

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

提升太陽能電池模組封裝效率之研究
**Solar Modules Efficiency Enhanced by A Novel Micro-lens
Film**

計畫編號：1012001INER022

受委託機關(構)：國立高雄應用科技大學

計畫主持人：艾和昌 教授

聯絡電話：(07) 3814526 # 2700

E-mail address：herchang@cc.kuas.edu.tw

核研所聯絡人員：蔡丁貴

報告日期：101 年 12 月 5 日

目 錄

中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、文獻回顧.....	4
參、研究方法與實驗.....	8
一、光學模擬.....	8
(一) 微透鏡繪製設計及參數.....	8
(二) 光學模擬軟體.....	9
二、微透鏡陣列太陽電池模組.....	14
(一) 微影製程.....	14
(二) 精密電鑄.....	18
(三) 封裝轉印微透鏡之太陽電池模組.....	20
三、實驗設備.....	27
(一) 太陽電池真空模組熱壓封裝機.....	27
(二) 太陽電池檢測機.....	27
(三) 旋轉塗佈機.....	27
肆、結果與討論.....	30
伍、結論與未來工作.....	48
陸、參考文獻.....	50

提升太陽能電池模組封裝效率之研究

Solar Modules Efficiency Enhanced by A Novel Micro-lens Film

(計畫編號：1012001INER022)

艾和昌 邱揚峻 邱彬凱 朱章勇

國立高雄應用科技大學 應用工程科學研究所

摘要

本研究以光學軟體輔助設計微透鏡及類 LIGA 製程製作微透鏡模仁，進而以太陽電池模組封裝轉印在杜邦 ETFE 膜，藉由微透鏡陣列的填充率、微透鏡直徑及對正角等參數，量測太陽電池模組發電功率。研究分析得知，微透鏡陣列可有效降低太陽電池模組入射光反射，增加太陽電池表面二次折射，當太陽電池模組在入射太陽光對正角於 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之間，仍擁有穩定的發電功率，並提昇模組發電效益 2% 以上，因此本研究一體成型封裝之微透鏡陣列太陽電池模組技術，具有大量製造而節省成本及有效提升模組發電效益等優點，可應用於未來太陽光電產品開發。

Abstract

In this study, the optical software will be used to design the micro-lens and to manufacture with LIGA like process. After the mold of micro-lens accomplish, the lamination of PV module encapsulation should be processed in ETFE film, then the power measurement should also be conducted here. The power of PV module will be discussed by using the fill factor 、 diameter 、 alignment angle and other parameters of the micro-lens array (MLA). The research shows the MLA can reduce the reflection of the incident light to increase the second refraction on PV module. In this study, it can have a stable power output and enhanced power efficiency up to 2% when the alignment angle from 0° to 60° . The laminated encapsulation technology of micro-lens array integrated PV modules can reduce costs for mass production and promote the power effectively. It is useful to product the PV modules in the future.

壹、計畫緣起與目的

太陽電池模組隨著一天當中太陽的移動，四季太陽高度的改變，真正垂直入射進的陽光是相當的低，造成太陽電池模組效率無法有效維持在最大功率。目前科學家利用控制太陽電池模組的旋轉，使之具有追日的系統，讓太陽光能垂直入射，進而使全天發電效率都保持在尖峰狀態。因此，發展無需外加動力且能有效的吸收各角度入射光為本研究方向。

本研究利用在太陽電池模組表面設計製造透光性良好的微透鏡陣列，利用這些微透鏡對光入射角有偏折的作用，減小入射光的角度，提升斜向入射光的吸收率。此外，以類 LIGA(LIGA like)製程，製作一體成型封裝轉印之微透鏡陣列(Micro-lens Array, MLA)太陽電池模組，並藉由光學軟體輔助設計驗證，以探討微透鏡陣列對太陽電池模組之發電效益，同時可由光學模擬軟體計算不同微透鏡焦距位置，量測太陽電池於不同對正角發電效益，進行實驗量測結果與數值結果比對。

貳、 文獻回顧

微透鏡陣列(Micro-lens Array, MLA)目前被使用在很多的光學領域中像是光纖耦合(fibercoupling)、集光(light gathering)和光萃取(light extraction)，可說是光學元件中非常重要的一環。本研究利用在太陽電池模組表面設計製造透光性良好的微透鏡陣列，利用這些微透鏡對光入射角有偏折的作用，減小入射光的角度，提升斜向入射光的吸收率。

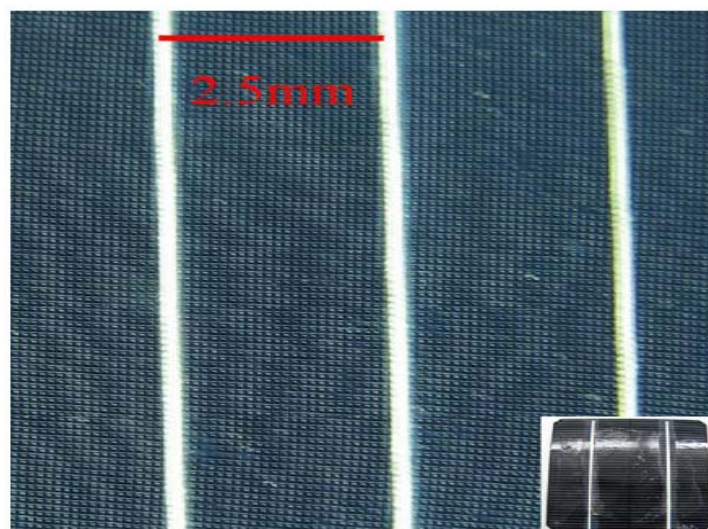
張心豪在2006年利用體型微加工(Bulk Micro-machining)製作MLA，以電鑄方式得到金屬母模，在此金屬母模上旋塗高分子PDMS薄膜來大量製作高透光性MLA，最後再將此膜黏貼於太陽電池表面，在僅考慮直接入射光的影響下，加裝MLA薄膜在晴空狀況下可使太陽電池整體發電效益增加1.8%，如圖一所示[1]。

本實驗室洪時傑在2011年利用網版印刷來製作MLA，經由網版及網版印刷機，將PMMA樹脂印刷在封裝太陽電池模組之表層材料(塞璐璐)，MLA利用表面張力之原理成形，再配合紫外線乾燥將其固化完成其凸透鏡結構，此結構的微透鏡有較廣的有效光入射角度，來增進漫射光的吸收，優點為低製造成本，生產時程極短、生產速度快、且大小尺寸之模組皆可製作，其於對正角 15° ，發電效益增加提升可達最大值4%，如圖二所示[2]。

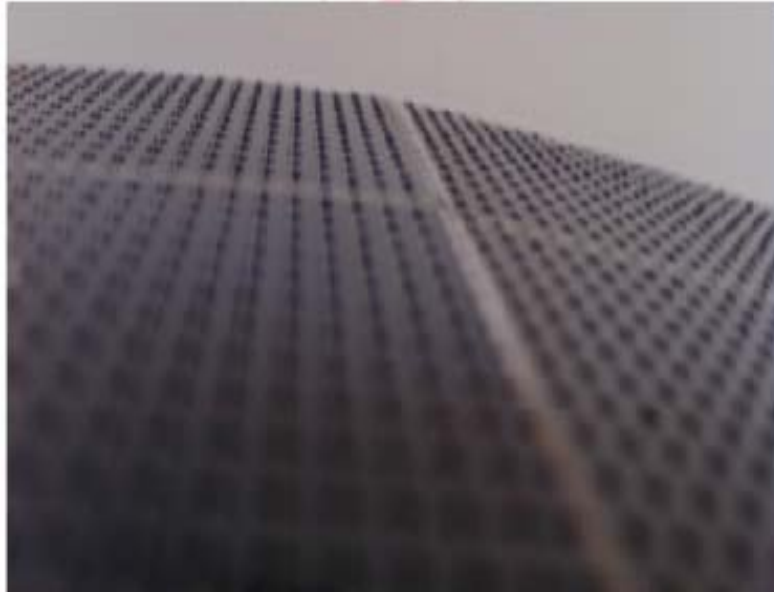
J.K. Tseng 等人在 2011 年，以類 LIGA(LIGA like) 製程，製作水平圓柱體微透鏡陣列(HCMA)的 PMMA 光學薄膜，應用在太陽電池，其發電效益增加 3.3%，如圖三所示[3]。

J.H. Karp 等人在 2010 年時，以 roll to roll 的方式，在玻璃上製作 MLA，具有 44.8% 光學效率，如圖四所示[4]。

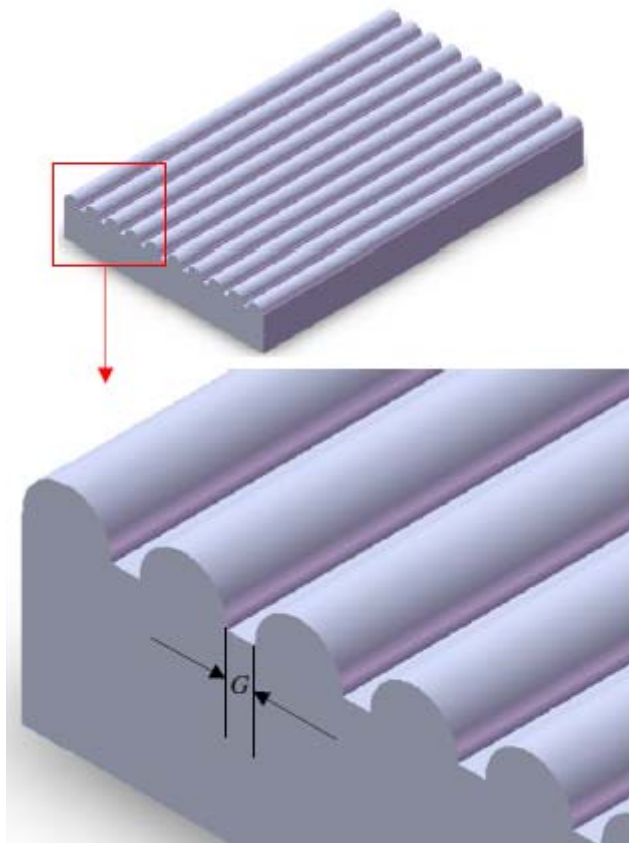
本研究以類 LIGA(LIGA like) 製程，製作一體成型封裝轉印之微透鏡陣列(Micro-lens Array, MLA)太陽電池模組，並藉由光學軟體輔助設計驗證，以探討微透鏡陣列對太陽電池模組之發電效益。由光學模擬軟體計算不同微透鏡焦距位置，量測太陽電池於不同對正角發電效益，再以類 LIGA(LIGA like) 製程，製作微透鏡陣列模仁並透過電鑄方式獲得高填充率的微透鏡陣列鍍模仁。鍍模仁於模組層壓封裝時，置於表材杜邦 ETFE 膜下，經熱壓轉印微透鏡陣列，獲得微透鏡陣列之太陽電池模組，進行實驗量測結果。



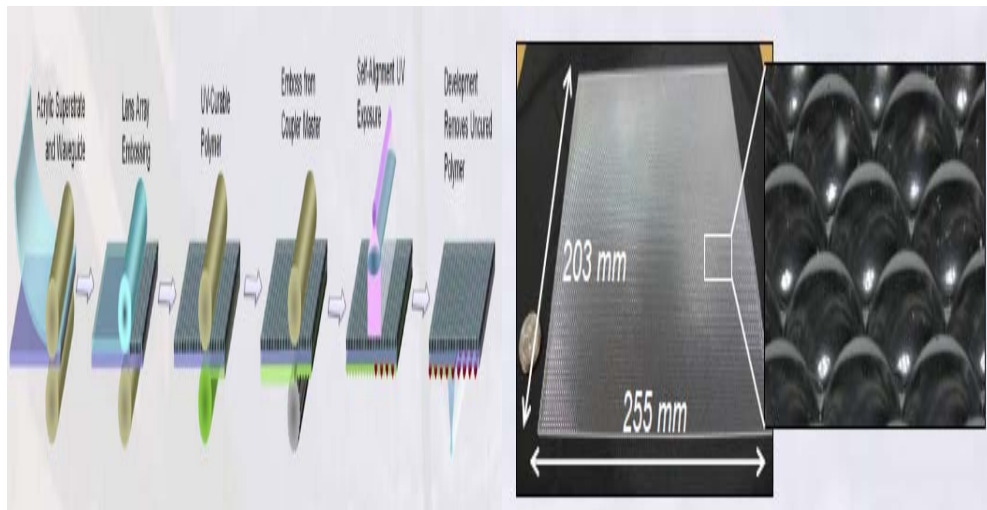
圖一 PDMS 光學薄膜太陽電池[1]



圖二 PMMA 太陽電池模組[2]



圖三 HCMA PMMA 光學薄膜製作示意圖[3]



圖四 MLA-glass[4]

參、研究方法與實驗

一、光學模擬

(一)微透鏡繪製設計及參數

由於光學元件或光學系統之尺寸微小化，其範圍大約在釐米至毫米左右。這將使的微光學系統達到體積小、質量輕等目的。Borrelli[5]提到透鏡之幾何形狀與其填充率(f.f)為影響整體透鏡的光線效率幾個條件之一，如果要得到大量之有效光源，填充率盡可能達到 100%。填充率受到幾何形狀與排列方式影響，其定義如圖五與圖六所示。如能使微透鏡排列更緊密，讓填充率提高，就能在有限之基底面積內置入更多微透鏡。換句話說，在相同基底面積內安排相同數量之微透鏡時，每一個微透鏡直徑尺寸就可設計較大些。除了微透鏡尺寸大小之考量外，整體透鏡的光線效率表現亦是品質優良之關鍵。如果以圓形微透鏡圖形的設計方向主要可分為中心距與幾何排列之陣列來設計的話，有兩種排列方式如下：

1.正交矩陣：

如圖五所示，圓形微透鏡以正交方式排列，假設每個圓形微透鏡四方邊緣與其周圍四個圓微透鏡邊緣間沒有間隙，則最大填充率計算如 3-1 式所示為 78.5%。

2.交錯矩陣：

如圖六所示，圓形微透鏡以交錯方式排列，假設每個圓形微透鏡邊緣與其周圍六個圓微透鏡邊緣間沒有間隙，則最大填充率計算如 3-2 式所示為 90.7%。

$$\text{Fill factor}_O = \frac{\pi(\frac{D}{2})^2}{Cd^2} \times 100\% = 78.5\% \quad (3-1)$$

$$\text{Fill factor}_H = \frac{\pi(\frac{D}{2})^2}{\frac{3Cd^2}{2\sqrt{3}}} \times 100\% = 90.7\% \quad (3-2)$$

本文將使用交錯矩陣的微透鏡進行研究，其設計參數如表一與表二所示。

(二)光學模擬軟體

為了驗證光學概念，本研究使用 Trace_Pro 光學軟體進行 MLA 太陽電池模組模擬，Trace_Pro 可進行分析傳統光學、設計照明系統、分析輻射度和光度。該軟體可在圖檔中可設定太陽電池模組各部位的材料及折射率、吸收率等，模擬太陽運行角度對太陽電池模組之對正角(Alignment angle)由 0°至 75°能量(圖七)，最後可得知該 MLA 太陽電池模組的光路及接收面之能量分佈狀況藉此評估 MLA 之效益。其利用 3-3 式得知其效益。

$$\delta = \frac{P_{\text{lens}} - P_{\text{non-lens}}}{P_{\text{non-lens}}} \times 100\% \quad (3-3)$$

依照設光學模擬設計流程圖(圖八)，可利用繪圖軟體將 MLA 太陽電池模組基本的模型畫出，其參數如圖九。圖中需具有三個基本

面，分別是 A.光源面、B.微透鏡陣列面、C.接收面，待繪圖完成後以.stp 檔案格式儲存，即可匯入光學模擬軟體中作分析，如圖十。其微透鏡設計參數如表一、表二與圖十一所示。

1. 光源面：

此面作為光學模擬軟體時的光源依據，可在其表面設定輻照度及光線數目，以下為本研究設定之參數：

Source type : Irradiance

Total rays: 500000

Irradiance power : 1000W/m²

Angular : Normal to surface

2. 微透鏡陣列面：

此面為將入射光折射至太陽電池的面，其設計之曲率可影響光折射後之角度以及分布情況，表面材質設定為杜邦公司所生產的 ETFE 膜，折射率為 1.38。

3. 接受面：

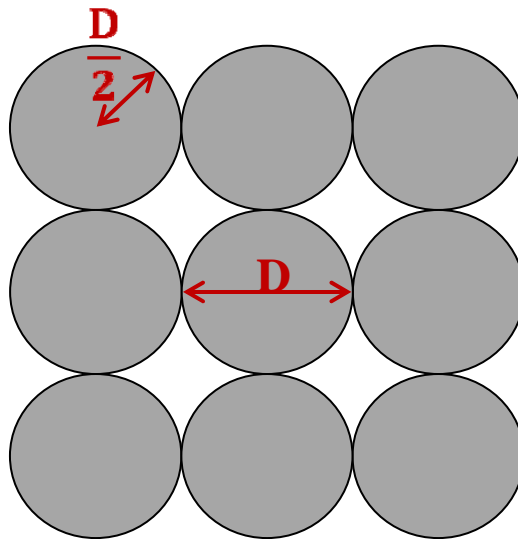
此面為太陽電池之位置，也是光折射後匯集所在處，可由此面獲得該 MLA 太陽電池模組之功率及能量分佈狀況。

表一 相同間距微透鏡設計參數

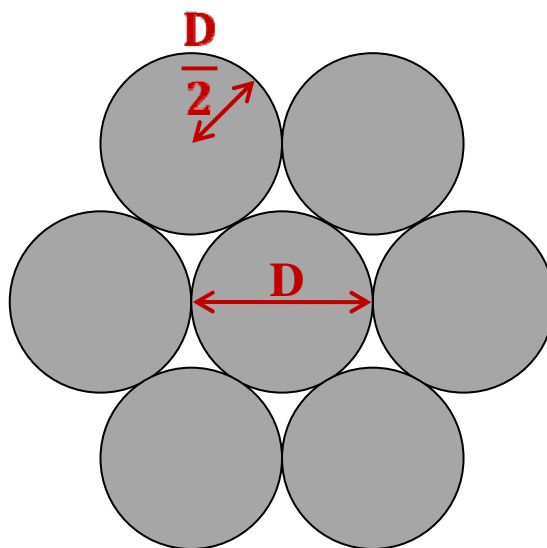
Diameter(μm)	100			150			200		
gap(μm)	25	50	75	25	50	75	25	50	75
$f.f(\%)$	58	40.3	29.6	66.6	51	40.3	71.6	58	48

表二 相同填充微透鏡設計參數

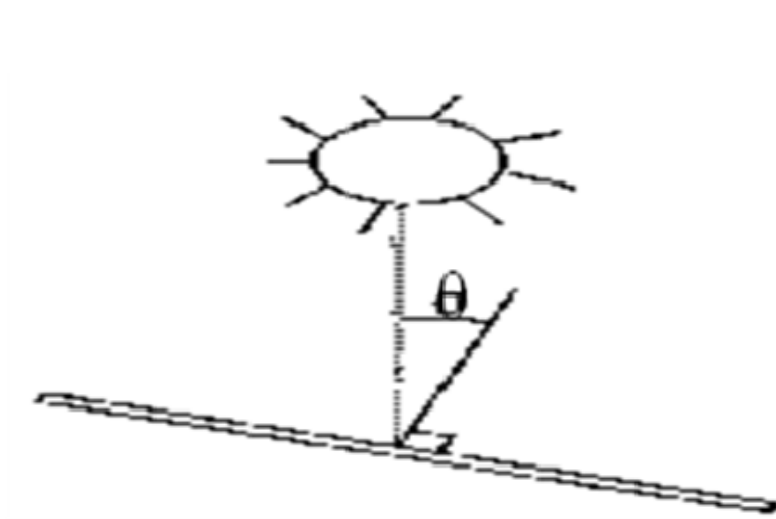
Diameter(μm)	100			150			200		
$f.f(\%)$	40	50	60	40	50	60	40	50	60
Center distance(μm)	150	134.7	122.9	225	200	184.4	301.2	269.4	245.8



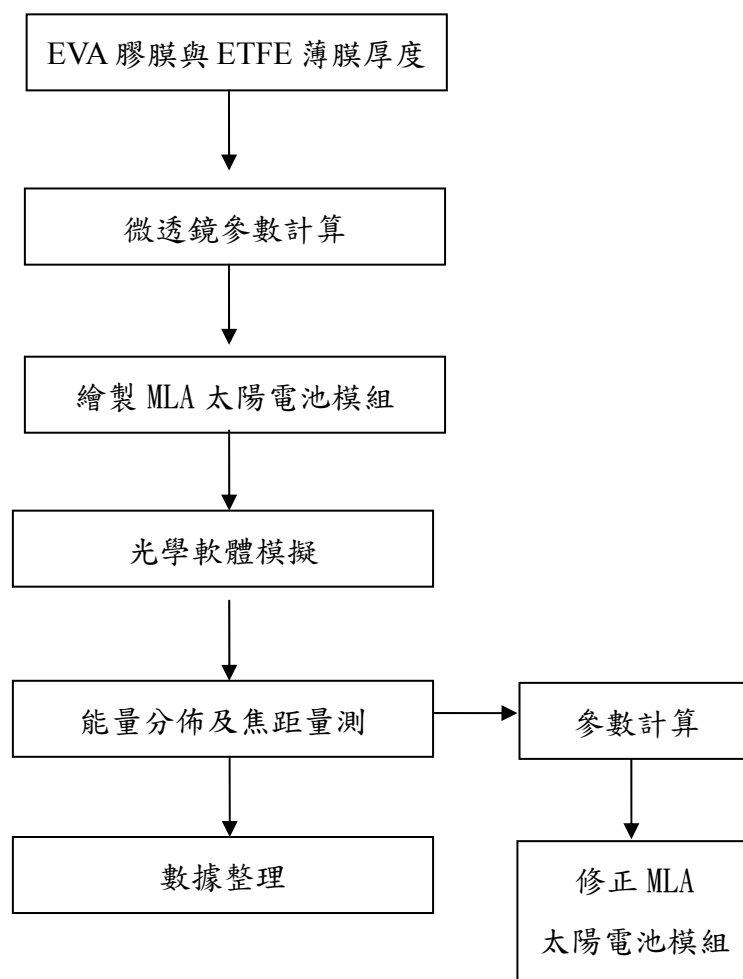
圖五 正交矩陣圖



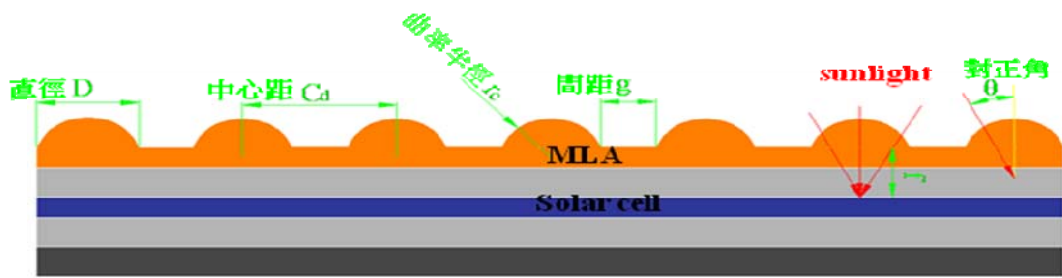
圖六 交錯矩陣圖



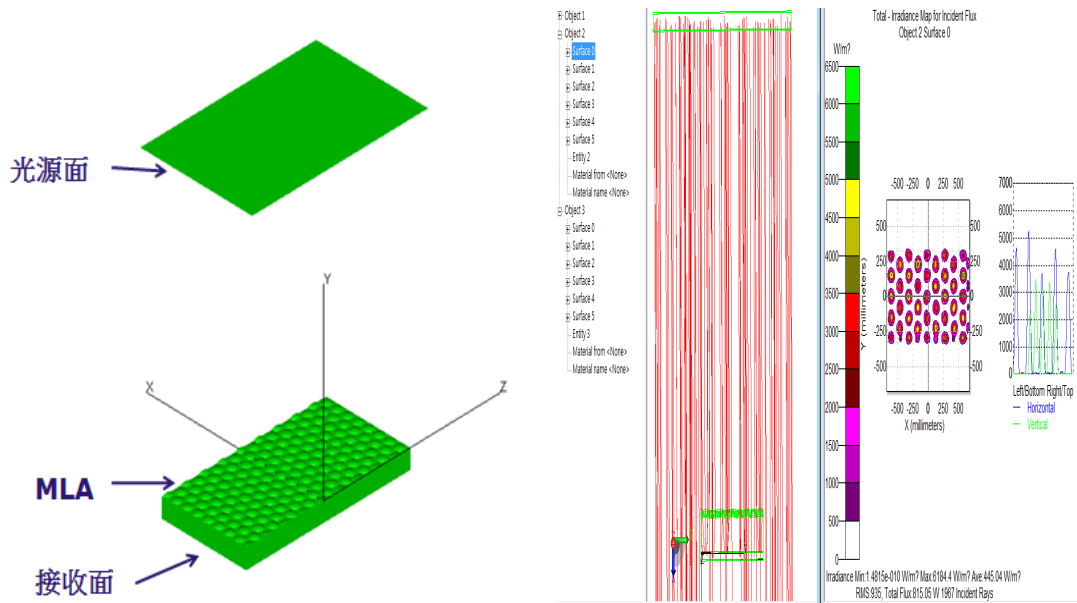
圖七 太陽電池模組之對正角(Alignment angle)示意圖



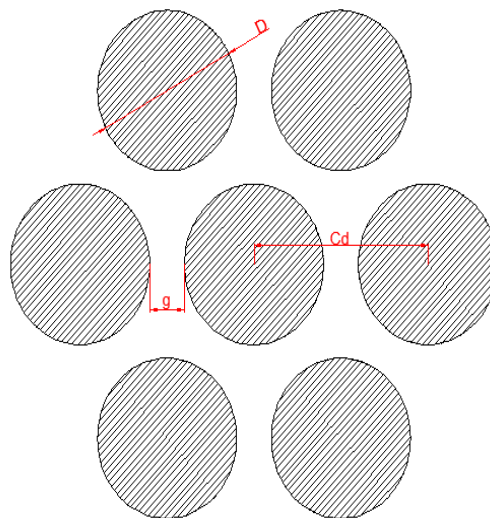
圖八 光學模擬設計流程圖



圖九 MLA 太陽電池模組



圖十 MLA 太陽電池模組之光學模擬



圖十一 微透鏡參數示意圖

二、微透鏡陣列太陽電池模組

本研究將以類 LIGA(LIGA like)製程分別以微影製程、精密電鑄、封裝轉印微透鏡之太陽電池模組三個製程製作 MLA 太陽電池模組。如圖十二所示。

(一) 微影製程

本研究使用熱熔回流(Thermal Reflow)，製作微透鏡陣列，在設計光罩透鏡大小後，接著利用微影製程進行電鑄前光阻模仁的製作，以下依序介紹每個實驗步驟：

1. 光罩設計

通常平面微光學透鏡之微結構，乃利用光罩讓光阻材料作選擇性感光，便可在矽晶圓上形成光罩上的圖案，再將此光阻材料做顯影以去除不需要的部份，得到所要的基礎結構。光罩設計可使用 AutoCAD 軟體來繪製所需的圖案，再把圖案轉移至鍍鉻的石英玻璃表面上，石英對紫外線具透明性，使顯像度極高，該玻璃的一面是有圖案的不透光層，在大部分的光罩中，此不透光層的材料是採用鉻，但玻璃光罩成本昂貴，通常使用高解析度轉印的塑膠光罩來進行實驗。圖十三設計的實驗光罩大小為 12x12cm，其中每個微透鏡直徑設計分別為 100、150 與 200 μm ，排列方式為交錯矩陣排列，而光罩所用的材質是塑膠光罩，交由光罩製作廠商進行製作。

2. 矽晶圓(Wafer)前處理

目的在於去除表面的無機物，表面氧化物、微塵、油漬，此步驟在微影製程中是相當重要的，因為在矽晶圓表面要是不乾淨的

話，在光阻旋塗時會產生分佈不均勻的現象，或是在軟烤時，光阻向內收縮時，光阻表面會產生缺陷。首先將矽晶圓利用丙酮(Acetone)清洗，利用去離子水(DI water)沖洗晶圓，清潔完後以氮氣槍清潔表面水分，再將矽晶圓至於加熱平台上去除多餘水分。

3. 光阻旋轉塗佈(Spin-coating)

以旋轉塗佈的方式利用光阻黏滯的特性，在矽晶圓上塗佈出一層平坦且厚度足夠的表面，而在光阻模仁選用方面，可選擇正光阻或負光阻，本研究使用正光阻進行實驗。

(1)正光阻(Positive photoresist)

利用光的能量使光阻受光照射後分子鍵被剪斷使其性質改變，因而在顯影時被溶解掉，未曝光部分則存留，此即為正光阻。

(2)負光阻(Negative photoresist)

反之，若感光後的光阻產生交鏈(Cross link)，使結構加強變成不溶解於顯影劑，未曝光部分則被溶解掉時稱之為負光阻。

4. 軟烤(Soft bake)

由於光阻是黏稠性的，因此在塗佈光阻後，烤去除光阻內大部份的有機溶劑，避免沾黏上光罩另外亦可增加和晶片附著力，並建立曝光特性，使光阻硬化，而主要考量的因素是光阻軟烤的時間和溫度的高低，因為光阻是一種容易受溫度變化的材料，其參數必須控制精準，例如軟考時間過長，會降低光阻的感光度，在後續顯影時間就會拉長，相對的就會損失線寬的大小，所以軟烤的時間是相當重要的。

5. 曝光(Exposure)

利用曝光機的 UV 光來進行曝光，透過 UV 光將光罩的圖形轉移到光阻上，由於本研究是使用正光阻，所以曝光後圖形也和光罩上一致，負光阻則反。

光阻厚度越厚所需吸收之曝光劑量越大，如此一來，才能順利的將光罩上的圖案轉移至晶片上，曝光劑量及時間會影響顯影的成效。如(4-1)式。

$$\text{曝光時間(sec)} = \frac{\text{所需曝光能量 (mJ)}}{\text{光源強度 (mW/cm}^2\text{)}} \quad (4-1)$$

6. 顯影(Develop)

顯影的目的是藉由顯影劑侵蝕出我們要的微結構，由於正光阻的材料特性是被 UV 光照到的部分會被顯影液去除，未曝光的部分則會被保留在矽晶圓上，本研究顯影劑是使用 AZ400K 與 DI Water 以 1：3 的比例做混合，顯影後用 DI Water 清洗乾淨，而顯影的過程中，有以下幾個因素會影響顯影效果：

(1)顯影時間：若時間太短，則受曝光的光阻會有殘留；若時間太長，則未受曝光的光阻也會被洗掉。

(2)圖形線寬大小：一般而言，線寬越寬，顯影時間越長。

(3)顯影時是否搖晃：搖晃會加快顯影速度，但顯影時間不易控制，且容易使所有的光阻都被洗去；但若不搖晃，光阻易停留在試片表面，不易散去。因此可以

觀察是否已顯影完畢，即是觀察光阻表面，當有緩慢移動的干涉條紋出現時，表示已開始顯影，當干涉條紋消失時，表示已顯影完畢，應立即將矽晶圓拿起，以 DI Water 清洗，否則光阻容易全部被洗去。如圖十四所示。

7. 熱熔回流(Thermal Reflow)

平面微光學透鏡製作中，基礎光阻結構便在顯影後成型。將此基礎光阻結構再做熱熔回流處理便可得到我們要的微透鏡。此熱熔回流是利用聚合物的特性，當環境溫度低於臨界溫度時，聚合物是在玻璃狀態，而高過此臨界溫度時，則成橡膠態，此臨界溫度稱為玻璃轉換溫度(Tg)。當光阻達到玻璃轉換溫度時，開始呈現近似流動的狀態而且趨向表面最小化來減少表面能，此為微透鏡製作的步驟當中最耗時。影響熱熔品質的參數主要有：

(1)熱熔溫度

溫度的高低常是影響熱熔品質的關鍵，原因是熱熔的溫度太低，則光阻內溶劑難以揮發，含太多溶劑之微結構，經過長時間放置很容易造成變形；適當的熱熔溫度會使光阻溶劑含量降至最低，可確保微結構的穩定性與不易再變形，此外更可使光阻表面因表面張力作用，產生圓滑外形並減少針孔現象。

(2)熱熔時間

當熱熔時間越長，光阻內溶劑揮發越多，則微結構品質越好。不過當超過某一熱熔時間，則對於光阻的微結構成形，就不再會有改變。

(3) 基材表面粗糙度

當光阻呈現熔融狀態時，由於表面張力，因此光阻會形成面積最小化之形狀，所以光阻會在基材上移動，此時若是基材表面太粗糙，導致光阻移動遇到了阻礙，就無法形成所需要的半球體狀之微透鏡。

8. 品質觀測(quality observation)

在黃光室中完成以上步驟就完成了光阻模仁，便要觀測微透鏡陣列外形和直徑。通常使用光學顯微鏡與掃描式電子顯微鏡來量測直徑、距離與微透鏡外觀。

其微透鏡之旋轉塗佈設計參數如表三與微影製程參數如表四。

(二) 精密電鑄

電鑄(electroforming)技術乃是利用電鍍(electroplating)原理，欲鑄的金屬材料置於陽極，被鑄的物體接於陰極，以欲鑄金屬離子的電解質溶液作為電鑄液。若為非導體之電鑄，須於被鑄體之表面塗上一層導電層，便可將欲鑄的金屬電鑄在被鑄體上，待電鑄厚度已達所需的要求後再與被鑄體脫離，即可完成電鑄之工件。而電鑄沉積的過程是一個一個原子堆積而成，故可以完全複製母模，所以電鑄成品的精確度取決於母模設計的精度，只要模具設計得當，其複製的精度可以達到微米等級，此時即可將此定義為精密電鑄。然而，由於電鑄層較厚，容易產生內應力變形及表面針孔等問題，所以必須將電鑄參數如鍍液成分、PH 值、溫度、添加劑等，加以控制管理。如圖十五所示。

本研究所使用之電鍍液為昇鉍理化有限公司所提供，主要採用胺基磺酸鎳浴，鍍浴的組成主要包含了胺基磺酸鎳、鹽化鎳、硼酸、應力調整劑與濕潤平整劑等，其主要成分與操作條件如表五。其中，胺基磺酸鎳為鎳離子的主要來源，可使鍍層有較低之內應力，而鹽化鎳可促進陽極溶解，增加導電度，硼酸可穩定鍍浴之 PH 值並可保持鍍層密著性、延展性，亦可藉由添加劑，如濕潤平整劑可降低鑄浴與母模的接觸角、介面活性劑降低底材的表面活化能、應力調整劑降低鍍層應力等使鑄層品質提高[6]。此外當電鑄浴之電流密度較高時，易造成鑄層燒焦、內應力上升等缺點，而在電流密度較低時，則是鑄層所花費的時間較長，不符合經濟效益，故在進行精密電鑄實驗時應選取較適中的電流密度，以達到品質良好且符合經濟效益的電鑄成品。

電鑄前處理：

1. 計算所需電流

在設定電源供應器前須先計算所需電流。如(4-2)式

$$\text{電流密度(ASD)} = \frac{\text{電流(mA)}}{\text{試片面積(cm}^2\text{)}} \quad (4-2)$$

2. 電鑄前試片的前處理

在電鑄前，試片同樣也需要前處理，通常以去離子水先沖洗試片，再以飽和胺基磺酸清洗表面，以 DI Water 沖洗乾淨，浸漬離形劑 20 分鐘，再用 DI Water 沖洗乾淨，最後用防鍍膠帶定義要電鑄的部份。

3. 預鍍 60 分鐘

為了增加鍍層跟試片之間的附著力，在正式電鍍前需先降低電流密度至 $0.8\text{A}/\text{cm}^2$ 電鍍 60 分鐘，由於電流密度降低鍍層沉積速度就減緩，因此沈積在試片表面的鎳金屬原子緻密性就會相對提高，所以會增大試片跟鍍層間的附著力。

4. 開始電鍍

當試片完成預鍍 60 分鐘以後，就可以開始用設定的電流來進行電鍍。

(三) 封裝轉印微透鏡之太陽電池模組

將鎳模仁置於杜邦 ETFE 膜下，即可得到所需要之 MLA 圖案。如圖十六所示，則可得到與鎳模仁上相同圖案之 MLA，即為我們所要製作的 MLA 太陽電池模組，因此，可藉由此技術大量複製模造。製作完成後利用太陽電池檢測機檢測太陽電池本身發電效率及電力特性。

本研究採用多晶矽太陽電池，厚度為 $190\mu\text{m}$ ，其光電轉換效率為 16%，焊接製程使用之助焊劑為無鉛水性助焊劑內含 80% 異丙醇及 20% 純水，焊線則為 0.1mm 厚 x5mm 寬之無鉛焊線，內含 96.5% 的錫及 3.5% 的銀，太陽電池以手工焊接進行串接。

從圖十六為 MLA 太陽電池模組封裝製程，得知太陽電池模組的結構可分五層，第一層表材為杜邦 ETFE 膜，最二層與第四層為 EVA，是一種熱固膠材料，受熱會融化成液態，冷卻後會再度成為

固態，具有隔絕空氣水氣，避免模組內的金屬氧化，可以將第三層之太陽電池包覆在模組內，可說是太陽電池的保護層，最底層的材料為 Tedlar，以下分別就材料性質與製程進行說明：

1. 杜邦ETFE膜[7]

ETFE(乙烯-四氟乙烯)，接近 Teflon 含氟聚合物。折射率為 1.38，有高透光率，具有抗輻射性、耐候性、抗撞擊性、對所有化學品都耐腐蝕，其電絕緣性不受溫度影響，拉伸強度高與優異的機械韌性，適於製作耐腐蝕件，減磨耐磨件、密封件、絕緣件和醫療器械零件。

2. Tedlar[®][8]

Tedlar[®]聚氟乙烯薄膜常為太陽電池模組業界使用，具有標準的抗紫外線和耐候性的背板材料。所有 Tedlar[®]膜是由聚氟乙烯製成，所以它有傑出的韌性，耐久性和耐候性 25 年以上的屬性。主要功能包括作為太陽電池模組的背板材料，防潮，保護實物的電線及其他敏感元件，電氣絕緣和減少電池的工作溫度。透過測試證明，Tedlar[®]膜完整持續保護太陽電池模塊，可實現超過 20 年使用壽命。

3. EVA

EVA 為醋酸乙烯與乙烯共聚合物，折射率為 1.49，具有高透光性、高交聯固化度、優越的黏著強度性、極高的容積電阻性、優越的機械強度、優越的光熱穩定性佳、耐腐蝕性容易使用等。EVA 在太陽電池封裝中的熱壓成形，即在基材上施加一層黏合劑，覆上一層薄膜或其他材料，加熱加壓，形成一個複合材料，固化溫度為

150°C，是一般太陽電池模組常用之封裝材料。

4. MLA太陽電池模組封裝製程

MLA 太陽電池模組熱壓成形過程如下：

- (1)疊層：依次將 ETFE 膜、EVA、太陽電池、EVA、TEDLAR 疊在一起。
- (2)抽真空：把上述疊層件放到太陽電池真空模組的下室。熱壓封裝機的上、下兩室同時抽真空。
- (3)加熱：熱壓封裝機的上下兩室保持真空，加熱模組，並維持 4 分鐘。
- (4)加壓：模組逐漸加壓到 100KPa。
- (5)保溫固化：在固化溫度 125°C 下，恆溫固化，維持 12 分。
- (6)冷卻：完成後，取出模組，放置室溫冷卻一段時間後，將鍍模仁與模組分離，並將模組多餘的 EVA 切掉。

表三 微透鏡之旋轉塗佈設計參數

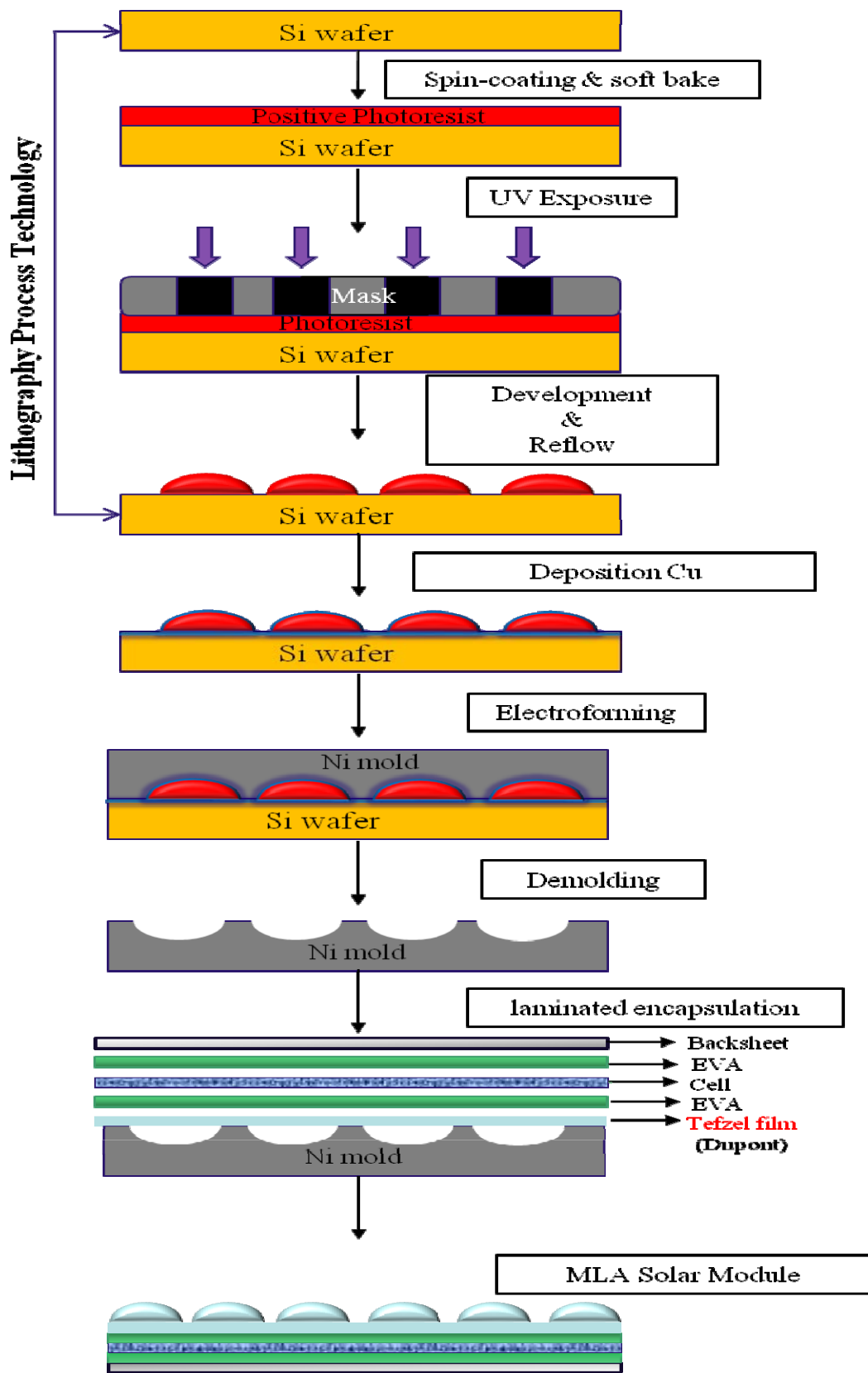
直徑(μm)	100	150	200
光阻塗佈厚度(μm)	3	9.4	18.2
光阻設計厚度(μm)	3.98	9.61	17.94
微透鏡設計高度(μm)	7.9	18.4	34.52

表四 AZ4620 光阻微影製程參數

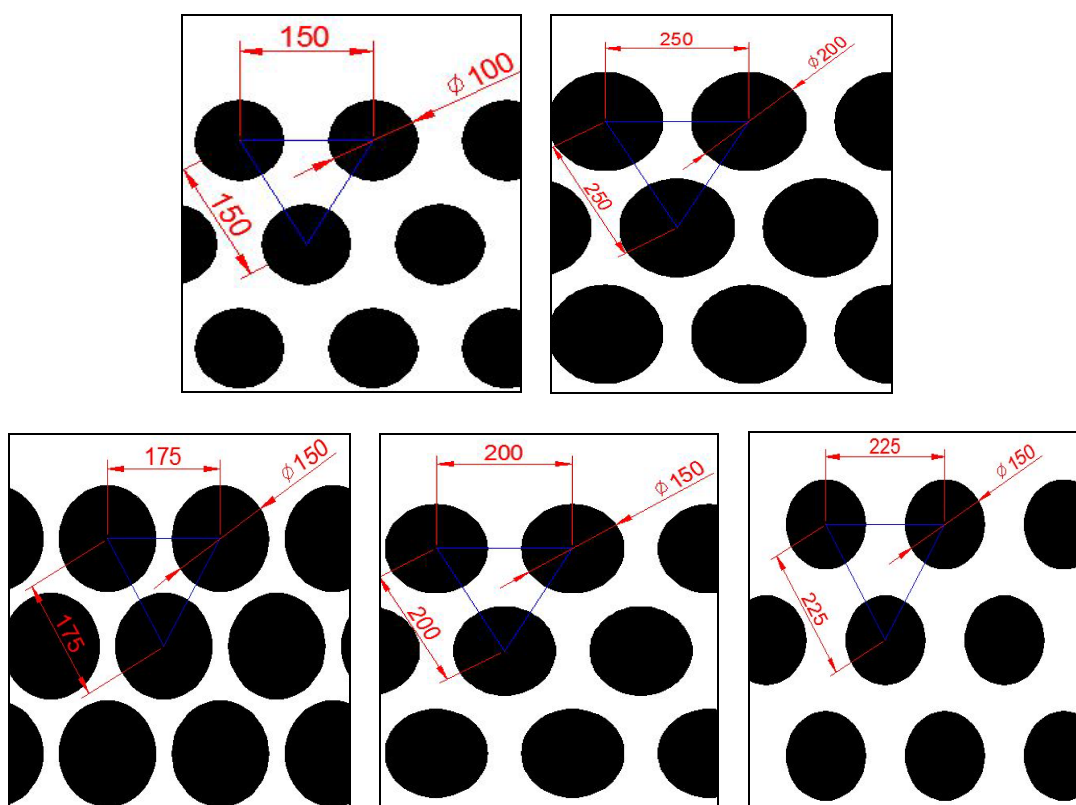
旋轉塗佈(Spin-coating)	D:100 μ m	D:150 μ m	D:200 μ m
	ω :3000rpm T : 3 μ m	ω :1500rpm T : 9.4 μ m	ω :1000rpm T : 18.2 μ m
軟烤(Soft bake)	100 $^{\circ}$ C		
曝光(Exposure)	2.5sec	4sec	6.3sec
顯影(Develop)	AZ400K(1) : DI Water(3)		
熱熔回流(Thermal Reflow)	150 $^{\circ}$ C		

表五 鍍浴之組成與操作條件

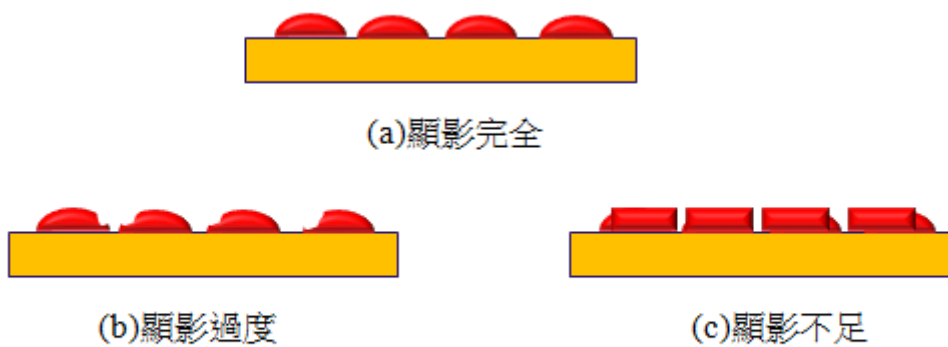
項目	理論條件	操作條件
胺基磺酸鎳	430~470g/l	450 g/l
鹽化鎳	2~7 g/l	3~5 g/l
硼酸	30~50 g/l	40 g/l
應力調整劑	2~10ml/ l	5 ml/ l
濕潤平整劑	2~8 ml/ l	5 ml/ l
電流密度	1~5 ASD	1 ASD
溫度	30~50 $^{\circ}$ C	45 $^{\circ}$ C
PH 值	2~4.4	3.8
沈積速率	沈積速率每 ASD 為 12.36 μ m/hr	



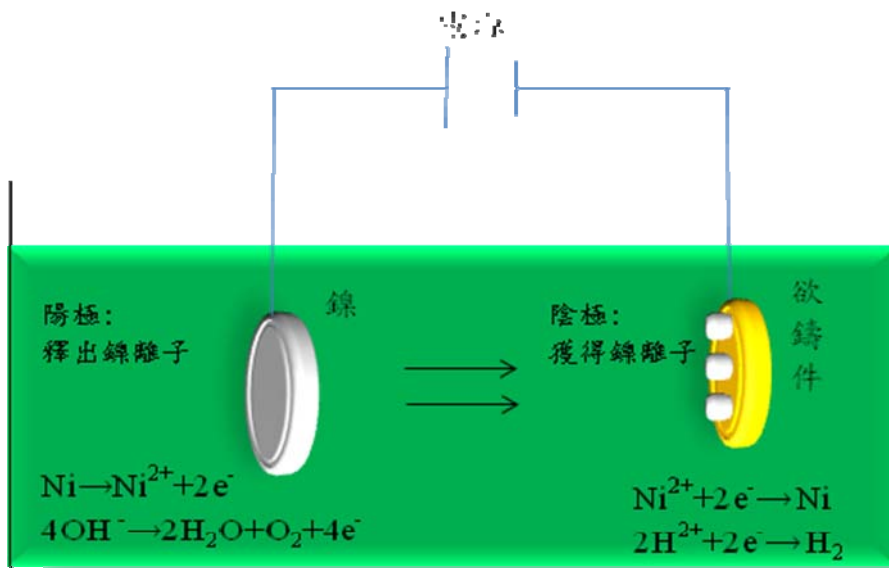
圖十二 微透鏡陣列太陽電池模組製作示意圖



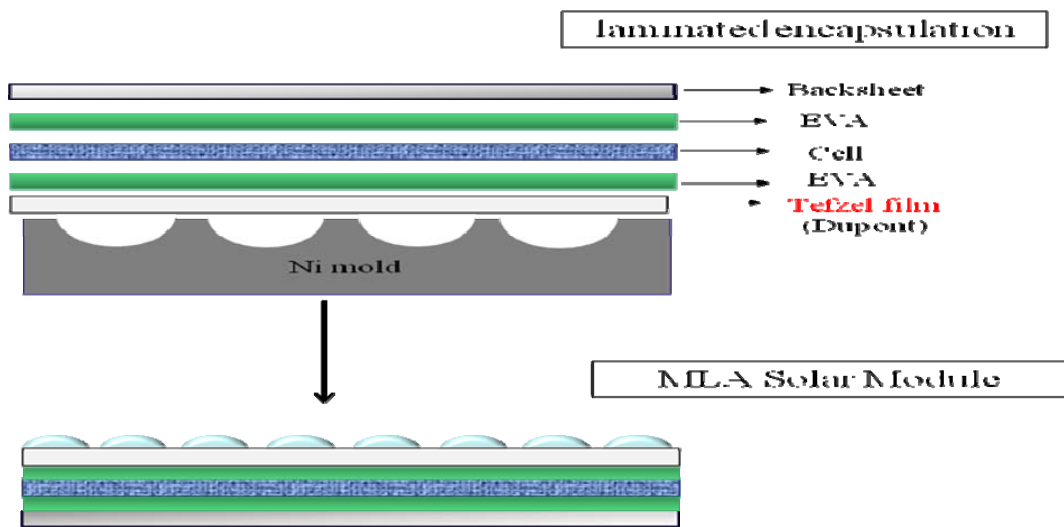
圖十三 實驗光罩設計參數圖單位： μm



圖十四 顯影程度比較圖



圖十五 電鑄原理示意圖



圖十六 MLA 太陽電池模組封裝製程

三、實驗設備

(一)太陽電池真空模組熱壓封裝機

本研究製程利用太陽電池真空模組熱壓封裝機，該機器的操作溫度最大為 180°C，具 3 個加熱區塊且溫度誤差值約在±5°C 左右，加熱速率從 30°C 至 150°C 可在 30 分鐘內完成，溫度控制是透過 proportional integral derivative(PID)去控制，冷卻方式可利用空氣自然冷卻，亦可注入純水做液態冷卻，最大工作的壓力值介於 0 到 1 大氣壓之間，工作台面全開至全閉合所需時間僅需 20 秒。如圖十七。

(二)太陽電池檢測機

本研究之太陽電池檢測機有效檢測面積，長度為 208mm、寬度為 208mm，約為 8 吋太陽電池面積。在光源部份，使用閃頻氙燈 (Xenon Flash Lamp)，其脈衝時間為 20ms，燈具使用壽命約為 50 萬次，在光譜分佈(Filtered to AM1.5 Global Spectrum)可符合 ASTM E927 Class A 等級要求，光源強度方面具 1000W/m²(從 200~1200 W/m² 亦可調整之)，光譜輻照度分佈為 IEC61215 標準需小於 ±25%。如圖十八。

(三)旋轉塗佈機

光阻塗佈是使用旋轉塗佈機 (WS-400A-6NPP, Laurell Technologies Corporation)如圖十九所示，將清洗完成晶圓放置於旋轉塗佈機(Spin Coater)如圖二十所示，以真空方式吸附於塗佈機之旋轉架上晶圓，光阻厚度決定於光阻塗佈的量與轉速。依試件厚度滴入適量的光阻液於晶圓中央位置，利用旋轉時候的離心力，使得在晶圓表面上的光阻慢慢往外圍移動，使多餘的光阻液去除且均勻散開佈滿整個晶圓，調控旋轉速度與時間來控制光阻在晶圓上的厚

度，使得晶圓表面覆上一層厚度均勻且無任何缺陷之光阻。



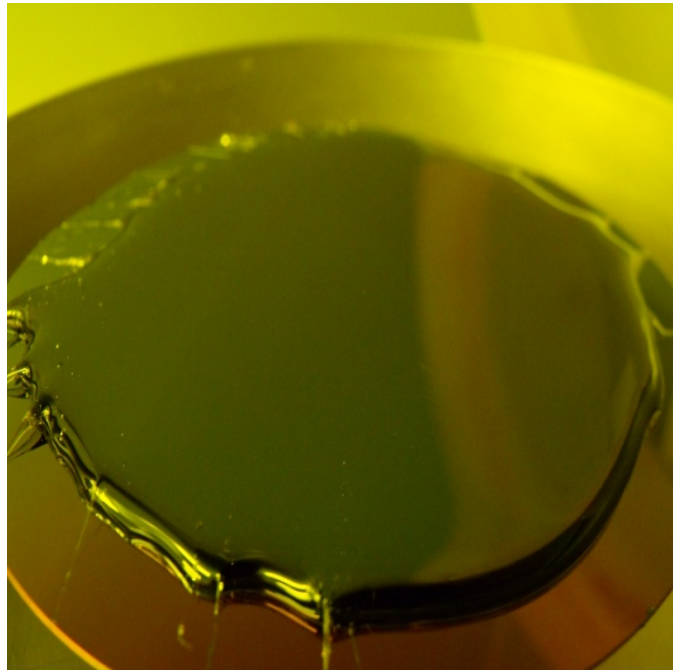
圖十七 太陽電池真空模組熱壓封裝機



圖十八太陽電池檢測機



圖十九 旋轉塗佈機



圖二十 光阻旋轉塗佈

伍、 結果與討論

本研究以光學軟體輔助設計微透鏡及類 LIGA(LIGA like)製程製作微透鏡模仁，進而以太陽電池模組封裝轉印與功率量測，藉由微透鏡陣列(Micro-lens Array, MLA)的填充率、微透鏡直徑及對正角等參數，探討太陽電池模組之發電功率。光學模擬軟體針對直徑 100 μm 、150 μm 及 200 μm 與填充率 40%、50%及 60%的微透鏡，計算太陽電池模組於不同對正角 0°~75°的發電功率，以類 LIGA 製程製作微透鏡陣列模仁，並透過電鑄成功地獲得高填充率的微透鏡陣列模仁。層壓封裝時模仁置於太陽電池模組表面，也就是製程進行時表材杜邦 ETFE 膜下，經熱壓轉印，獲得具微透鏡陣列表面之太陽電池模組，最後使用太陽電池檢測機量測其發電功率。

一、 光學模擬

杜邦 ETFE 膜具微透鏡時，若微透鏡直徑分別為 100 μm 、150 μm 、200 μm ，其太陽電池模組對正角為 0°時，因微透鏡高度不同而微透鏡曲面之最大接觸角分別為 20°、30°、36°。然而當太陽電池模組對正角於 45°時，其微透鏡曲面之接觸角為 56°、平面之接觸角為 48°，由於光線由光密介質射至光疏介質時，當折射角比入射角大時，會產生所謂的內反射。杜邦 ETFE 膜之折射率為 1.38，其臨界角為 46°[9]，所以當太陽電池模組對正角於 45°時，有部分光形成內反射，再經微透鏡二次折射至太陽電池模組，其示意圖如圖二十、圖二十一及圖二十二，進而增加功率效益。

(一) 間距對功率影響

當微透鏡直徑分別為 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 及 $200\mu\text{m}$ ，間距為 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 及 $75\mu\text{m}$ ，當對正角 $0^\circ \sim 30^\circ$ ，以直徑 $200\mu\text{m}$ ，間距 $25\mu\text{m}$ 時而言，其增加效益最高達 2.81%。主要原因是間距相等時，填充率隨直徑增加而增加，故填充率越高其效益越佳(如表六及圖二十三所示)。當對正角 45° ，微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ ，間距 $75\mu\text{m}$ ，其增加效益為 6.8%。

(二) 填充率對功率影響

當微透鏡直徑分別為 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 及 $200\mu\text{m}$ ，填充率為 40%、50%及 60%，當對正角 $0^\circ \sim 30^\circ$ ，以直徑為 $100\mu\text{m}$ ，填充率 60%時，其增加效益最高為 2.57%。因填充率相等時，微透鏡直徑為 $100\mu\text{m}$ ，填充率為 60%，微透鏡高度小，與光線之接觸角亦小，增加抗反射能力佳(如表七及圖二十四所示)。當對正角 45° ，微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ ，填充率為 40%，其增加效益為 6.22%，原因如圖二十五及圖二十六所示，在對正角 45° ，當填充率越高時，因微透鏡彼此間距小，光線會形成干涉造成部分反射，影響其效益。

二、實驗結果

(一) 微透鏡檢測

為了驗證設計的微透鏡尺寸是否與實驗的微透鏡相符，在每個製程的階段，皆以表面輪廓儀、金相顯微鏡及電子顯微鏡檢測。

表面輪廓儀量測光阻模仁，如表八為光阻模仁就原設計尺寸，因製程誤差，其微透鏡直徑(D)及微透鏡中心距(Cd)於 Reflow 前後尺寸變化，系列照片可參照圖二十七。另使用電子顯微鏡量測光阻模仁 Reflow 前直徑及厚度(t_{tra})如表九與 Reflow 後直徑、曲率半徑(r_c)、微透鏡高度(h_{lens})如表十所示，利用高解晰的圖像量測其光阻模仁如圖二十八所示。在微影製程中，在光阻顯影過後，其設計的尺寸幾近相同，但在光阻進行熱熔回流後，尺寸有明顯的差異且縮小，主要是因光阻加熱後，由固體轉換成液體時，其內聚力所造成的。

表十一與圖二十九所示以顯微鏡量測鎳模仁，其微透鏡尺寸明顯變大，因電鑄時，利用控制電流密度的方式，使鎳原子在沉積堆疊速率加快，製作高填充率的微透鏡陣列，造成與微透鏡模仁尺寸不符，但也補正光阻經加熱後內聚力縮小的尺寸。而微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ 之鎳模仁，則因微影製程中的顯影步驟，塗佈光阻厚度太薄，光阻於矽晶圓的附著力不足，顯影時部分微透鏡顯影過度，造成鎳模仁的電鑄失敗。

表十二與圖二十九所示，在微透鏡陣列(MLA)太陽電池模組封裝製程，使杜邦 ETFE 膜，壓印成形並進行封裝後，會因材料收縮後，相關尺寸(直徑、中心距)與微透鏡設計尺寸幾近相同。在微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ ；中心距 $175\mu\text{m}$ 時，因模仁之間間距太小關係，封裝後的 MLA 杜邦 ETFE 膜幾乎趨近於平面。

(二) MLA 太陽電池模組檢測

將封裝轉印完成的 MLA 太陽電池模組(如圖三十所示)利用太陽電池檢測機量測功率，以輻照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 量測，其量測方法以 15° 為一固定對正角，量測對正角 $0^\circ \sim 75^\circ$ 模組發電功率，實驗示意圖如圖三十一。檢測軟體可輸入輻照度、模組尺寸、模組最大電壓及最大電流如圖三十二。由於機台量測上的影響，都是造成實驗誤差的來源，為避免誤差對實驗結果影響實驗之不準確，所以利用取平均的方式估計其誤差值。

表十三、圖三十三與圖三十四所示，MLA 太陽電池模組功率，當微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ ，中心距 $200\mu\text{m}$ 、 $225\mu\text{m}$ ，對正角 $0^\circ \sim 60^\circ$ ，其效益有明顯上升趨勢，以對正角 60° 增加效益最高，分別為 1.56% 與 0.75% ；當微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ ，中心距 $175\mu\text{m}$ ，對正角 $0^\circ \sim 15^\circ$ ，其效益僅分別增加 0.12% 及 0.04% ，可從表十二與圖二十九得知，因鎳模仁之微透鏡彼此間距為 $15\mu\text{m}$ ，經封裝後的 MLA 杜邦 ETFE 膜幾乎趨近於平面，其效益沒有明顯增加；當微透鏡直徑 $200\mu\text{m}$ ，中心距 $250\mu\text{m}$ 時，對正角 $0^\circ \sim 60^\circ$ ，其效益皆有明顯提升，以對正角 60° 時，增加效益達 2.98% ；而當微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ ，中心距 $150\mu\text{m}$ 時，則因微影製程中製作不良，造成電鑄後的鎳模仁失敗，由於鎳模仁不平整的影響，封裝後會導致杜邦 ETFE 膜表面產生浪紋如圖三十五所示。

實驗結果顯示，MLA 杜邦 ETFE 膜入射太陽光之對正角由 $0^\circ \sim 60^\circ$ 時，微透鏡能利用光線聚焦的原理，將光線以小入射角度的方式

折射至下方太陽電池，增加光線入射在太陽電池上的輻射照度，另可間接降低太陽光的直接反射，減小光入射至太陽電池的角度，增加其二次折射的機會。微透鏡直徑 $200\mu\text{m}$ ，中心距 $250\mu\text{m}$ 時，填充率 58%，比微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ ，中心距 $200\mu\text{m}$ ，填充率 51%，填充率多出 7%，顯示當微透鏡在相同的面積下，微透鏡的陣列填充率越高，能提供最佳的功率。當微透鏡直徑為 $100\mu\text{m}$ ，中心距 $150\mu\text{m}$ ，反而下降，由於鐳模仁不平整的影響也導致杜邦 ETFE 膜表面產生浪紋，若能改善鐳模仁也能增加太陽電池模組功率。比較模擬與實驗結果，就微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ 、中心距 $200\mu\text{m}$ ，於對正角 0° 時，其效益分別為 0.77% 與 0.91%，誤差值為 0.14%；直徑 $150\mu\text{m}$ 、中心距 $225\mu\text{m}$ ，於對正角 0° 時，其效益分別為 0.46% 與 0.53%，誤差值為 0.07%；直徑 $200\mu\text{m}$ 、中心距 $250\mu\text{m}$ ，於對正角 0° 時，其效益分別為 1.24% 與 1.39%，誤差值為 0.15%，於對正角 15° 時，其效益分別為 1.81% 與 1.32%，誤差值為 -0.49% ，於對正角 30° 時，其效益分別為 2.37% 與 2.32%，誤差值為 -0.05% ，於對正角 45° 時，其效益分別為 4.08% 與 2.12%，誤差值為 -1.96% ，顯示模擬結果於 $0^\circ \sim 45^\circ$ 有相當高的可靠性，若能提升微透鏡製作能力技術，可改善實驗結果效益。

表六 光學模擬之間距對功率影響

D(μm)	100			150			200		
θ \ / g(μm)	25	50	75	25	50	75	25	50	75
0°	838.97 (1.28%)	833.18 (0.58%)	830.91 (0.3%)	840.48 (1.46%)	834.77 (0.77%)	832.24 (0.46%)	841.67 (1.6%)	838.71 (1.24%)	833.83 (0.66%)
15°	822.91 (1.84%)	819.09 (1.36%)	813.03 (0.61%)	824.44 (2.03%)	820.82 (1.58%)	819.36 (1.4%)	826.71 (2.31%)	822.67 (1.81%)	821.35 (1.64%)
30°	734.82 (2.44%)	728.46 (1.55%)	722.39 (0.7%)	736.36 (2.65%)	734.71 (2.42%)	727.18 (1.37%)	737.51 (2.81%)	734.33 (2.37%)	731.65 (1.99%)
45°	573.97 (4.11%)	585.60 (6.22%)	588.81 (6.8%)	571.18 (3.6%)	579.96 (5.19%)	585.33 (6.17%)	570.61 (3.5%)	573.84 (4.08%)	577.95 (4.83%)
60°	220.10 (-19.51%)	279.20 (2.11%)	285.57 (4.44%)	250.48 (-8.4%)	277.22 (1.38%)	278.12 (1.71%)	200.92 (-26.52%)	206.71 (-24.4%)	270.82 (-0.96%)
75°	22.87 (-54.64%)	33.17 (-34.22%)	41.54 (-17.62%)	18.21 (-63.88%)	28.23 (-44.01%)	32.98 (-34.58%)	16.41 (-67.46%)	19.28 (-61.76%)	24.16 (-52.09%)

表七 光學模擬之填充率對功率影響

D(μm)	100			150			200		
f.f(%) θ	40	50	60	40	50	60	40	50	60
0°	833.18 (0.58%)	835.51 (0.86%)	839.24 (1.31%)	832.24 (0.46%)	834.77 (0.77%)	839.13 (1.3%)	832.11 (0.45%)	834.15 (0.69%)	838.71 (1.25%)
15°	819.09 (1.36%)	821.04 (1.61%)	823.65 (1.93%)	819.36 (1.4%)	820.82 (1.58%)	823.56 (1.92%)	818.48 (1.29%)	821.84 (1.7%)	823.11 (1.86%)
30°	728.46 (1.55%)	733.52 (2.25%)	735.76 (2.57%)	727.18 (1.37%)	734.71 (2.42%)	735.62 (2.55%)	725.32 (1.11%)	731.92 (2.03%)	734.78 (2.43%)
45°	585.60 (6.22%)	580.56 (5.3%)	573.06 (3.94%)	585.33 (6.17%)	579.96 (5.19%)	572.95 (3.92%)	583.22 (5.79%)	577.89 (4.82%)	572.48 (3.84%)
60°	279.20 (2.11%)	278.62 (1.89%)	219.45 (-19.74%)	278.12 (1.71%)	277.22 (1.38%)	252.66 (-7.6%)	200.92 (0.75%)	270.04 (-1.24%)	204.31 (-25.28%)
75°	33.17 (-34.22%)	28.23 (-44.02%)	21.16 (-58.04%)	32.98 (-34.58%)	28.23 (-44.01%)	20.38 (-59.57%)	16.41 (-39.79%)	24 (-52.41%)	18.66 (-62.98%)

表八 光阻模仁 Reflow 前後之表面輪廓儀量測尺寸

實際尺寸 設計尺寸		Reflow 前		Reflow 後	
D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)
100	150	98.5±0.5	149±1	97±1	147±1
150	175	152±1	173±2	148±1	173±1
150	200	151±1	198.5±1	139±1	198±1
150	225	151±1	224±2	142.5±0.5	221±1
200	250	200.5±0.5	250±1	188.5±1	245.5±1

表九 光阻模仁 Reflow 前之電子顯微鏡量測

設計尺寸 \ 實際尺寸		光阻	
D(μm)	t _{tra} (μm)	D(μm)	t _{tra} (μm)
100	3.98	94.14	2.95
150	9.61	151.3	8.63
200	17.94	204.78	16.77

表十 光阻模仁 Reflow 後之電子顯微鏡量測

設計尺寸 \ 實際尺寸			Micro-lens		
D(μm)	r _c (μm)	h _{lens} (μm)	D(μm)	r _c (μm)	h _{lens} (μm)
100	162.12	7.9	89.32	209.03	6.79
150	162.12	18.4	138.38	267.41	9.11
200	162.12	34.52	186.49	207.58	33.5

表十一 電鑄鎳模仁於顯微鏡檢測

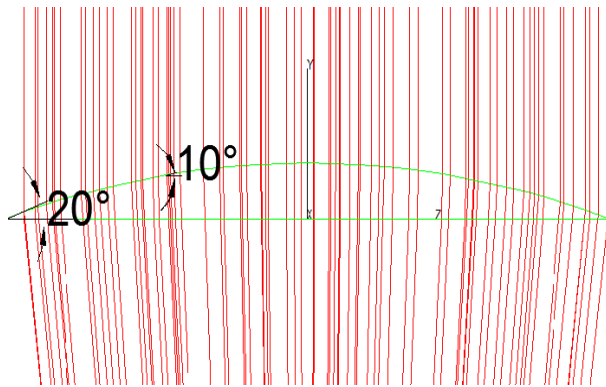
設計尺寸 \ 實際尺寸		電鑄前		電鑄後	
D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)
100	150	97±1	147±1	104.5±0.5	145±1
150	175	148±1	173±1	167±1	181.7±1
150	200	139±1	198±1	162.1±0.5	202.7±1
150	225	142.5±0.5	221±1	155.3±1	226±1
200	250	188.5±1	245.5±1	210±0.5	256.1±1

表十二 MLA 杜邦 ETFE 膜於顯微鏡量測

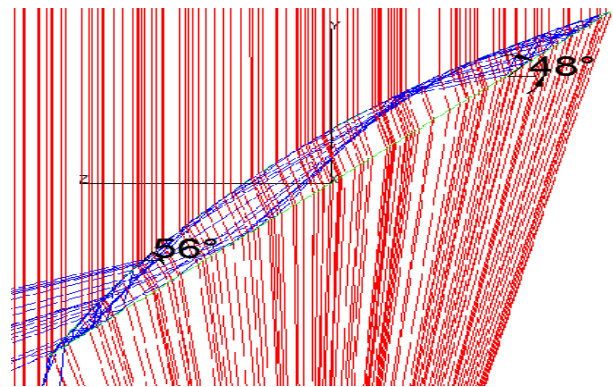
實際尺寸 設計尺寸		鎳模仁		MLA 杜邦 ETFE 膜	
D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)	D(μm)	Cd(μm)
100	150	104.5 \pm 0.5	145 \pm 1	102.4 \pm 0.5	147.8 \pm 2
150	175	167 \pm 1	181.7 \pm 1	152.2 \pm 1	178 \pm 0.5
150	200	162.1 \pm 0.5	202.7 \pm 1	150.7 \pm 1	199.9 \pm 1
150	225	155.3 \pm 1	226 \pm 1	151.2 \pm 1	226.9 \pm 1
200	250	210 \pm 0.5	256.1 \pm 1	201.6 \pm 1	252.9 \pm 1

表十三 實驗結果於不同對正角之功率

P(W) (δ) θ	non-lens	lens- D=100 Cd=150	lens- D=150 Cd=175	lens- D=150 Cd=200	lens- D=150 Cd=225	lens- D=200 Cd=250
0°	0.5107	0.4869 (-4.66%)	0.5113 (0.12%)	0.5154 (0.91%)	0.5134 (0.53%)	0.5178 (1.39%)
15°	0.4953	0.4678 (-5.55%)	0.4955 (0.04%)	0.4982 (0.59%)	0.4969 (0.32%)	0.5018 (1.32%)
30°	0.4432	0.4176 (-5.78%)	0.4428 (-0.09%)	0.4475 (0.96%)	0.4451 (0.43%)	0.4535 (2.32%)
45°	0.3586	0.3368 (-6.09%)	0.3577 (-2.5%)	0.3624 (1.04%)	0.3608 (0.61%)	0.3663 (2.12%)
60°	0.2409	0.23 (-4.51%)	0.2388 (-0.87%)	0.2446 (1.56%)	0.2427 (0.75%)	0.2481 (2.98%)
75°	0.1052	0.0932 (-11.4%)	0.1043 (-0.86%)	0.1022 (-2.85%)	0.101 (-3.99%)	0.1043 (-0.9%)

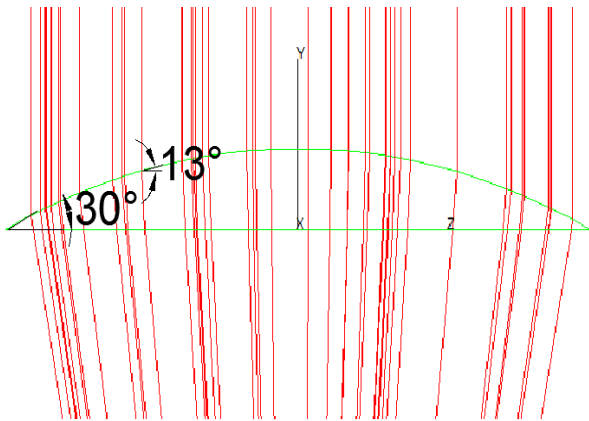


(A)對正角 0°

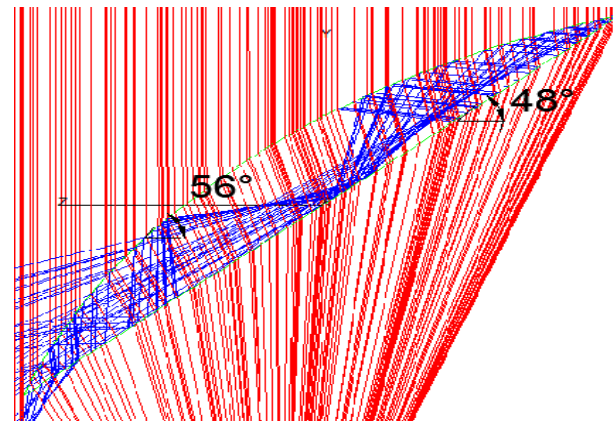


(B)對正角 45°

圖二十 微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ 之光線路圖

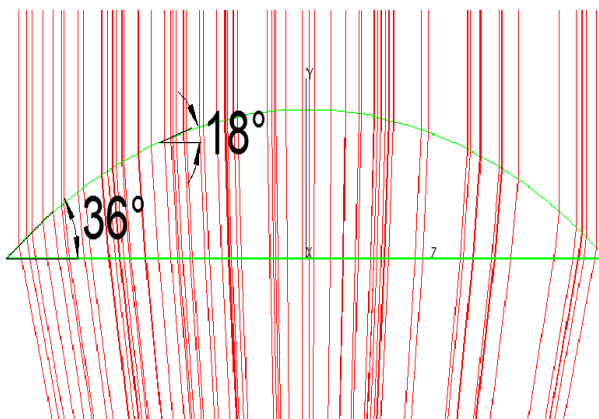


(A)對正角 0°

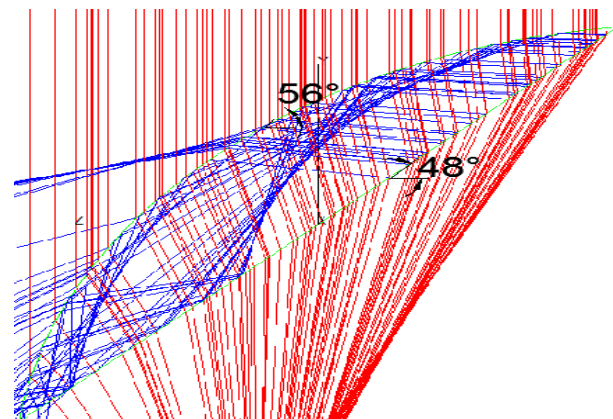


(B)對正角 45°

圖二十一 微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ 之光路圖

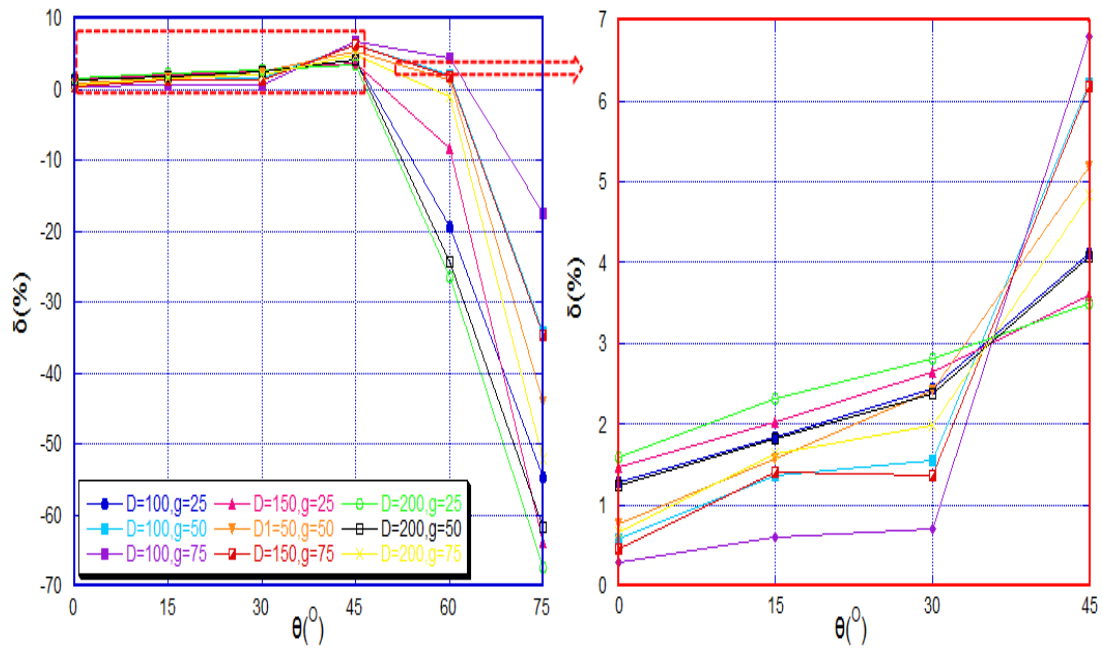


(A)對正角 0°

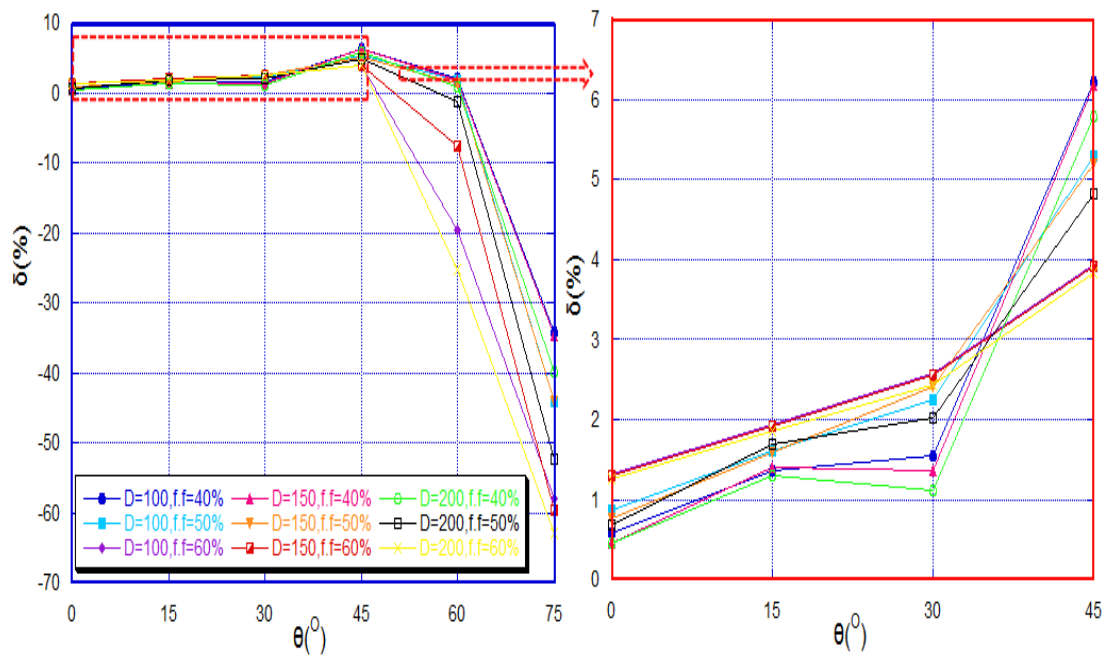


(B)對正角 45°

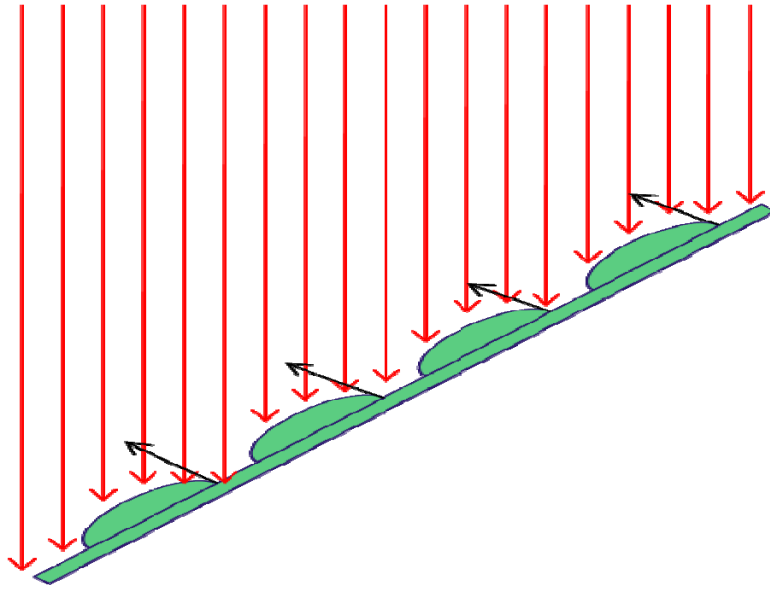
圖二十二 微透鏡直徑 $200\mu\text{m}$ 之光路圖



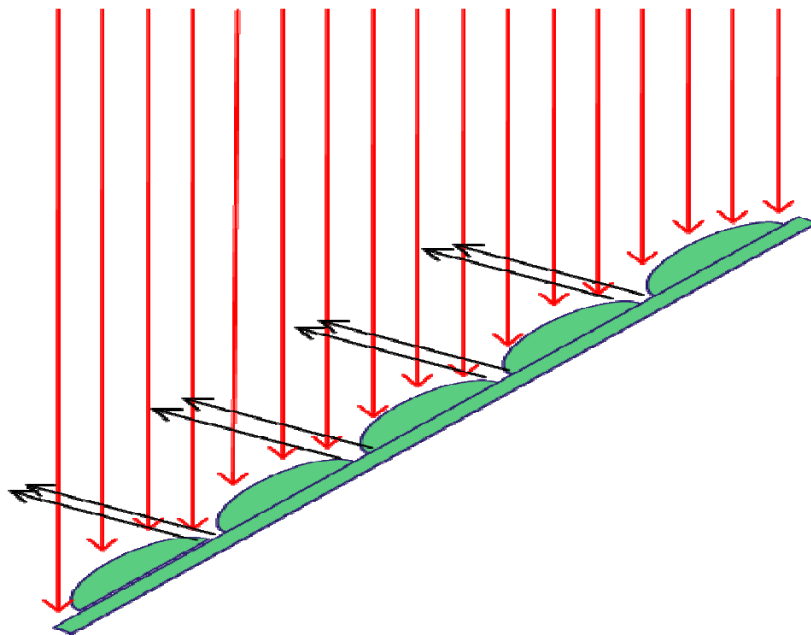
圖二十三 光學模擬結果之間距對功率影響



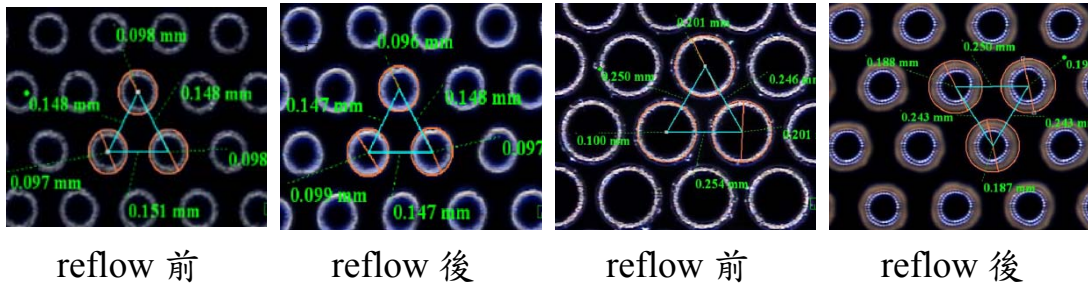
圖二十四 光學模擬結果之填充率對功率影響



圖二十五 微透鏡填充率 40%之光路圖

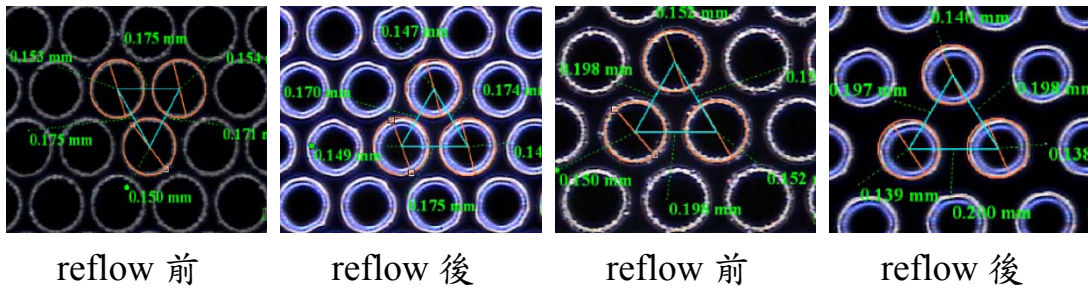


圖二十六 微透鏡填充率 60%之光路圖



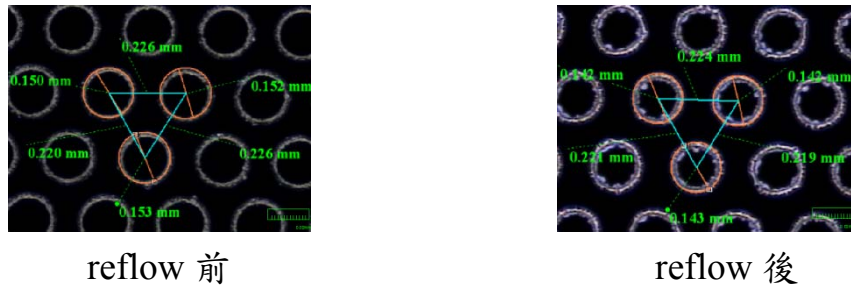
D=100µm ; Cd=150µm

D=200µm ; Cd=250µm



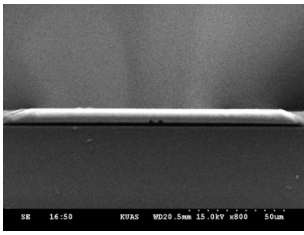
D=150µm ; Cd=175µm

D=150µm ; Cd=200µm

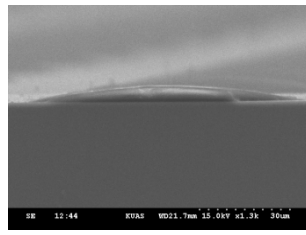


D=150µm ; Cd=225µm

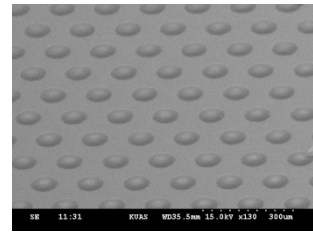
圖二十七 表面輪廓儀拍攝於微影製程之微透鏡



reflow 前

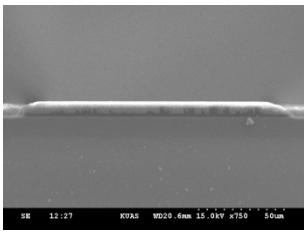


reflow 後

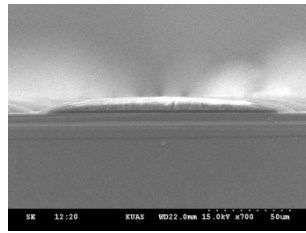


MLA

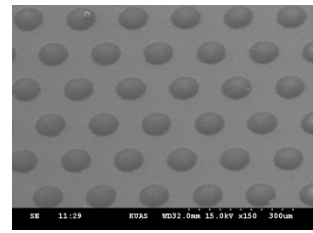
D=100 μ m



reflow 前

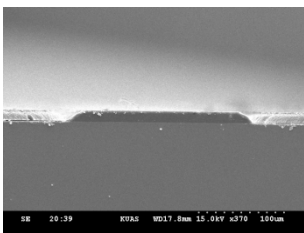


reflow 後

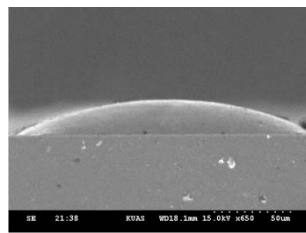


MLA

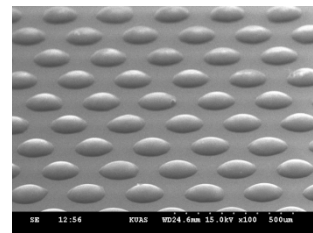
D=150 μ m



reflow 前



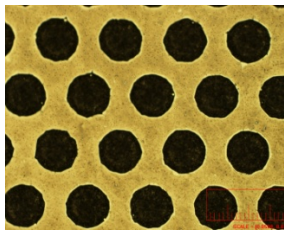
reflow 後



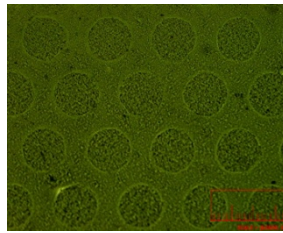
MLA

D=200 μ m

圖二十八 SEM 拍攝於微影製程之微透鏡

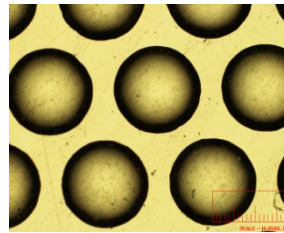


Ni mold

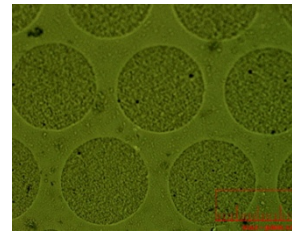


MLA ETFE film

D=100 μ m ; Cd=150 μ m

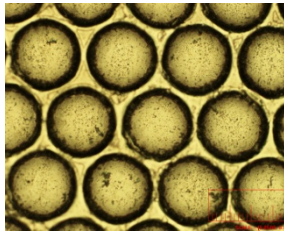


Ni mold

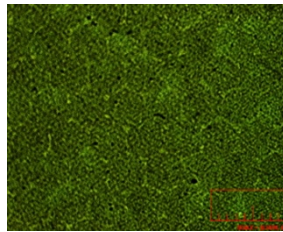


MLA ETFE film

D=200 μ m ; Cd=250 μ m

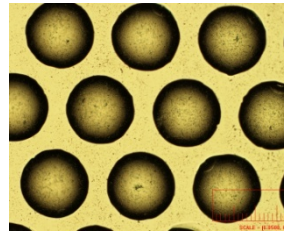


Ni mold

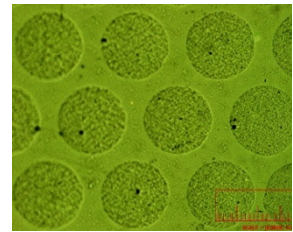


MLA ETFE film

D=150 μ m ; Cd=175 μ m

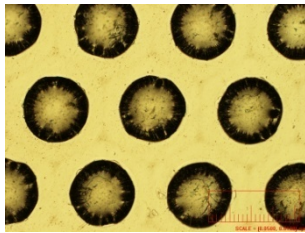


Ni mold

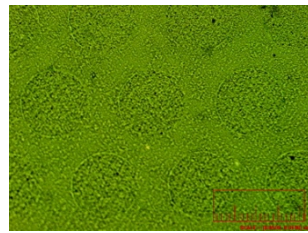


MLA ETFE film

D=150 μ m ; Cd=200 μ m



Ni mold



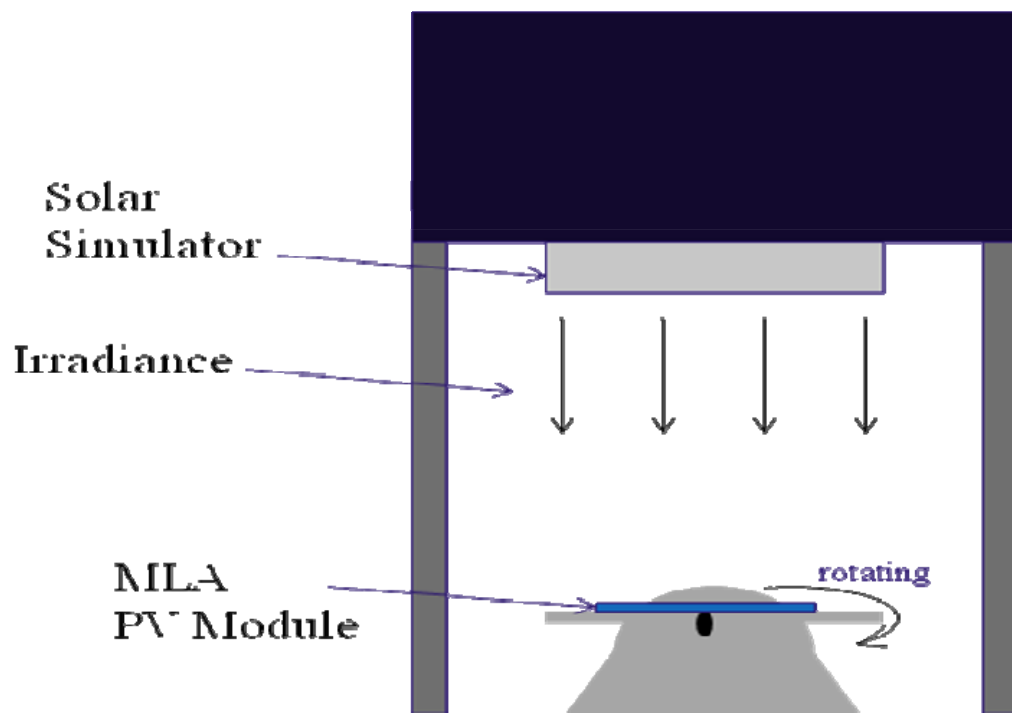
MLA ETFE film

D=150 μ m ; Cd=225 μ m

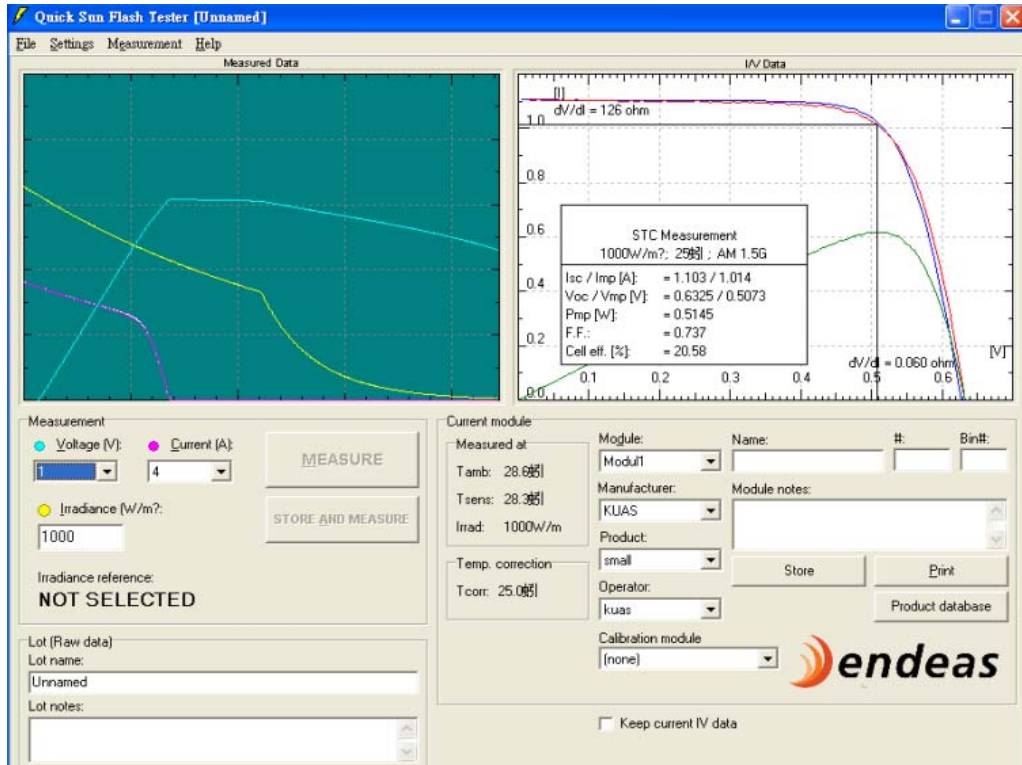
圖二十九 光學顯微鏡拍攝於鎳模仁與 MLA ETFE 膜



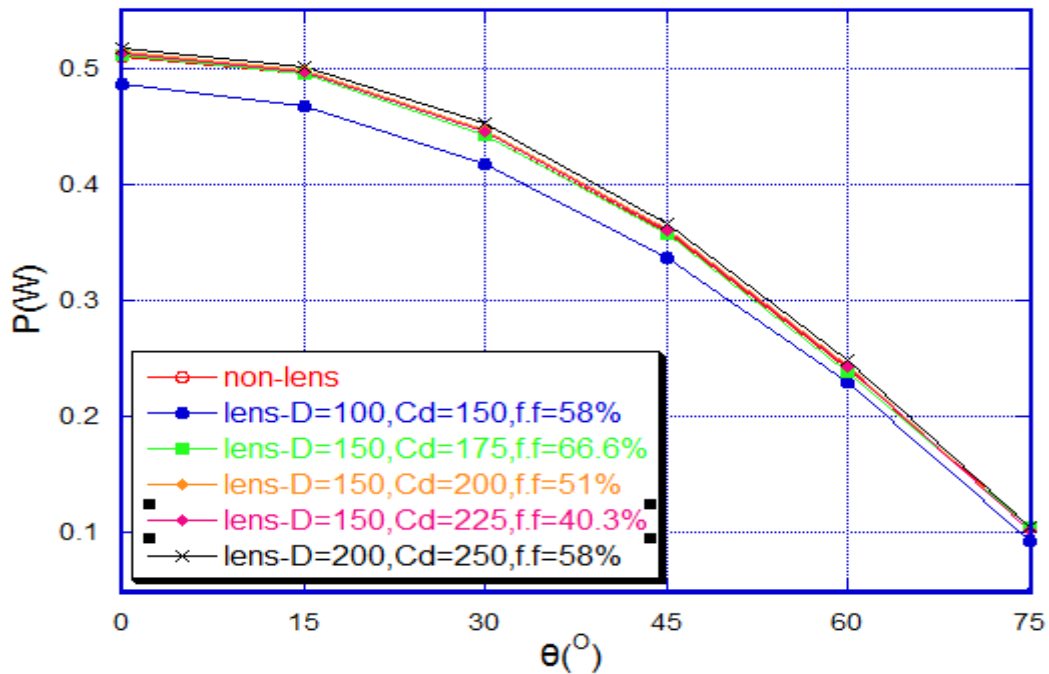
圖三十 MLA 太陽電池模組



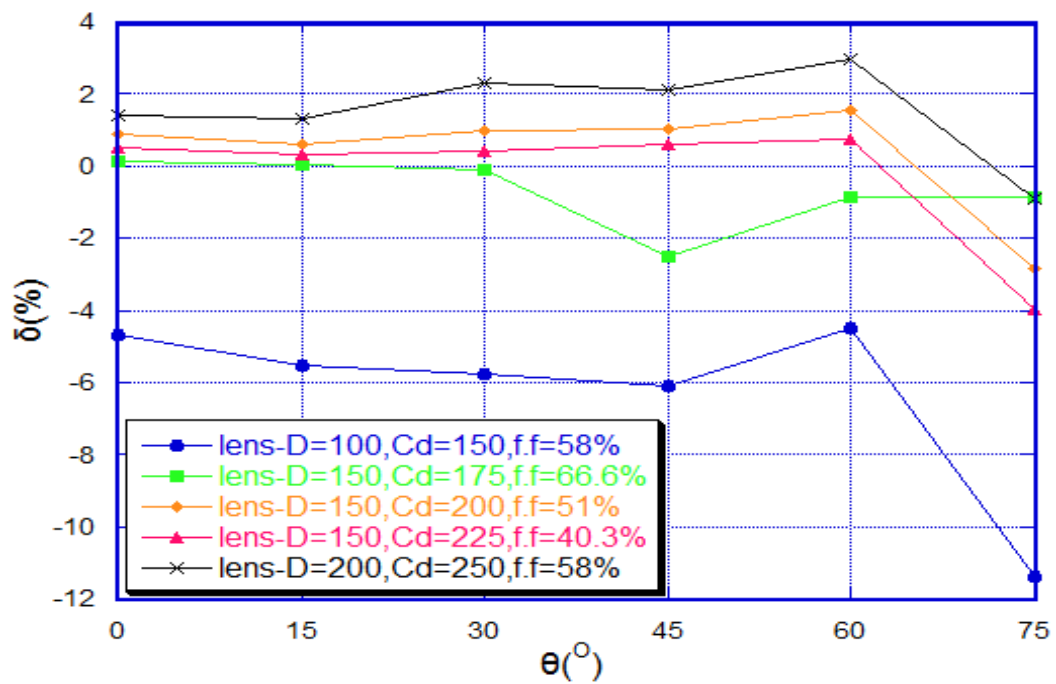
圖三十一 MLA 太陽電池模組量測示意圖



圖三十二 太陽電池檢測機軟體



圖三十三 實驗結果之不同直徑透鏡於對正角之功率



圖三十四 實驗結果之不同直徑透鏡於對正角之效益



圖三十五 微透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ 之杜邦 ETFE 膜表面浪紋

伍、結論與未來工作

本研究在太陽電池模組封裝表材—ETFE 膜製作微透鏡陣列，經實驗量測結果，微透鏡陣列有效降低入射光反射和增加太陽電池表面二次折射，達到抗反射的作用，使太陽電池模組在對正角 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 都能擁有穩定的輸出功率，並提昇模組發電效益 2% 以上，此封裝技術具微透鏡陣列與太陽電池模組一體成型及可大量翻造節省成本之優點。

研究重點是設計微透鏡陣列，定義不同微透鏡直徑與中心距，利用光學模擬軟體設計微透鏡，得知微透鏡參數對太陽電池模組發電效益影響。以下針對本研究之結論條列如下：

1. 模擬結果得知，微透鏡於對正角 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 皆有增加效益，當微透鏡間距相等時，微透鏡直徑為 $200\mu\text{m}$ ，因填充率隨直徑增加而增加，其功率增加效益最佳；當微透鏡填充率相等時，微透鏡直徑為 $100\mu\text{m}$ ，因微透鏡高度較小，與光線之接觸角亦小，增加抗反射能力，可降低直接反射。
2. 實驗參數結果得知，微透鏡陣列應用在太陽電池模組，當微透鏡直徑 $200\mu\text{m}$ ，中心距 $250\mu\text{m}$ ，填充率 58%，最高增加效益為 2.98%，優於微透鏡直徑 $150\mu\text{m}$ ，中心距 $200\mu\text{m}$ ，填充率 51%，最高增加效益為 1.56%，顯示當微透鏡在相同的面積下，微透鏡的陣列填充率越高，能提供最佳的功率增益。當太陽電池模組在入射太陽光對正角 60° 時，其功率增加最大效益為 2.98%，可有效降低入射光的直接反射，增加二次折射，此結果可運用在高緯度與太陽日照時間不足地方，提供穩定的輸出功率。

在未來對於本研究之微透鏡可針對下列問題作深入探討：

1. 微透鏡之直徑與陣列填充率影響太陽電池功率，可得知當填充率越高其效果越好，但相對在 LIGA like 製程上製作微透鏡技術相對要提高，如填充率的增加及光阻 reflow 變形與收縮，還需考慮到封裝固化溫度、回溫時間及加壓時間。
2. 因目前 LIGA like 設備在製作上最大只能 4" 晶圓大小，若爾後有能製作更大能力的設備，便能應用在標準型太陽電池模組。
3. 在模組封裝上，微透鏡模仁的品質影響 MLA 太陽電池模組之微透鏡品質，其不夠平整也會導致杜邦 ETFE 膜出現浪紋，失去保護太陽電池的作用，其若能將微透鏡模仁陣列化，便能製作客製化商品的開發。

陸、參考文獻

- [1] 張心豪，2006，微透鏡陣列製作全天太陽能電池，國立清華大學，碩士論文。
- [2] 洪時傑，2011，微透鏡應用於太陽能板集光效益提升之研究，國立高雄應用科技大學，碩士論文。
- [3] J. K. Tseng, et al, 2011, “Application of Optical Film with Micro-lens Array On A Solar Concentrator”, Solar Energy, vol.85, pp.2167-2178, September.
- [4] J. H. Karp, et al, 2010, “Micro-Optic Solar Concentration and Next-Generation Prototypes”, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 493-497, June.
- [5] N. F. Borrelli, 1994, “Efficiency of microlens array for projection LCD”, 44th Electronic Components and Technology Conference, pp. 338-345, New York, May1-4.
- [6] 昇鎡理化有限公司，鎳電鑄槽操作手冊。
- [7] Dupont ETFE data sheet ,
http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_MS/。
- [8] Dupont Tedlar data sheet ,
http://www2.dupont.com/Tedlar_PVF_Film/en_MS/。
- [9] 耿繼業，何建娃，2010，幾何光學，三版，全華出版社發行，台北。