

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學科

030808

抓得住太陽的水透鏡

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 位季芃	指導老師： 蔡瑞琴 鍾志俊
---------------	---------------------

關鍵詞：水透鏡、太陽能電池、效能

抓得住太陽的水透鏡

摘要

想要提高太陽能電池效率因而製作水透鏡加在太陽能電池上，利用凸透鏡聚光效果來增加效率。水透鏡的優點是可以改變焦距、方便耐久。過程中自製水透鏡並設計實驗平台測量不同塑膠膜片透光度、水透鏡聚焦特性、水透鏡增加光功率效果、水透鏡增加太陽能電池輸出電壓實驗以及實際在戶外陽光下測試水透鏡對增加太陽能電池效能的影響。

實驗結果發現：光功率最高的膜片為 EFTE 膜；灌入不同水量可改變水透鏡的焦距；在焦點時光功率最大；焦距越短光功率越強。加上水透鏡後提升電壓輸出增加 20.4%；單位面積電壓輸出更達原來的 248.1%。戶外實測結果顯示天氣晴朗時，水透鏡使效率大幅增加，最大可達 192%，平均亦可達 84%。因此加上水透鏡後確實能增加太陽能電池的輸出效率。

抓得住太陽的水透鏡

壹、研究動機：

使用太陽能電池發電。在生產技術提高及成本降低的條件下，成為目前使用最方便、最普遍的綠能科技。尤其是在常年豔陽高照的台灣南部，更具太陽能發電的潛力。只不過有一個非常大的問題，就是現在大部分的太陽能電池，光電轉換效率都很低，最多也只有 24%左右的效率，而一般常用的太陽能電池，更只有 11%~17%左右。

如果能在太陽能電池板上面加上透鏡，把更大範圍內的陽光聚焦到太陽能板上，將會有更高的使用效率，同時也可以相同的照射面積內節省太陽能板的數量。但這種方法還是會產生一些新的問題，例如：如果使用玻璃透鏡，裝置的重量會變的很重，成本也會提高；如果使用塑膠的菲涅爾透鏡，則照射日光太久就會損失強度，容易損毀。

正好學校理化課教到透鏡與聚焦，因此我想到可以使用水來形成聚光的透鏡，加到太陽能電池上。用水做透鏡的優點就是它不像整片玻璃那麼重，用久了也不會有壞掉的問題。同時經過太陽光加熱的水，還可以利用成為熱水來源。如此不但可以提高太陽電池的效率，的同時還可以收集太陽熱能，可說是一舉數得。所以本實驗試圖利用水會折射的特性製作透鏡，藉以增加太陽能電池的效率，並同時嘗試收集太陽熱能。

貳、研究目的：

1. 自製水透鏡
2. 研究水透鏡的折射特性
3. 探討太陽能電池的特性
4. 探討水透鏡和太陽能電池結合的可能性
5. 測試水透鏡對增加太陽能電池的效率

參、文獻探討：

一、太陽能電池

1. 太陽能電池的種類

由太陽能電池的製程技術發展，可將太陽能電池分成矽晶圓製程之現世代及薄膜製程之次世代兩大部份。其中現世代太陽能電池包括：

- (1)單晶矽：各種太陽能電池中效率最高，使用年限較長，但價格較貴。多用於發電廠、充電系統、道路照明系統及交通號誌。如圖 1 為單晶矽太陽能電池的外觀。

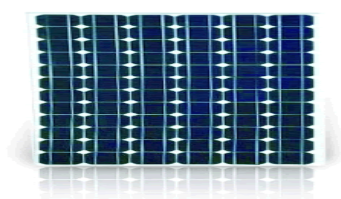


圖 1 單晶矽太陽能電池

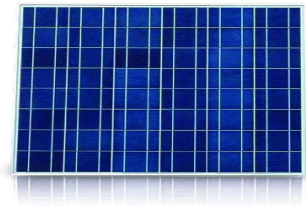


圖 2 多晶矽太陽能電池

- (2)多晶矽：效率較單晶矽低，價格較便宜，常見於低功率太陽能發電模組，如圖 2 為多晶矽太陽能電池的外觀。
- (3)半導體化合物：由砷化鎵(GaAs)，銦鎵磷化物(GaInP)等材料製成。

2. 如何增加太陽能電池的效率

太陽能電池應用日益廣泛，價格也漸漸降低，但是轉換效能不佳一直都是太陽能進步的一大阻礙。正因為如此，增加太陽能電池效率成為一個重要課題。目前提高太陽能電池效率的方法及研究，由收集到的資料可以歸納出下列幾項：

- (1)製程及材料的創新：像是串疊型電池 (Tandem Cell) 藉由設計多層不同能隙的太陽能電池，吸收各種光譜來達到吸收效率最佳化的結構設計。還有像是新式化合物及有機高分子導電的研究等。
- (2)增加光效能：使用透鏡或鏡子讓光產生集中效果以提高太陽能的使用效率，如圖 3 之聚光型太陽能電池。

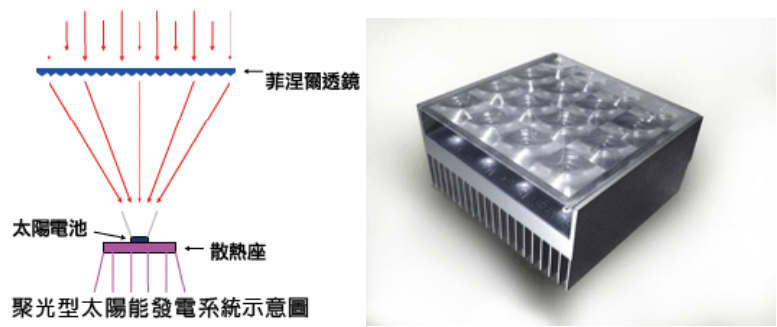


圖 3 聚光型太陽發電系統構造示意圖及模組

製程及新材料這類的基礎研究必需投入較長的時間及較多資源。相反的，提高光效能的方法比較適合在科技基礎上做進一步的研究。

二、透鏡原理

水具有折射的性質。所謂折射是指光線進入不同介質時，改變行進速率而產生偏折的現象。如圖 4，光由快介質進入慢介質時，折射光偏向法線；如果光由慢介質進入快介質，則折射光會偏離法線。某種的介質的折射率亦等於光在真空中的速度跟光在介質中的相速度之比。

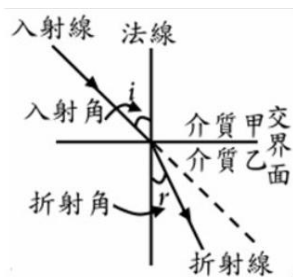


圖 4 折射現象

$$\text{折射率} = \frac{\text{真空中光速}}{\text{介質中速度}}$$

透鏡可分為凸透鏡及凹透鏡，凸透鏡可以會聚光線；相反的凹透鏡會將光線發散，如圖 5

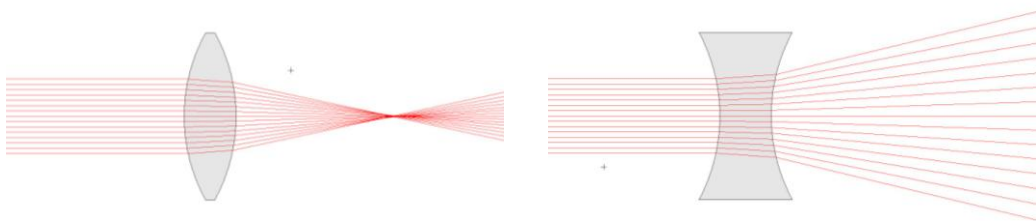


圖 5 凸透鏡會聚光線與凹透鏡將光線發散的現象

透鏡的焦距可以由下面的造鏡者公式計算：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{n-1}{nR_1R_2} d \right]$$

(f : 焦距 n : 透鏡之折射率 R_1 、 R_2 : 透鏡兩邊鏡面的曲率半徑 d : 透鏡厚度)

肆、研究器材與方法：

根據研究目的及文獻探討，我們決定採用階段式的研究方法。首先製作水透鏡，研究其聚焦特性，接著再以人造光模擬太陽光，以取得較穩定的光源，研究水透鏡可否改變太陽能電池的發電特性。在實驗結果證實水透鏡能對太陽能電池的發電造成變化後，最後再將水透鏡與太陽能電池結合，研究水透鏡在實際太陽照射的情形下對太陽能電池發電特性的影響。

一、第一代水透鏡實驗

(一)實驗器材：切圓器、雙尾夾、木螺絲、矽膠、木板、塑膠膜(一般透明塑膠袋)、塑膠墊板、透明光碟、螺絲組、針筒及針頭、鹵素燈(110V/500W)、水透鏡、光學實驗平台、單晶矽太陽能電池、數位式複用表、電子夾、光功率計 (TES1333R)。

(二)製作過程：

1. 將透明光碟片、圓形格線紙固定在木板上，使用切圓器將透明光碟及塑膠墊板切成中心有孔的形狀。同時依照圓形格線紙，將塑膠膜剪成圓形。



一開始我用長尾夾固定，但在切割的過程中常會滑動。後來我想到用螺絲直接固定在木板上，就解決了這個問題。

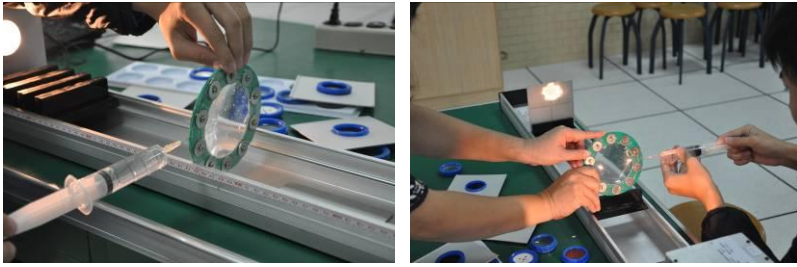
2. 接著將切好的透明光碟片與塑膠膜塗上膠水，上下各兩片。中間再加上一層塑膠墊板，在貼合之前要在塑膠墊板上用美工刀劃上一條溝，加上一點膠水，再將針頭黏在兩片塑膠膜的夾層間，做為灌水及調節水壓之用。



3. 為了避免透鏡中的水流出來，我在光碟四周圍鑽孔並鎖上螺絲。兩片圓形塑膠膜就夾在墊板和光碟中間，這樣水透鏡就完成了。

(三)、實驗步驟：

1. 將水透鏡置放在光學實驗平台上，用鹵素燈照射。



2. 將針筒刻度調到一半的位置，然後調整水透鏡的位置找到聚焦點。
3. 利用擠壓及釋放針筒，來調整水透鏡的壓力，變化聚焦點。
4. 觀察並記錄水透鏡壓力與聚焦點的變化。
5. 將鹵素燈架在臨時的燈架上，並將太陽能電池的正負極接到數位式複用表上，測量太陽能電池的電壓值
6. 調整水透鏡的焦距及位置，以配合太陽能電池的位置。比較加上水透鏡前後的電壓值，並加以記錄。



二、第二代水透鏡實驗

第一代透鏡實驗結果發現水透鏡確實有增加太陽能電池輸出的效果，但在過程發現塑膠袋易磨損、漏水、曲率變化不大、CD片及塑膠袋無法承受大壓力，針筒注水的方式也不方便，等問題，因此決定要研發更適合研究的第二代水透鏡。

(一)膠膜透光度測試：

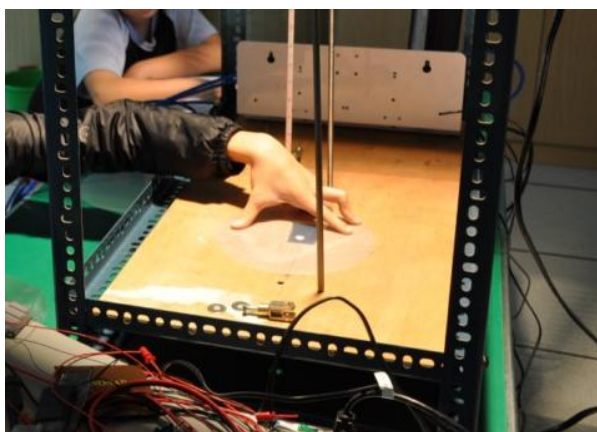
1. 實驗材料：

製作水透鏡，首先必須把水放在固定的透明容器中。透明塑膠材質有很多種，我選定市面上常見的幾種容易取得的塑膠材質之後，又在網路上找到一種 ETFE(乙烯-四氟化乙烯聚酯物)，就是北京「水立方」的外層。家人與廠商連絡後，得到廠商的贊助，提供 20 片 ETFE 膜做為實驗材料。就這樣我收集到四種膠膜材料，如表 1。

編號	材料	說明
1	ETFE	重量輕、高耐久性、透光性良好。廠商提供。
2	塑膠棚布	一般攤販使用臨時遮風雨的透明塑膠布。五金行購買。
3	投影片	可影印的透明投影片。文具賣場有售。
4	透明資料夾	一般用的 A4 資料夾。文具賣場有售。

2. 實驗步驟：

- (1) 將四週燈光關閉，確定光功率計讀數為 0 後，將光功率計置放在實驗平台上，用鹵素燈照射，測量未覆蓋任何塑膠膜時光功率計讀數。
- (2) 依次將塑膠膜緊密覆蓋在光功率計的感測頭上，同時讀取光功率計的讀數。



- (3) 以未覆蓋塑膠膜時之讀數為參考值，計算不同塑膠膜之之比值，做為透光度的參考值。

(二) 第二代水透鏡製作：

1. 實驗器材：

編號	項目	數量
1	黑鐵框架(厚 2mm，雷射切割)	2 個
2	圓形格線紙(自行印製，可做為切割及鑽孔定位)	數張
3	ETFE 塑膠膜	2 片
4	螺絲組(ϕ 5mm，公、母)	12 組
5	塑膠墊板	1 張
6	針頭(做為出水口及入水口)	2 個
7	水管(逆滲透濾水器配管用 100mm 長)	2 條
8	矽膠	若干
9	熱熔膠	若干

加壓器		
編號	項目	數量
1	加壓馬達(附壓力開關及電磁閥)	1 個
2	水管(逆滲透濾水器配管用)	數公尺
3	調壓閥(附壓力表 1kg/cm ³)	1 個
4	止逆閥	1 個
5	水閥(出水口開關用)	1 個
6	連接頭(配合管徑，做為水管連接用)	6 個
7	水管(逆滲透濾水器配管用 100mm 長)	2 條
8	止水膠帶	1 捲
實驗平台		
編號	項目	數量
1	鐵架	數個
2	鐵架固定螺絲	若干
3	木板	數個
4	長螺桿(120cm， ϕ 10 細牙)	2 條
5	螺絲母(長螺栓用，附華司)	4 個
6	連桿接頭	2 個
7	螺絲公(ϕ 5mm)	2 個
8	木螺絲(固定木板用)	若干

根據透光度的實驗結果，我採用 ETFE 膜為水透鏡材料。為了製作更大的水透鏡，我找到雷射切割的工廠，畫了簡單的圖樣請他們幫我製作。

加壓的方式則是跟逆滲透的廠商詢問之後，請他們幫我用二手的加壓馬達做了一個加壓器，再自己製作連接頭。可是開始時為了漏水跟壓力控制的問題試了很久，又去請教空壓及液壓的零件行，加上調壓閥及止逆閥，經過幾次試做調整之後，終於完成第二代水透鏡，如圖 6。

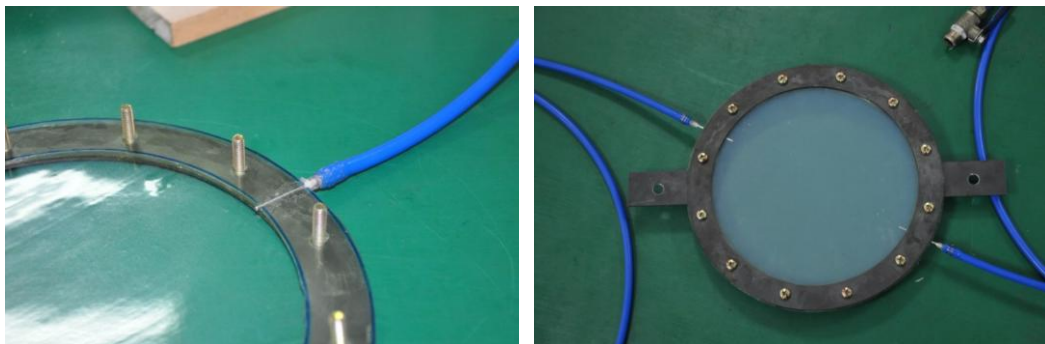
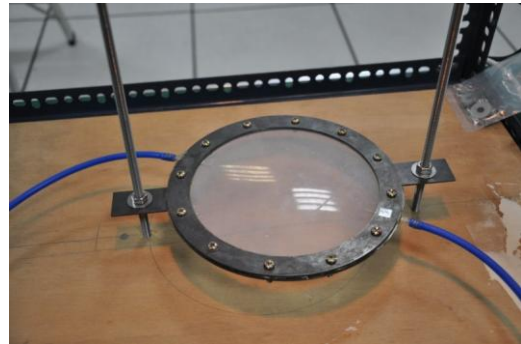


圖 6 第二代水透鏡(附加壓馬達、調壓閥及排水口)

2. 整合實驗平台：

- (1) 將鐵架組合成四方型的框架，鎖緊後再依相對位置鎖上鹵素燈架及水透鏡的固定架。
- (2) 依水透鏡固定螺桿的位置在木板上鑽孔，接著放上木板後用木螺絲固定，最後將固定螺桿鎖在木板上。
- (3) 將加壓馬達的輸出接上逆止閥與調壓開關後，接上水透鏡。啟動馬達注水，在此同時將排水口打開，以利排出水透鏡中的空氣。



- (4) 排除空氣的動作完成之後，就可以將水透鏡及活動的固定座接到固定螺桿上。最後為了測量方便，在旁邊又再多加了一個皮尺，以便隨時觀測距離。可是要測光功率時，發現光功率計的高度成了問題，只好把木板架高，中間開一個洞來放光功率計，才不會影響到測量的準確度。

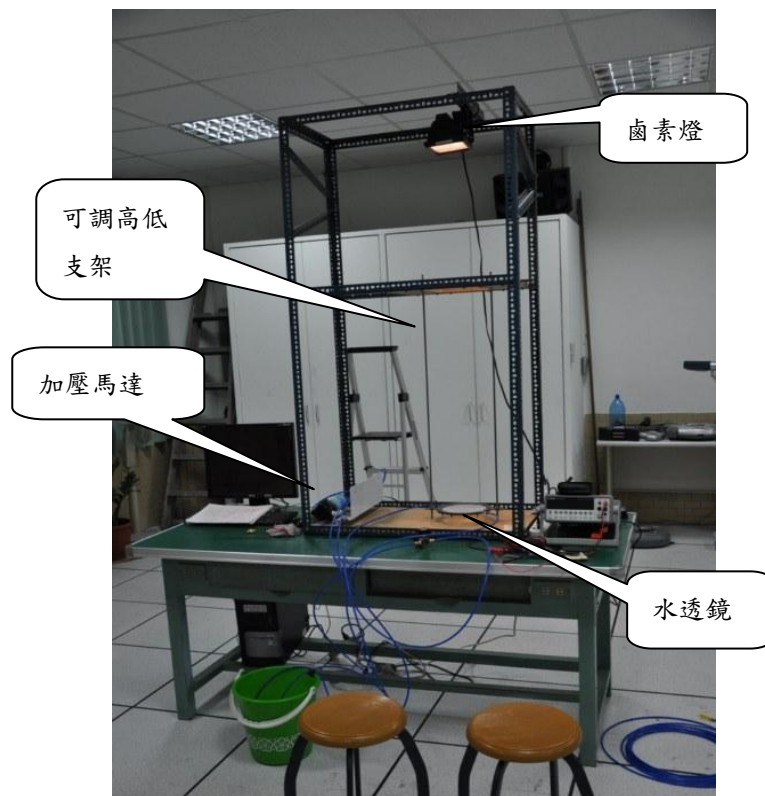


圖 7 實驗平台

三、水透鏡太陽照射實驗

在前面的實驗中，發現水透鏡確實能提高太陽能電池的效率。因此我就開始設計太陽能電池加上水透鏡在實際太陽光照射下的功率測量實驗。實驗分為實驗組(加上水透鏡)與對照組(不加水透鏡)，並且採用樂高 NXT 來收集測量數據，如圖 8。

由於太陽光的輸出會隨著天氣及時間變化，如果要收集長時間的實驗數據，又想避免人為誤差，最好能使用電腦自動測量，所以我想到用 NXT 來試試看。於是上網去找廠商的資料，找到 Mindsensor 有測量電壓及電流的感測模組，如圖 9。同時又找到國內廠商有存貨，於是就決定使用 NXT 配合 Power Meter 來做為實驗器材。



圖 8 樂高 NXT 主機



圖 9 Power meter for NXT

(圖片來源：Mindsensor 公司官網)

另外，功率是電壓與電流的乘積，若要測量太陽能電池實際的輸出功率，必須要在輸出端加上電阻做為負載。因此，我參考買來的太陽能電池規格，最大電壓 4V，最大電流 75mA，相除後得到電阻 53.33Ω，但是找不到固定規格的數值，於是採用相近的 56Ω 做為負載，以便同時測量電壓與電流數值。

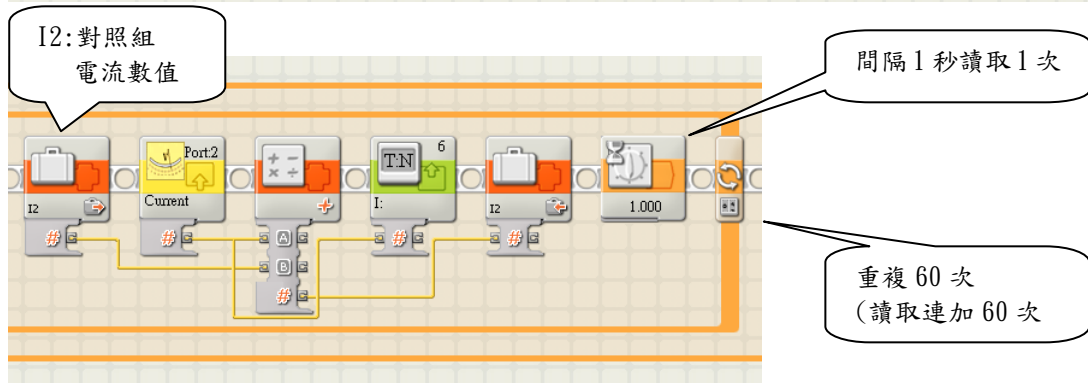
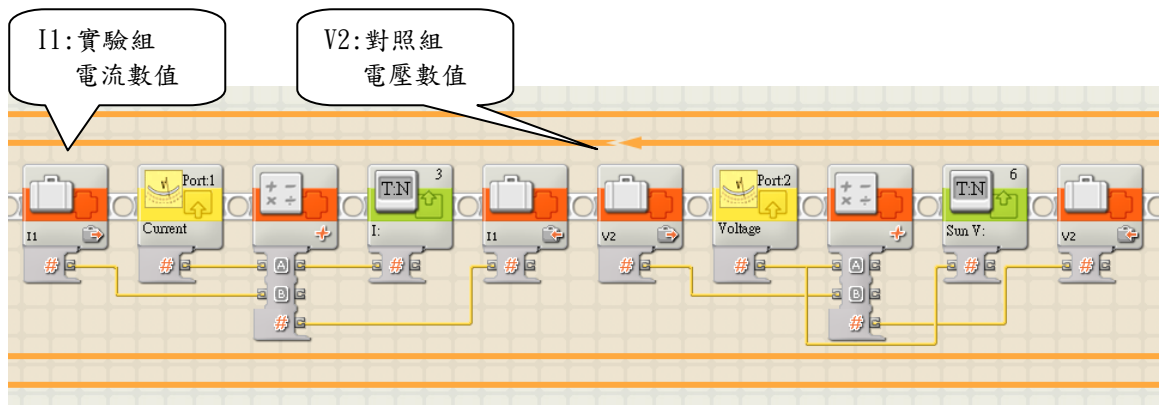
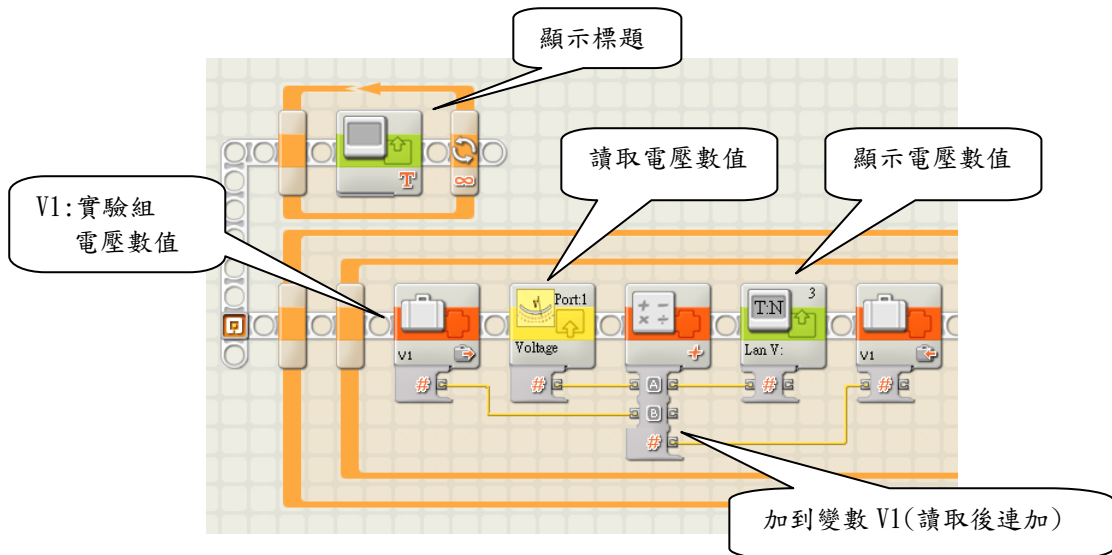
1. 實驗器材：

表 3 水透鏡太陽光照射實驗器材		
編號	項目	數量
1	樂高 NXT	1 個
2	功率感測器 Power Meter	2 個
3	連接線(樂高感測器用接頭)	2 條
4	測試線(連接太陽能電池輸出，使用網路接線)	1 條
5	模擬負載(56Ω)	2 個
6	電源供應器(樂高用)	1 個
7	二代水透鏡(固定焦距 25cm)	1 個
8	支架	1 組
9	風扇(太陽能電池)散熱用	1 個
10	太陽能電池(單晶矽，4V，75mA，配合光形遮蔽為 5cm×2.5cm 面積)	2 個
11	延長線(110V 交流電源)	1 個

2. 實驗程式：

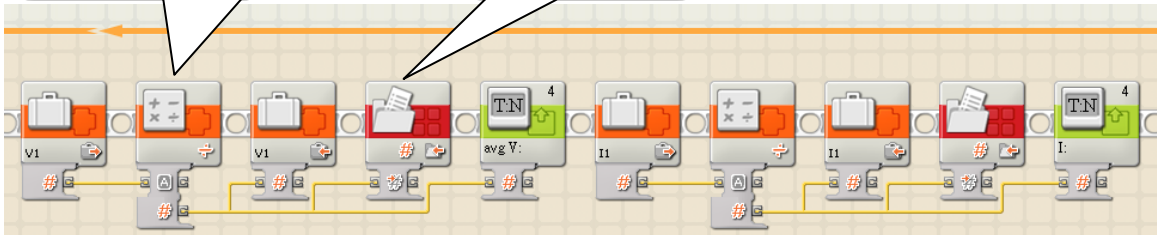
程式使用 NXT 圖控程式(NXT-G)撰寫，每 1 秒讀出功率計電壓(電流)數值加起

來，重覆 60 次(1 分鐘)後，再除 60 以求得 1 分鐘平均值。一直重覆這個過程。最後再從電腦讀取記錄檔內容，就能得到每分鐘平均的電壓(電流)值。

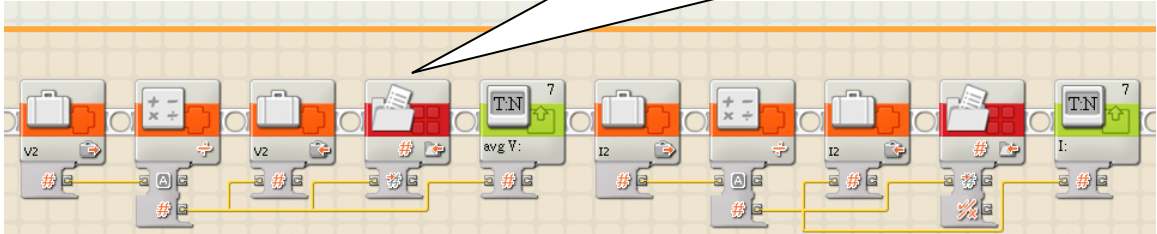


取電壓及電流 60 秒的平均值(除 60)

分別存入檔案裡面

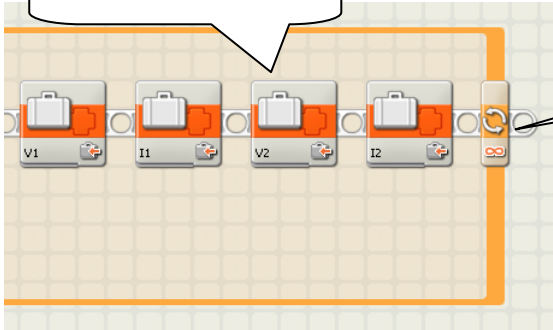


共有 V1、I1(實驗組)及 V2、I2(對照組)4 個檔案



存完後變數設為 0

再一直重複記錄 (每分鐘存 1 次)



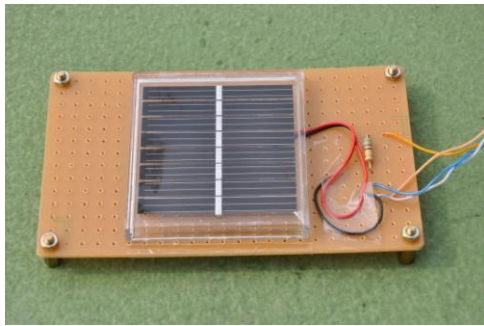
可以上傳(Upload)到電腦裡

NXT 內存的檔案

Name	Size
I2.txt	1.5 KB
V2.txt	1.6 KB
I1.txt	1.5 KB
V1.txt	2.0 KB

3. 實驗步驟：

(1) 把接好負載電阻跟接線的太陽能電池跟 Power meter 連接。



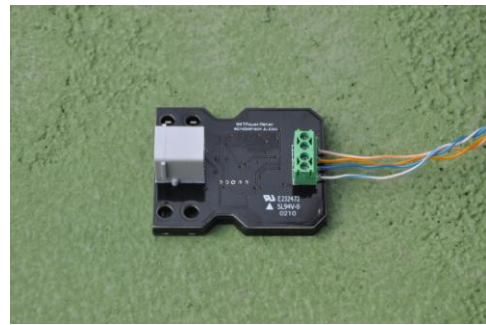
組裝好的太陽能電池



將連接線接到功率計
(電壓並聯，電流串聯)

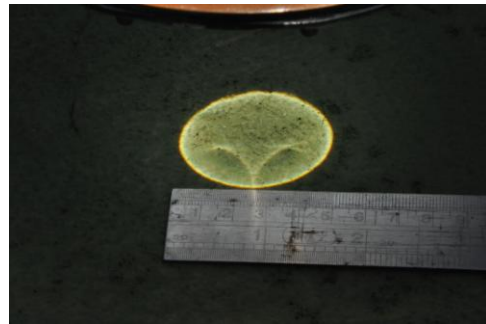
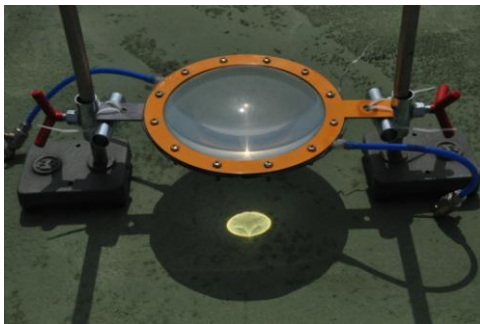


將螺絲鎖緊

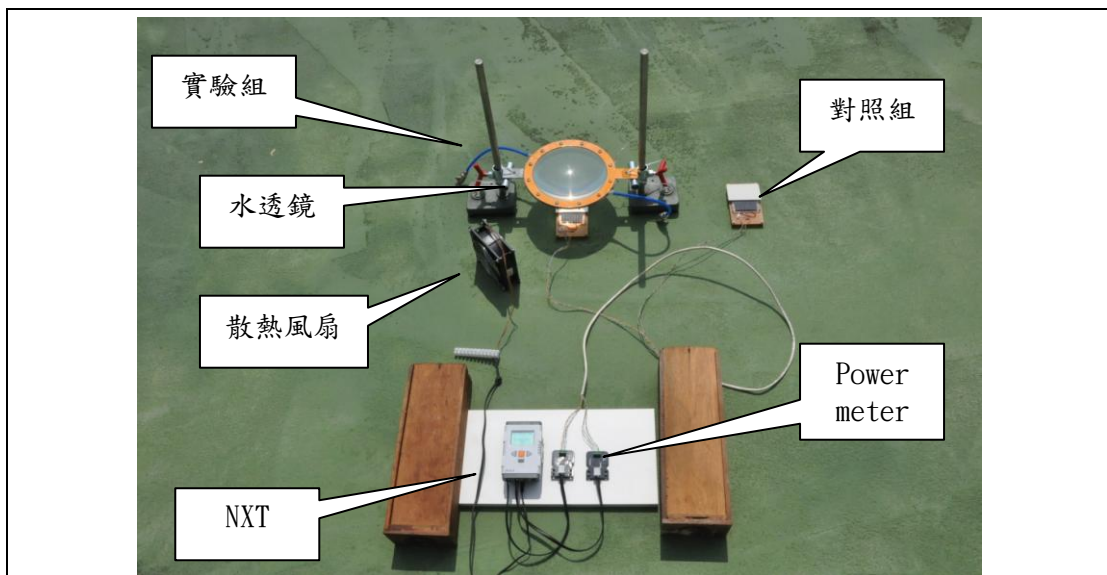


接線完成

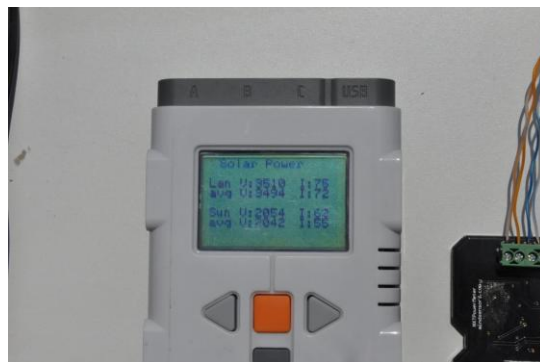
(2) 調整支架高度，使太陽光聚焦光形大小符合太陽能電池面積。



(3) 將實驗模組置於陽光照射，空曠無遮蔽的位置。

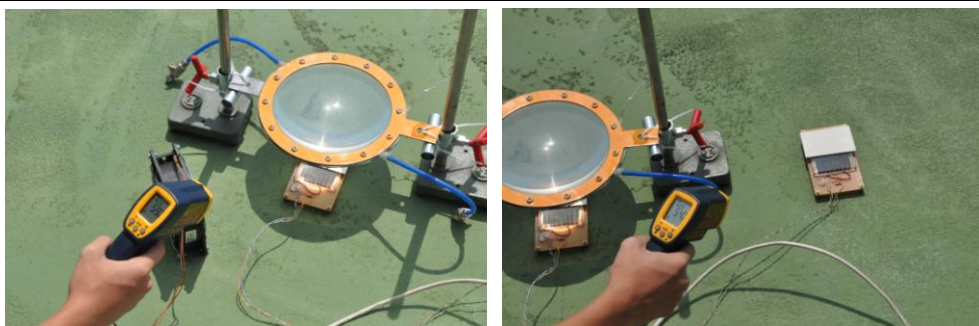


(4) 啟動 NXT 程式即可開始自動記錄。



(5) 每隔 20 分鐘調整太陽能電池位置，以避免太陽移動造成焦點的偏移。

(6) 同時測量太陽電池表面溫度做為參考。



(7) 結束後將 NXT 連接到電腦讀出記錄數值。

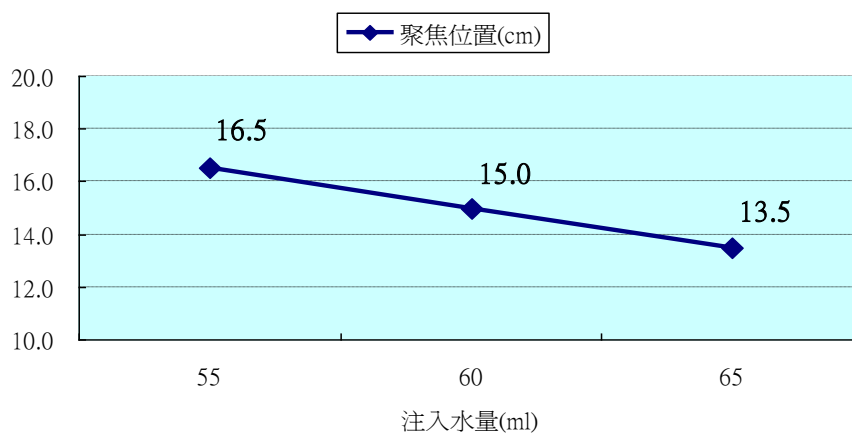
伍、研究過程與結果討論：

一、 第一代水透鏡實驗結果：

1. 實驗結果顯示第一代水透鏡確實有聚焦的效果，注入的水量越多，透鏡的曲率越大，焦距的位置越近。其壓力(針筒刻度)與聚焦點位置的關係如圖 10：

針筒刻度	注入水量 ml	聚焦位置 cm
20	55	16.5
15	60	15.0
10	65	13.5

圖 10 水透鏡注入水量與聚焦位置關係圖



2. 接著測試太陽能電池的輸出電壓，實驗結果證實水透鏡有增加太陽能電池輸出的效果。實驗結果如下：

第一代水透鏡	輸出電壓值
無	1.584V
有	1.952V

二、塑膠膜透光度實驗：

1. 為降低實驗誤差，在不同時段重複測量 5 次，再求平均值。實驗結果如下表 4：

編號	量測項目	無覆蓋	ETFE	透明棚布	投影片	透明資料夾
1	光功率 (W/m ²)	61.8	61.5	59.9	58.7	60.3
	透光度	100.0%	99.5%	96.9%	94.9%	97.4%
2	光功率 (W/m ²)	63.1	62.8	60.6	59.3	61.2
	透光度	100.0%	99.5%	96.0%	94.0%	97.0%
3	光功率 (W/m ²)	64.4	63.1	61.2	59.9	61.8
	透光度	100.0%	98.0%	95.1%	93.1%	96.1%
4	光功率 (W/m ²)	64.0	62.8	60.9	59.3	61.2
	透光度	100.0%	98.0%	95.1%	92.6%	95.6%
5	光功率 (W/m ²)	64.0	62.5	60.9	59.9	61.5
	透光度	100.0%	97.5%	95.1%	93.6%	96.1%
平均光功率		63.5	62.5	60.7	59.4	61.2
平均透光度		100.0%	98.5%	95.6%	93.6%	96.4%

2. 依平均透光度來比較，透光度依序為 ETFE(98.5%) > 透明資料夾(96.4%) > 透明棚布(95.6%) > 投影片(93.6%)。但是數值均十分接近，透光度都在 90% 以上。

3. 用肉眼來觀察 4 種不同的塑膠膜，我認為最透明的投影片透光度最高，如圖 11 所示。但是實際上測量起來卻是看起來模糊的 ETFE 膜測量到最大的光功率值。

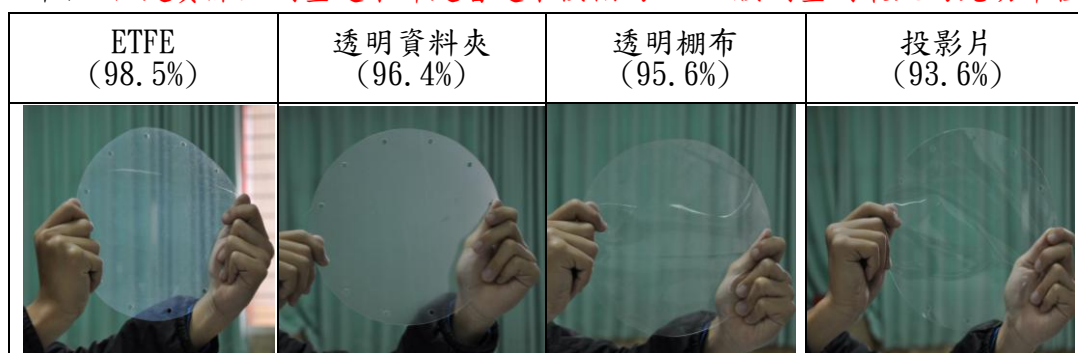


圖 11 塑膠膜片目視透明度與透光度的比較

4. 後來我在拍照時發現投影片會產生大量的反光，如圖 12。也許就是因為這個原因，造成光線部份被反射後減少穿透的光能量。

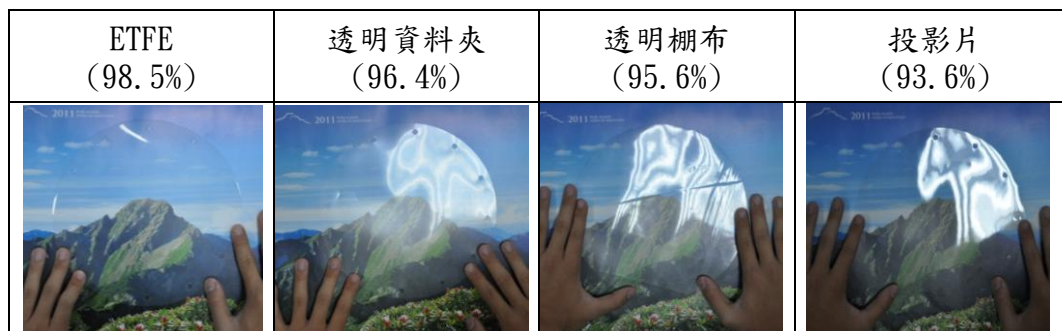
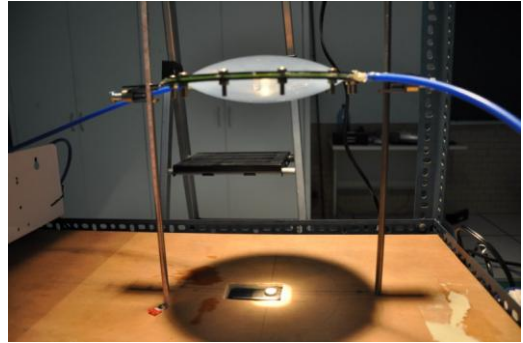
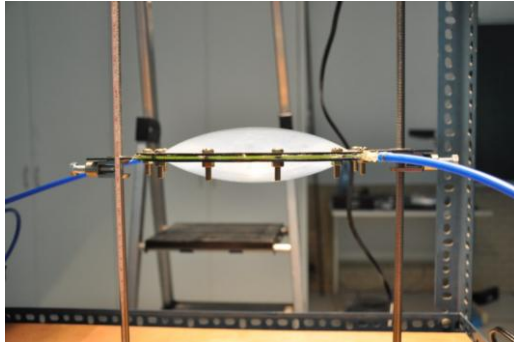


圖 12 塑膠膜片反光度的比較

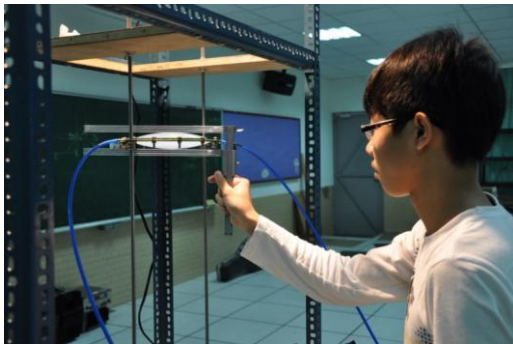
三、第二代水透鏡聚焦特性實驗

(一)實驗過程：

1. 將水透鏡及光功率計置放在實驗平台上，用鹵素燈照射。
2. 將加壓馬達啟動，調整調壓閥以適當壓力漸次加壓，或開啟排水閥降低壓力，觀察焦點變化情形。



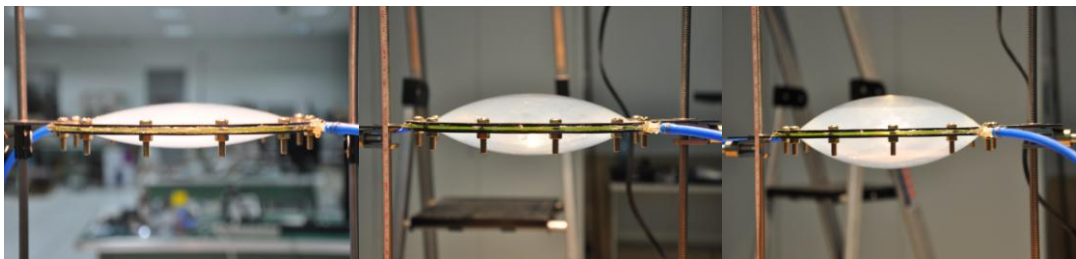
3. 固定水透鏡的高度，調整壓力值，同時觀察光功率計的讀數以求得到最佳聚焦位置，此時記錄透鏡的厚度。測量厚度的工具是我自己用游標卡尺加工製作的。



4. 觀察並記錄水透鏡厚度與聚焦點的變化。

(二)實驗結果：

1. 水透鏡確實有聚焦的效果。當變化壓力時可以觀察到，隨著壓力增加，水透鏡的形變愈大，厚度加厚，聚焦效果愈明顯。

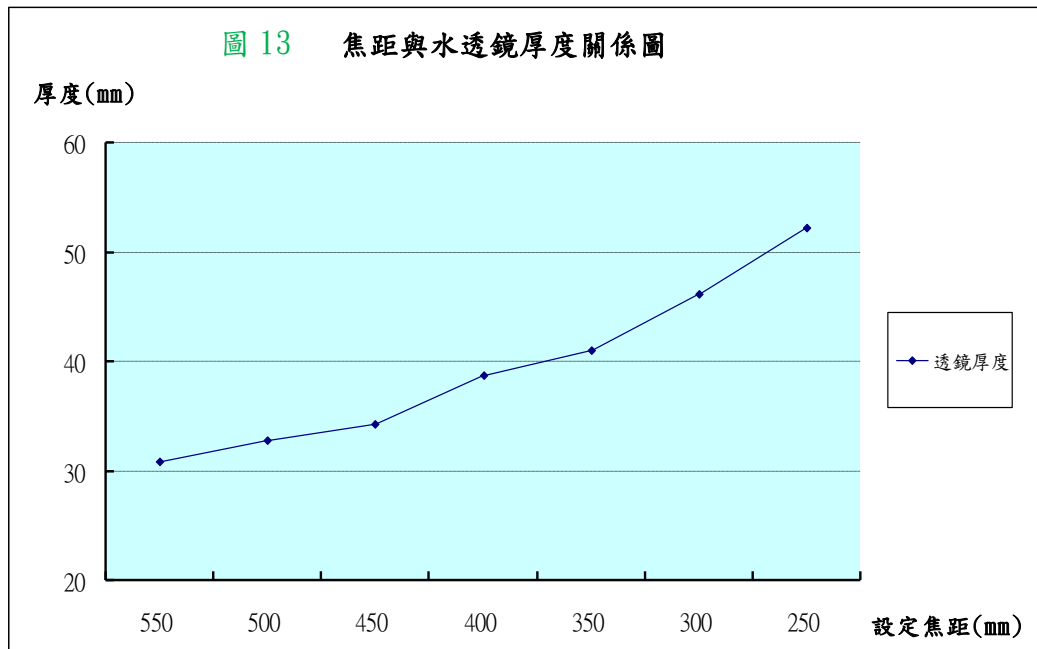


2. 如果固定水透鏡高度，調整壓力得到最佳聚焦效果，依此求得高度應為焦距，再同時測量水透鏡的厚度，可以求得厚度與焦距的關係。實驗時發現焦距高於 550mm 時聚焦效果不明顯；低於 250mm 時壓力過大，ETFE 膜片已變形滲水，故以 550mm 到 250mm 為測量範圍。

3. 實驗結果如下表 5：

測量焦距(mm)	550	500	450	400	350	300	250
厚度(mm)	30.9	32.8	34.25	38.7	41	46.2	52.2

4. 若將兩者變化關係以圖 13 表示，可以觀察到焦距愈短則厚度增加，但似乎不是等比例增加。我對這個結果很好奇，於是決定利用驗證造鏡者公式來做進一步的研究與討論。

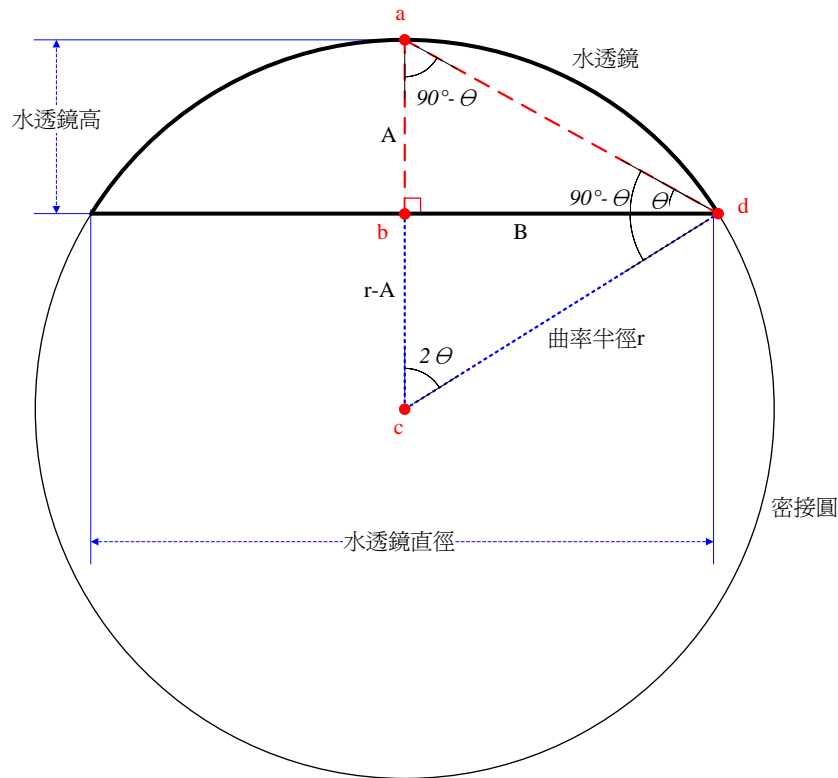


(三) 討論：

1. 由於對透鏡聚焦的原理感到好奇，我就想到嘗試用實驗測量到的數據，來驗證造鏡者公式。

$$\text{造鏡者公式：} \frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)D}{nR_1R_2} \right]$$

2. 在代入參數時，發現已知 n =折射率=1.333(水)，厚度 D 由測量數據可得，但是 R_1 、 R_2 是透鏡兩邊的曲率半徑，卻不知如何求得？從找到資料中知道曲率半徑是曲線密接圓的半徑，所以我假設透鏡的外部與密接圓的關係，畫了一張圖：



3. 根據這張圖，我想算出曲率半徑 r 之值。我請教老師後用三角函數計算出

曲率半徑 r 之值應為：
$$r = \frac{B}{\tan 2\theta} + A$$

證明如下：

由圖中直角三角形 abd 可知 $\theta = \tan^{-1} \frac{A}{B}$

\therefore 三角形內角和為 $180^\circ \quad \therefore \angle a = 90^\circ - \theta$

\therefore 三角形 acd 為等腰三角形，半徑 r 的對角應相等

$\therefore \angle d = \angle a = 90^\circ - \theta$ 由此可得 $\angle c = 180^\circ - 2 \times (90^\circ - \theta) = 2\theta$

再從直角三角形 dbc 可得 $\tan \angle c = \tan 2\theta = \frac{B}{r - A}$

移項化簡後可得 $r = \frac{B}{\tan 2\theta} + A$

4. 因為水透鏡製作的直徑為 170mm ，所以圖中線段長度 $B = \frac{170\text{mm}}{2} = 85\text{mm}$ ；

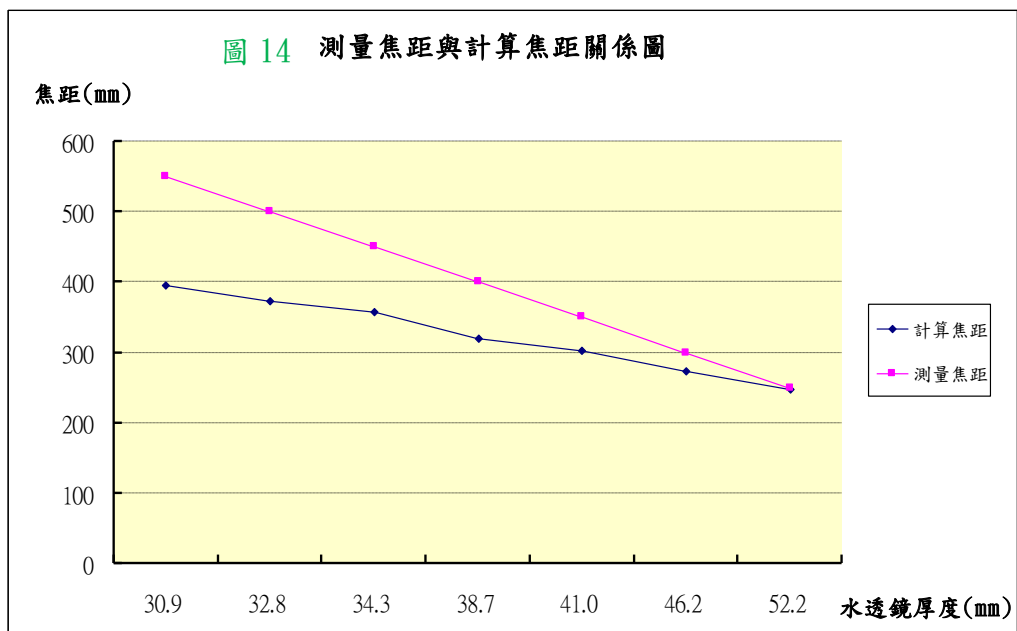
若將中心塑膠墊片的厚度 2mm 考慮進去，水透鏡的高度 $A = \frac{\text{厚度}D - 2\text{mm}}{2}$ 。

5. 得到以上結論後，就將測量所得的數值代入造鏡者公式，其結果如下表 6：

表 6 估算焦距試算表(長度單位：mm；角度單位：rad)							
編號	1	2	3	4	5	6	7
厚度 D	30.9	32.8	34.3	38.7	41.0	46.2	52.2
高度 A	14.5	15.4	16.1	18.4	19.5	22.1	25.1
透鏡半徑 B	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
角度(rad)	0.168	0.179	0.187	0.213	0.226	0.254	0.287
曲率半徑 r	257.2	242.3	232.1	206.0	195.0	174.5	156.5
折射率 n	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333
計算焦距	395.6	373.4	358.2	319.6	303.4	273.4	247.3
測量焦距	550.0	500.0	450.0	400.0	350.0	300.0	250.0
誤差	-154.4	-126.6	-91.8	-80.4	-46.6	-26.6	-2.7

6. 當計算結果出現之後，發現誤差值相當大。我反覆驗證實驗數據，發現測量厚度並沒有很大的誤差，同時發現厚度的誤差也並不會造成如此大的差異；另外想到可能因為加上膜片後造成折射率的差異，但代入其他的折射率也不會得到明顯的不同；後來想到會不會是地心引力造成正反兩端曲率半徑的差異，但代入不同數值後也得不到滿意的解釋。到底是那裡有錯呢？我百思不得其解。

7. 後來我把測量所得焦距值與估算的焦距值之間的關係製成圖表，發現形變愈大(焦距愈短)時，估算的值與測量的值愈接近，如圖 14。



8. 再找更多有關曲率半徑的資料後發現，這個現象極有可能是因為水透鏡的表面不是圓弧所造成的，如圖 15。所以當壓力增加時，水透鏡表面的曲度愈接近圓弧，所以計算值與測量值幾乎相同；但壓力較小時，曲度與圓差異很大，所以造成計算值誤差增加。

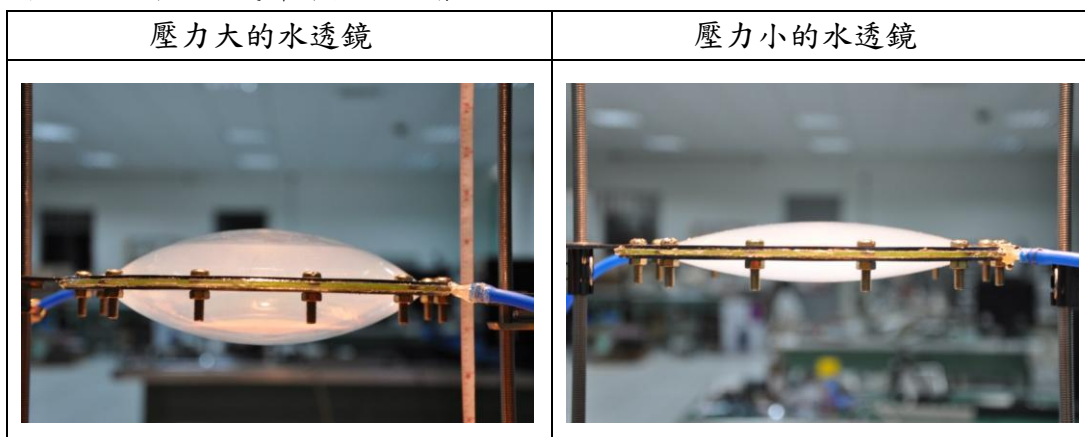


圖 15 壓力大小與曲度

9. 非圓弧的曲率半徑計算超過我的數學能力，可能還要有更精確的測量才能達成，讓我無法再進一步做更深入的討論。

四、水透鏡焦距與光功率關係實驗：

(一)實驗過程：

1. 將水透鏡及光功率計置放在實驗平台上，用鹵素燈照射。
2. 固定水透鏡的高度，調整壓力值，同時觀察光功率計的讀數以得到聚焦位置，記錄光功率計的讀數。
3. 固定水透鏡的壓力，將位置分別移動向上及向下 2cm、4cm、6cm，測量光功率計的讀數。同時在光功率計的上方置放太陽能電池，測量太陽能電池的電壓輸出。

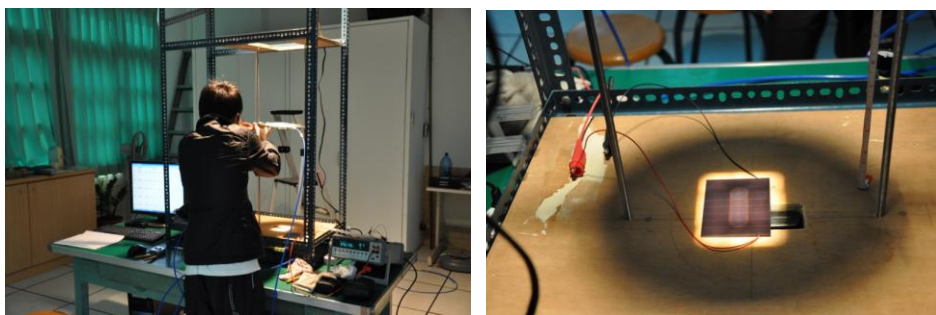


圖 16 水透鏡焦距與光功率實驗裝置

4. 分別再測量不同高度時水透鏡的光功率以及太陽能電池電壓輸出變化。

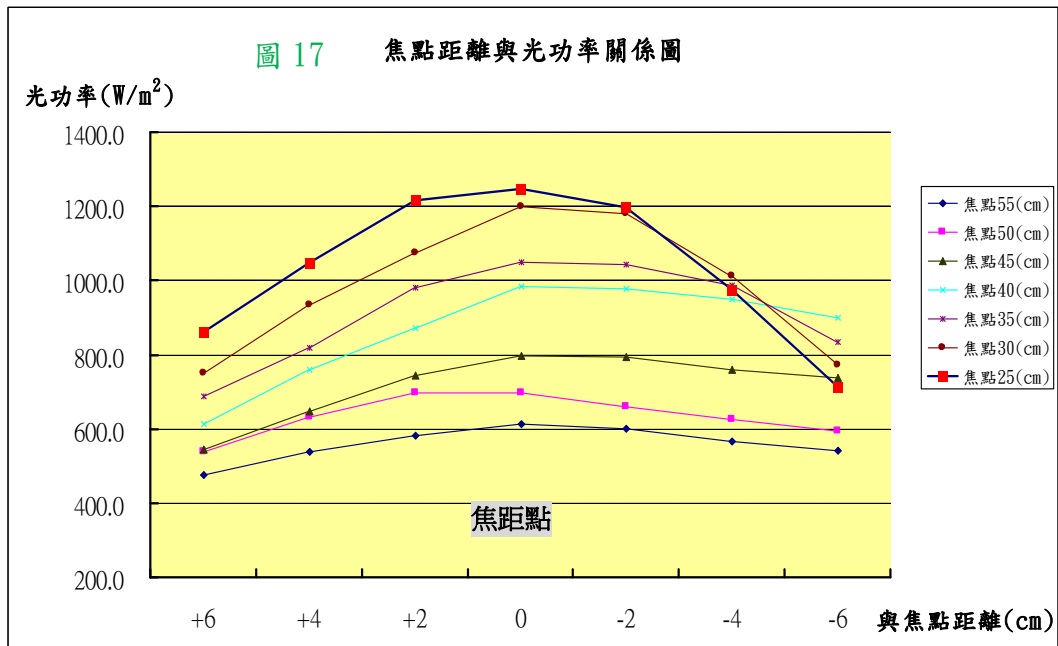
(二)實驗結果：

1. 將水透鏡聚焦後，上下移動一段距離，觀察光功率變化情形。結果如表 7：

表 7 水透鏡焦點距離與光功率關係表 (單位：長度 cm；光功率 W/m^2)

光功率 距離 \ 焦距	550	500	450	400	350	300	250
+6	478.9	540.1	545.2	613.6	689.4	752.5	861.9
+4	540.8	631.9	647.7	760.7	821.6	936.7	1048.1
+2	584.3	698.5	745.8	874.3	983.1	1074.9	1216.6
0	613.6	700.1	799.5	984.4	1051.2	1199.2	1246.2
-2	601.0	661.0	796.0	979.9	1044.9	1180.6	1196.1
-4	567.3	628.5	761.3	950.9	989.7	1012.4	976.5
-6	541.7	594.4	738.3	902.0	835.1	773.9	714.3

2. 實驗結果發現在焦點時光功率最強，遠離焦點時光功率下降，如圖 17。

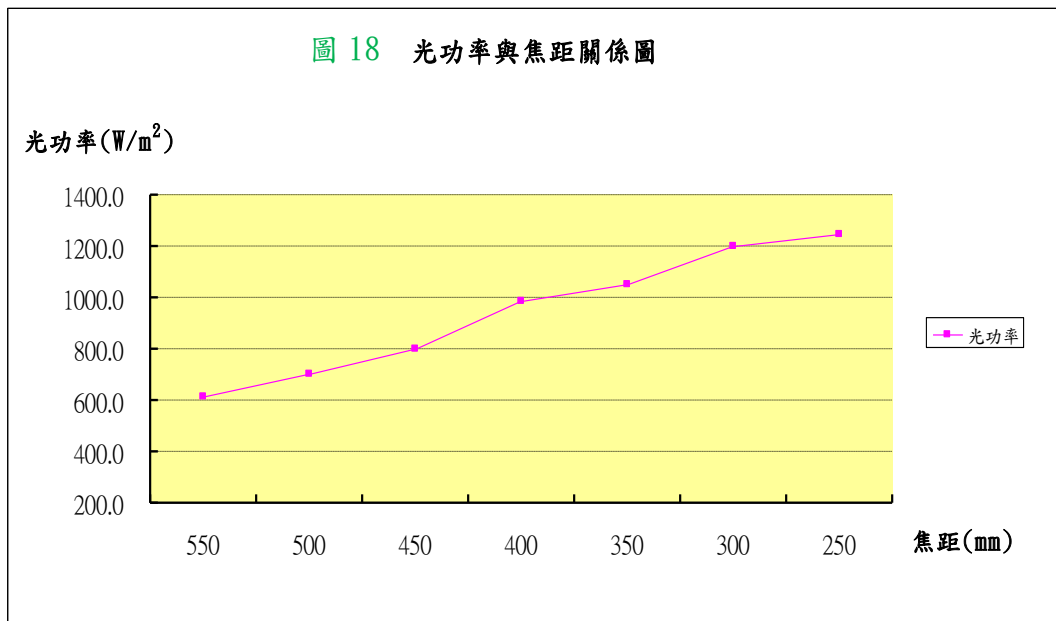


3. 若將焦距與產生的光功率值相比，則結果如表 8：

表 8 水透鏡焦距與光功率關係表 (單位：長度 mm；光功率 W/m^2)

焦距	光功率
550	613.6
500	700.1
450	799.5
400	984.4
350	1051.2
300	1199.2
250	1246.2

4. 實驗結果顯示，焦距愈短，則光功率愈強，如圖 18。



5. 再將聚焦後的光功率與未聚焦的光功相比，如表 9。結果顯示聚焦後的光功率可增加達 9.7~19.6 倍之多。

表 9 聚焦光功率增加比例表 (單位：長度 mm；光功率 W/m²)

焦距(mm)	光功率	光功率增加比例
無聚焦	63.5	100.0%
550	613.6	966.4%
500	700.1	1102.5%
450	799.5	1259.0%
400	984.4	1550.2%
350	1051.2	1655.5%
300	1199.2	1888.5%
250	1246.2	1962.6%

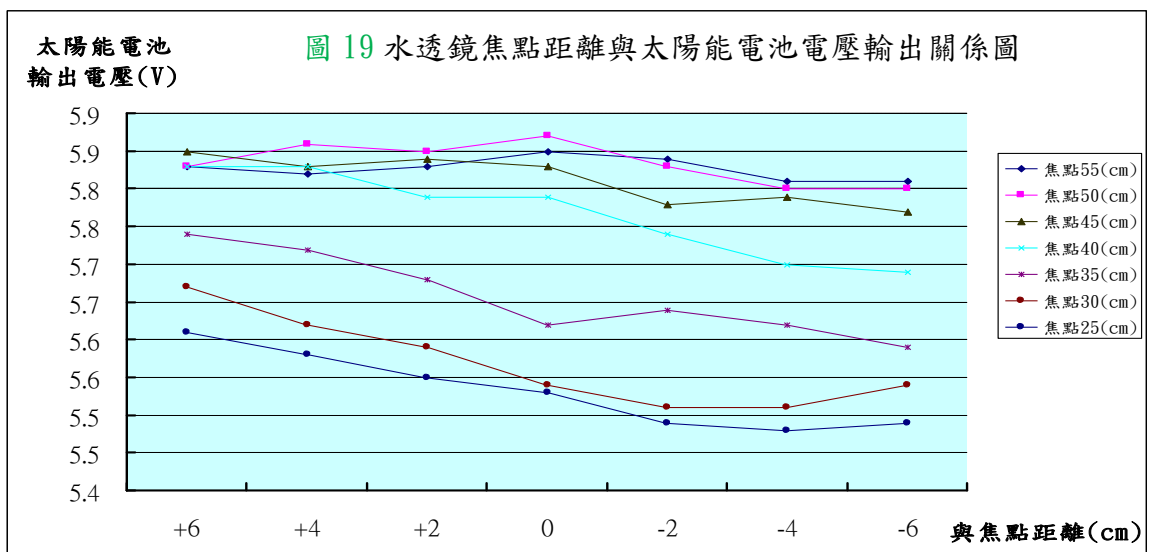
五、水透鏡焦距與太陽能電池輸出電壓關係實驗：

1. 同時測量太陽能電池的電壓輸出，實驗結果如下表 10：

表 10 水透鏡焦點距離與太陽能電池電壓輸出關係表 (單位：長度 cm，電壓 V)

輸出電壓 距離 \ 焦距	550	500	450	400	350	300	250
+6	5.83	5.83	5.85	5.83	5.74	5.67	5.61
+4	5.82	5.86	5.83	5.83	5.72	5.62	5.58
+2	5.83	5.85	5.84	5.79	5.68	5.59	5.55
0	5.85	5.87	5.83	5.79	5.62	5.54	5.53
-2	5.84	5.83	5.78	5.74	5.64	5.51	5.49
-4	5.81	5.8	5.79	5.7	5.62	5.51	5.48
-6	5.81	5.8	5.77	5.69	5.59	5.54	5.49

2. 由數據觀察，並無任何相關。如圖 19 把數據繪成圖表後也看不出結果。



2. 最後仔細觀察後發現與水透鏡照射光的面積有關，如圖 20。因為太陽能電池的輸出與光照射面積有關係，所以雖然聚焦後光功率增加，但照射到太陽能電池的面積下降，因此造成實驗數據混亂。

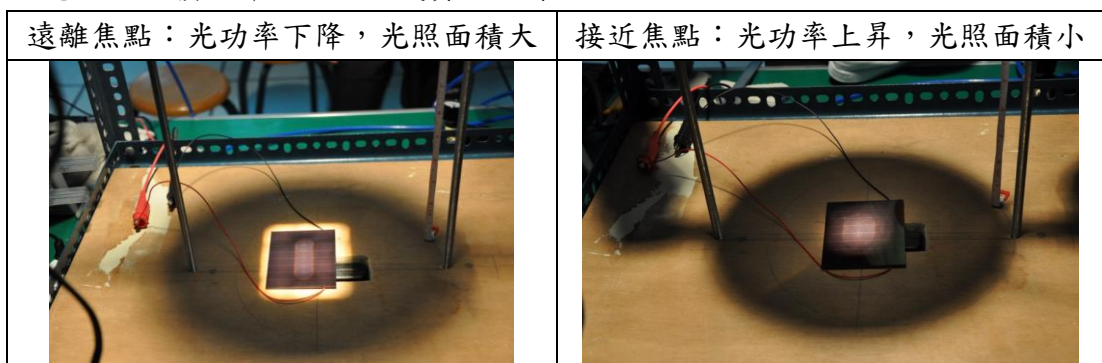


圖 20 改變與焦點距離時聚焦變化

(右邊照片看起來亮度較低是相機曝光度不同造成的)

六、水透鏡對太陽能電池效率的影響：

1. 由前面的實驗結果得知焦距愈短，水透鏡照射的光功率愈高。同時可以知道光線照射的面積會影響太陽能電池的輸出。我為了要避免面積的變因，遮蔽了太陽能電池，讓照射的面積固定在 4.5cm × 5.5cm，再測量加上水透鏡前後太陽能電池的輸出電壓，如圖 21。

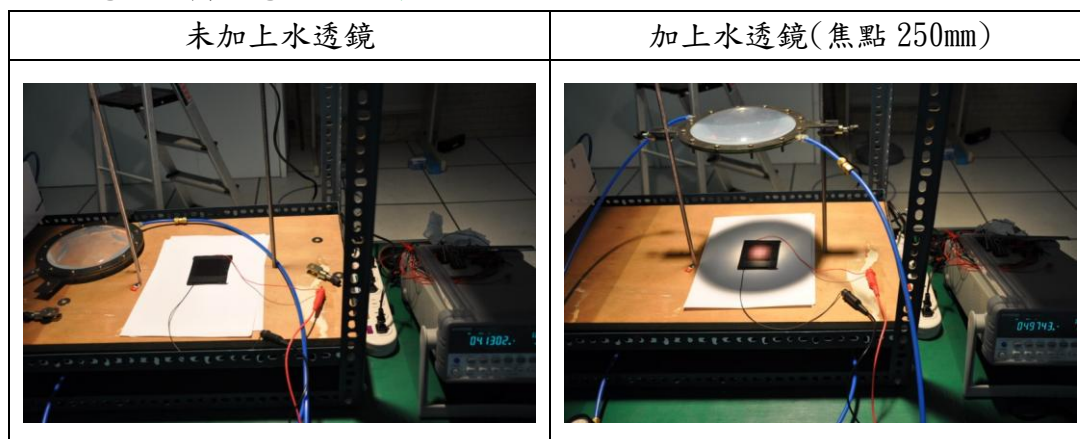


圖 21 加上水透鏡前後電壓變化

2. 實驗結果如表 11：

表 11 水透鏡太陽能電池輸出電壓表	
水透鏡狀態	輸出電壓值
無	4.13V
有	4.97V
增加電壓	0.84V
增加效率	20.4%

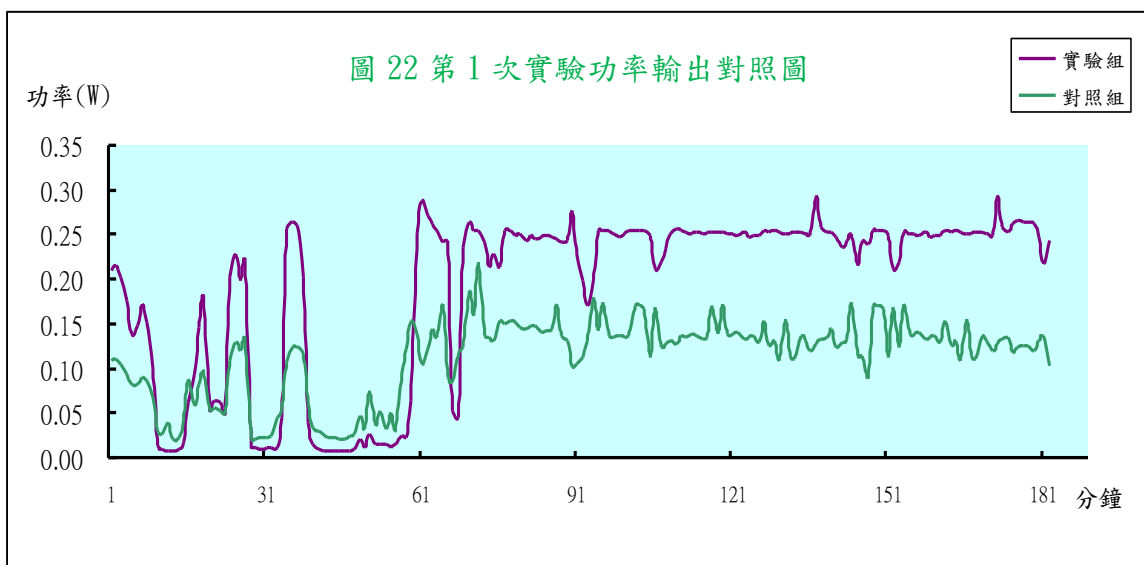
3. 加上水透鏡時輸出電壓高出 0.84V，電壓增加達 20.4%。
4. 更進一步討論單位面積與電壓輸出的關係如表 12。

表 12 太陽能電池單位面積輸出電壓比較表					
	長	寬	面積	輸出電壓	單位面積輸出電壓
原有面積	70 mm	90 mm	6300 mm ²	5.10 V	0.00081 V/mm ²
聚焦面積	45 mm	55 mm	2475 mm ²	4.97 V	0.00201 V/mm ²
$\text{增加百分比} = \frac{0.00201}{0.00081} = 248.1\%$					
$\text{增加效率} = \frac{0.00201 - 0.00081}{0.00081} = 148.1\%$					

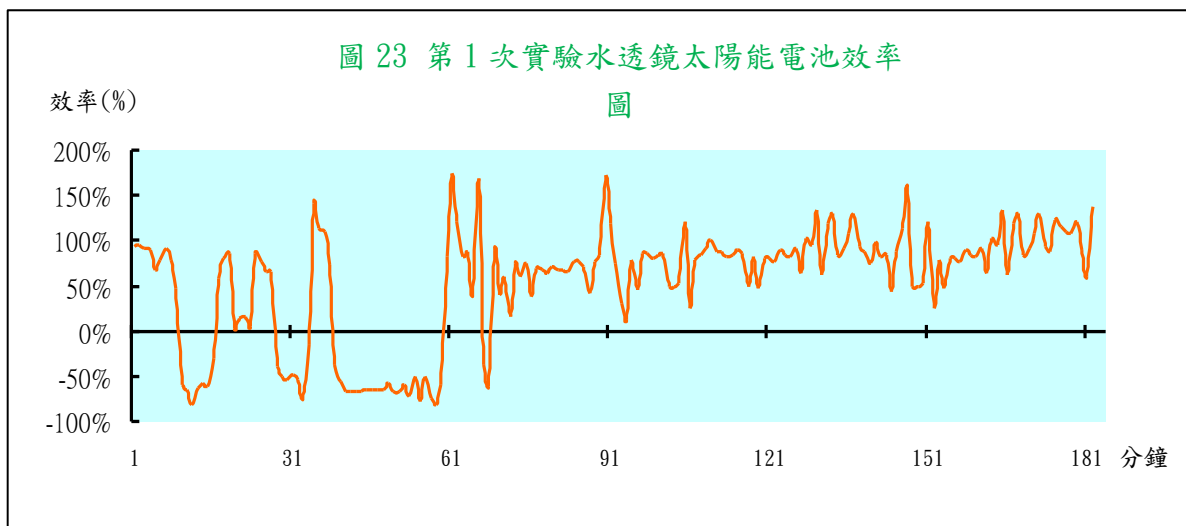
5. 結果顯示加上水透鏡時可以大符提高單位面積的輸出電壓達未加水透鏡時的 2.48 倍，效率提高 1.48 倍。

七、水透鏡在實際太陽光照射下對太陽能電池效率的影響：

1. 實驗由上午 10 點左右太陽光較強的時間開始，進行約 3 小時(約 180 分鐘)。
2. 第一次實驗得到實驗組(有加水透鏡)及對照組(沒有水透鏡)功率比較如圖 22。



3. 如果以對照組功率值為基準，計算效率效率 = $\frac{\text{實驗組} - \text{對照組}(\text{功率差})}{\text{對照組功率}}$ %，就可以把效率製成如圖 23。



4. 第一次實驗時，天氣多雲，所以太陽光照射不穩定，發現在太陽光較弱時，聚焦效果不明顯，因此加了水透鏡的實驗組功率反而比對照組更低。到了後半段陽光較強，實驗組的功率才明顯增加，如圖 24。

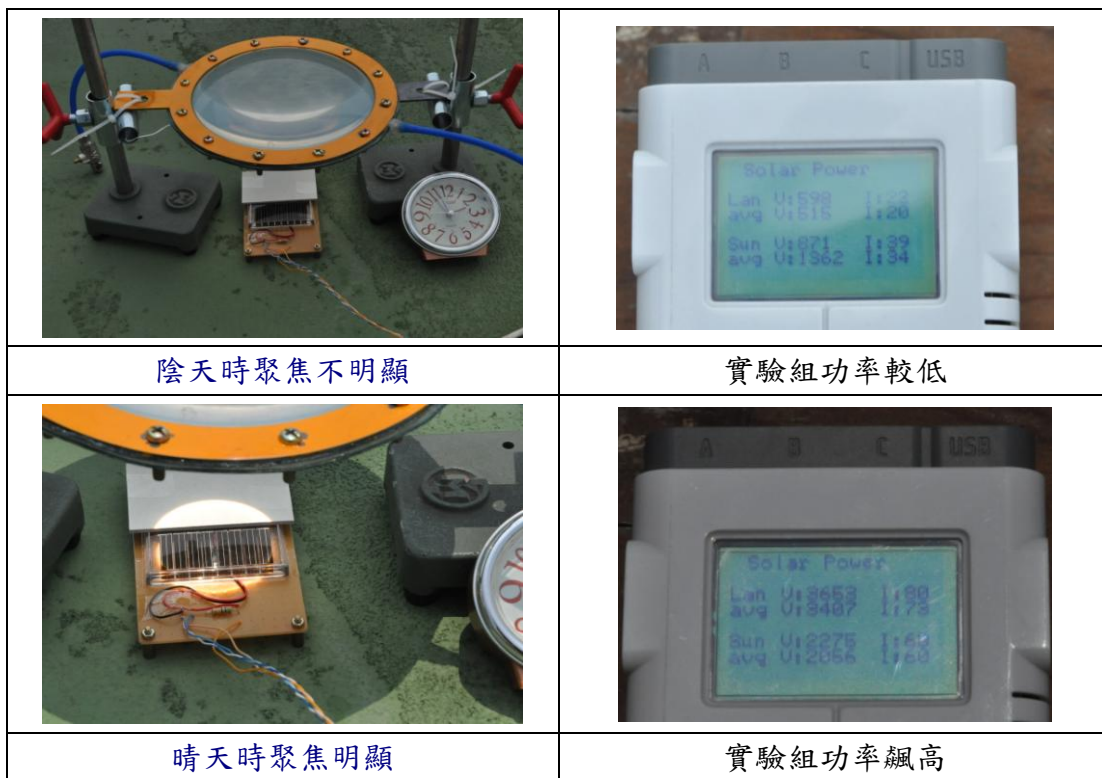
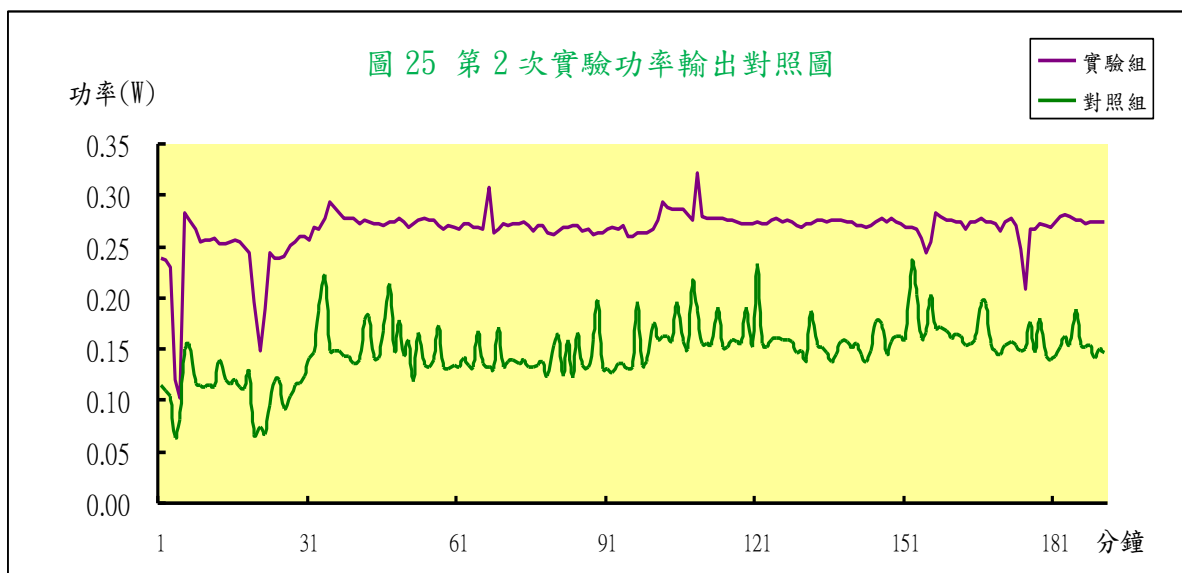
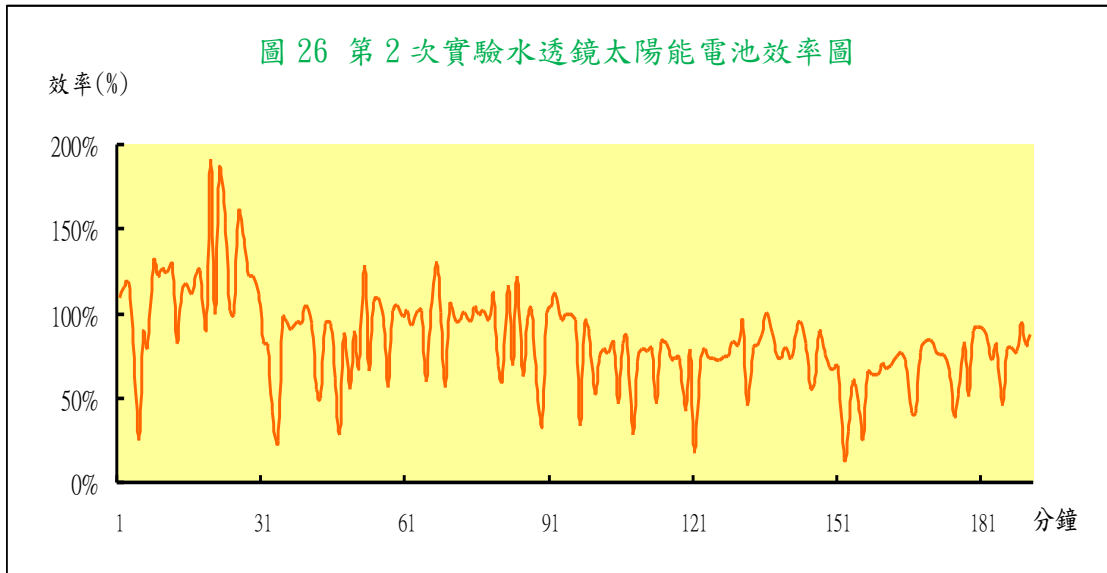


圖 24 陰、晴時功率變化圖

5. 雖然天氣不穩定，但最後實驗組仍然較對照組平均增加了 54% 的效率。
6. 第二次實驗時，天氣炎熱晴朗，得到兩組的功率比較如圖 25。



7. 計算得到效率結果如圖 26。



8. 可得知在天氣晴朗時，水透鏡可以得到比較好的結果。第二次實驗時實驗組較對照組平均增加的效率達到 84%。

9. 將兩次實驗的結果對照如表 13：

表 13 第 1 及第 2 次實驗結果對照表

	實驗組功率(W)		對照組功率(W)		效率(%)		平均效率
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
第 1 次實驗 天氣：多雲	0.29	0.01	0.22	0.02	174%	-81%	54%
第 2 次實驗 天氣：晴朗	0.32	0.10	0.23	0.06	192%	14%	84%

10. 以第 2 次實驗溫度測量的結果(第 2 次實驗溫度較高)，實驗組的溫度約在 62℃~68℃上下變化，比較對照組的溫度約為 54℃~58℃左右，兩者差距約在 10℃。對照地板上的溫度約在 78℃左右，並沒有發現實驗組的溫度升高很多。應該是因為實驗時有將太陽能板架高，而且加上散熱風扇的結果。

陸、研究結論

根據實驗的結果，可以得到以下研究結論：

- 一、利用水的折射特性，可以製成水透鏡。同時可藉由水的壓力，改變透鏡的焦距。
- 二、利用改變水透鏡的焦距，可以增加太陽光的照射功率。焦距由 550mm 調整到 250mm 時，其增加光功率可由原有 63.5 W/mm^2 的 9.7 到 19.6 倍間變化。
- 三、水透鏡焦距愈短光功率愈大。焦距由 550mm 調整到 250mm 時，光功率由 613.3 W/mm^2 增加到 1246.2 W/mm^2 ，增加符度約為 2 倍。
- 四、水透鏡在焦點時光功率最大，遠離焦點時光功率下降。最大下降符度，以焦點 250mm 時移動-60mm(190mm)時計算，光功率下降 $532.9(\text{W/mm}^2)$ (1246.2 W/mm^2 下降到 713.3 W/mm^2)，僅有焦點光功率 57.2%。
- 五、利用水透鏡，可以提昇太陽能電池的效率。實驗結果顯示，以相同面積的太陽能電池來比較，沒有使用水透鏡時輸出電壓為 4.13V，使用水透鏡時輸出電壓可達 4.97V，增加 0.84V 輸出電壓提昇達 20.4%。
- 六、以單位面積輸出電壓來計算，原有單位面積輸出電壓 0.00081 V/mm^2 ；水透鏡最大光功率輸出(焦距 250mm)時 0.00201 V/mm^2 ，達 24.8 倍，效率提昇 148.1%。
- 七、實地將陽光經水透鏡距焦後的太陽能電池做為實驗組，對照相同規格的太陽能電池做為對照組，發現實驗組在太陽較強的時候，聚焦效果較好；若太陽光較弱，輸出反不及對照組。
- 八、天氣晴朗炎熱時，加上水透鏡可使太陽能電池效率大幅增加，實驗結果顯示最大可達 192%，平均亦可達 84%。即使是多雲天氣，最高也能增加到 174%，雖然雲層遮蔽陽光時會造成效率降低(最低-81%)，平均也能增加 54%的效率。
- 九、實驗結果顯示，加上水透鏡後確實能夠增加太陽能電池的輸出效率。

柒、研究心得與未來展望

雖然目前研究已經有了初步的成果，但是仍有可進一步探討的空間：

- 一、水透鏡的曲率半徑如何測量及計算？厚度與形變跟焦距的關係為何？
- 二、水透鏡的面積(直徑)大小與輸出光功率是否有關？
- 三、目前太陽能電池是在電子材料行買來的，沒有經過詳細的特性測試。因此不同的太陽能電池是否對水透鏡有不同的效果？

- 四、水透鏡對太陽能電池表面溫度有沒有影響？有沒有可能透過太陽能加熱水透鏡中的水，來收集太陽的熱能？
- 五、可不可以藉由調整水透鏡的焦聚來自動調整太陽能電池的功率輸出？
- 六、水透鏡是否能應用在綠建築或是結合其他綠能科技？
- 七、如果透鏡內裝的液體不是水，例如油、鹽水…會不會效果更好？

老師曾經有跟我提過科學實驗是由想法(研究動機)到模型(實驗設計)，再藉由實驗結果來驗證模型的過程。重要的是要從結果中來推斷想法的正確性，同時從差異的問題中找到解答。在這次的研究中，體驗了整個研究過程的辛苦與困難，但也得到很多的成就感。最後發現一個問題解答後會形成另外很多問題，這激勵我思考更深入，也想再做更多的研究。我覺得這是很難得的經驗。

捌、參考文獻

1. http://www.ablerex.com.tw/Solar/htm/AboutSun_01.htm
2. <http://www.solar-i.com/know.html>
3. <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD%E7%94%B5%E6%B1%A0>
4. 維基百科：太陽能電池
<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD%E7%94%B5%E6%B1%A0#%E8.96.84.%E8.86.9C.%E5.A4.AA.%E9.99.BD.%E9.9B.BB.%E6.B1.A0>
5. <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87>
6. 薄膜太陽能電池發展趨勢分析
<http://www.taiwangreenenergy.org.tw/files/Activity/200832712258.pdf>
7. 邦杰材料科技股份有限公司網頁：
http://www.umat.com.tw/sayamaterials_detail.php?sn=11
8. 慶聲科技公司網頁：http://www.kson.com.tw/chinese/study_23-6.htm
9. 台灣太陽鷹開發股份有限公司網頁：http://www.twtaiyo.com.tw/material_ete.htm
10. 超高效率太陽電池—從愛因斯坦的光電效應談起，蔡進譯，物理雙月刊廿七卷5期，2005年10月
11. 導電性高分子的出現與科學上的偶然，江文彥 教授（大同大學化學工程學系），科學發展：2002年11月，359期，68~71頁）

【評語】 030808

1. 利用液態透鏡以調整焦距，並驗證達成效果。但宜考慮聚光太陽能電池應用的功效，可考慮探討對太陽光偏移的影響。
2. 利用液態透鏡與一般玻璃透鏡都是利用折射原理，焦距短曲率大，透鏡厚重是其缺點，一般應用是利用平面菲涅耳透鏡可以克服厚重問題。
3. 宜考慮材質之耐候問題，因為本應用是戶外用途為主。