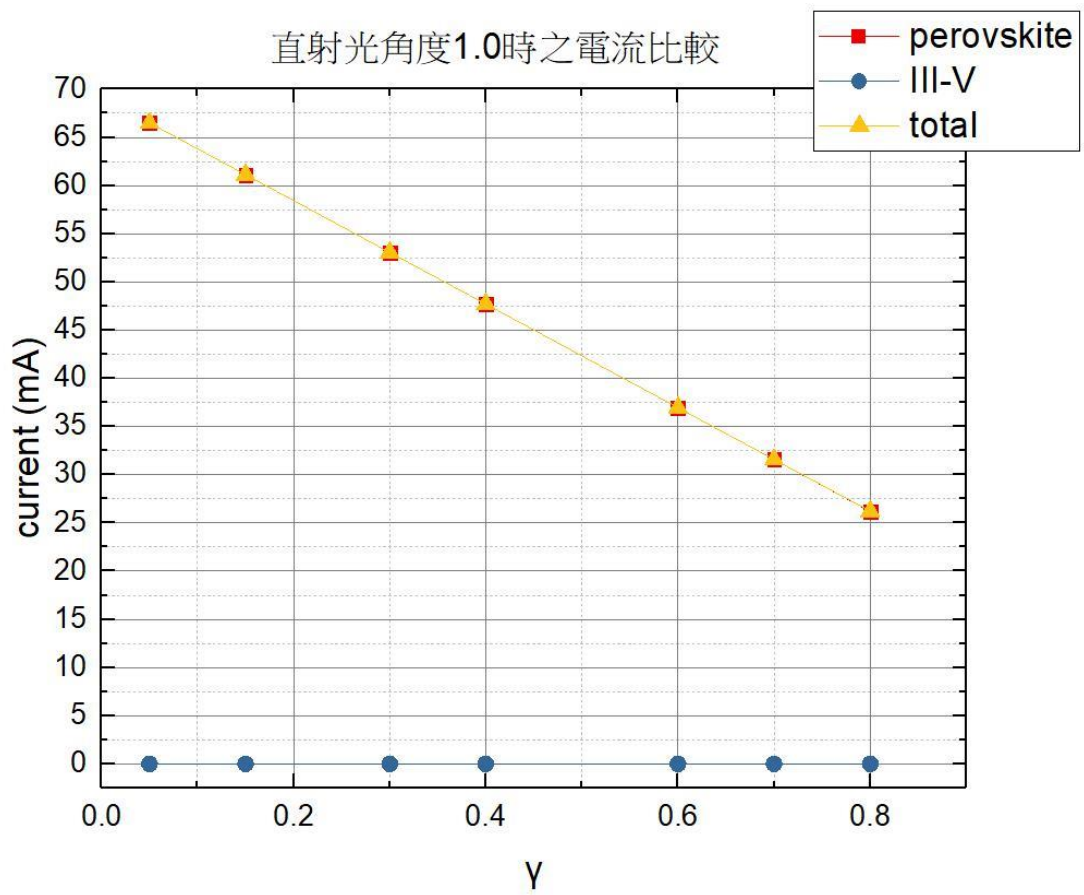
圖十七在直射光入射角度為 0.5 度時，不同 γ 對應的電流

在入射光角度改變為 0.7 度時，我們可以發現 III-V 族太陽能電池已經幾乎完全收不到光，也應此所有的短路電流都由鈣鈦礦提供，然而在散射光比例增加時，鈣鈦礦所提供的電流也隨之下降，因為此時鈣鈦礦主要入射光是來自直射光，當散射光比例提高時，短路電流也隨之下降。



圖十八 在直射光入射角度為 0.7 度時，不同 γ 對應的電流

圖十九為直射光入射角度為 1.0 度時的短路電流分析，由圖十九可以看出，圖十九與圖十八幾乎完全相同，這進一步驗證了，在大入射角度 1 度時，鈣鈦礦電池仍能回收 III-V 族電池所無法有效接收的光。而一般來說，追日系統的精確度大約會落在 0.2 度到 0.5 度之間，未來我們將會進一步分析直射光入射角在追日系統的角度精確度附近的光場分布以及其輸出短路電流。



圖十九 在直射光入射角度為 0.7 度時，不同 γ 對應的電流

參、主要發現與結論

在初期執行的結果中，我們為了解決量測直射/散射光在焦平面上的能量差異過大，導致一般偵測器動態範圍不足而無法準確量測的問題，我們提出了一個新的量測架構，此量測架構可以分別建立直射光以及散射光，以及可以輕易的組成不同散射比例的環境光，對於不同天候條件所因應產生的不同散射比例的光源，可分析其所對應的光場分佈。進一步更精確地分析三五族太陽能電池以及染料敏化太陽能電池在直射/散射光照射下的光電轉換效率。在模擬上我們也發現，鈣鈦礦太陽能電池或是染敏電池，有助於在追日系統精度不高的時候，回收三五族太陽能電池所不能接收的直射光。

而實際量測，我們把透鏡放置於太陽光照射下，並在其焦平面上的陰影處放置染料敏化太陽能電池可多產生 $3.11\text{mA}/\text{cm}^2$ 的電流，整體大約可以增加 102mA 的電流量。混光(漫射光+直射光)提高後的效率，可加強太陽光室內照明所需的功率及光通量。

肆、参考文献

- [1] J. W. Pan, Y. C. Su and S. Y. Lee "Optimized planar micro-optic concentrator design", *Journal of Optics*, 18(6), pp.2, (2016).
- [2] N. H. Vu and S. Shin "A Large scale day lighting system based on a stepped thickness waveguide", *MDPI-Energies*, 9(2), pp.3 (2016).
- [3] N. Yamada and K. Okamoto, "Experimental measurements of a prototype high concentration Fresnel lens CPV module for the harvesting of diffuse solar radiation," *Opt. Express*, 22, pp. A28-A34 (2014)
- [4] P. Benitez, J. C. Miñano, and R. Alvarez, "Photovoltaic concentrator with auxiliary cells collecting diffuse radiation, US patent application publication," Pub. No.: US 2010/0126556 A1 (2010).
- [5] Amonix Inc, "Amonix achieves world record for PV module efficiency in test at NREL," (2013).
- [6] A. Jena, S.P. Mohanty, P. Kumar, J. Naduvath, V. Gondane, P. Lekha, J. Das, H.K. Narula, S. Mallick, P. Bhargava, "Dye sensitized solar cells: a review," *Trans. Indian Ceram. Soc.*, 71 (2012), pp. 1-16
- [7] Shaikh, JS (Shaikh, Jasmin S.) and Shaikh, NS (Shaikh, Navajsharif S.), "Perovskite solar cells: In pursuit of efficiency and stability," *MATERIALS & DESIGN*(2017)