

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

最佳團隊合作獎

040108

太陽『矽』希望-太陽電池的研究

學校名稱：高雄市立高雄女子高級中學

作者： 高一 沈君宜 高一 陳君庭 高一 周炯彤 高一 黃盈熒	指導老師： 蔡宗賢 林孝正
---	-----------------------------

關鍵詞： 半導體、單晶矽太陽電池、非晶矽太陽電池

摘要

能源危機帶動太陽電池發展，卻受制於難以進一步的提升效率，因此，我們研究其結構與基本性質，如：不照光時的順、逆向偏壓、導通電壓及照光下不同照度、光源、太陽電池種類填充因子的比較，並了解不同負載下的最大功率。隨著實驗的延展，探究照度、入射光的波段、入射角度及經大氣層厚度對太陽電池的影響。

經過數據分析及研究之後，我們發現太陽電池確有 PN 二極體之特性，導通電壓約為 0.7 伏特；太陽電池的填充因子，以單晶矽為最佳，其次是非晶矽；另外，陽光比單槍的光源更適合太陽電池工作。以濾光片將特定波長以下的光線濾除，並推算出能隙。另外，電流的大小與入射角之 $\cos \theta$ 成正比，這也是為什麼太陽能板必須旋轉而使陽光保持垂直入射。

壹、研究動機

能源浩劫警訊瀰漫全球，非再生能源已瀕殆盡，發展新興能源勢在必行；此外，石油存量已不過半世紀、天然氣、煤亦會面臨不敷使用的困難，這都顯示尋求再生能源(renewable sources)迫在眉睫，綠色能源的研究開始受到重視。

美國前副總統高爾，對環保議題的提倡與呼籲，使我們對永續經營地球有所省悟。綠色能源的發展，我們責無旁貸。除了節約能源，基礎物理課談到近代科技時，老師深入介紹半導體及其應用，深深激起了我們的好奇也勾起我們研究及探討半導體太陽電池的興趣。

貳、研究目的

藉著下列實驗與探討，深入了解太陽電池的特性。

一、結構及基本性質的探討

- (一)測量太陽能板之順向偏壓及逆向偏壓，並求出導通電壓。
- (二)測量其在各照度之下之開路電壓、短路電流，討論照度對太陽電池發電的影響。
- (三)測量各種狀況下的填充因子 FF ，討論出最適宜太陽能板運作的情況。

二、探討並分析各種外界條件對太陽電池的影響

- (一)了解 $\cos \theta$ 因子對太陽電池發電情形的影響。
- (二)測量太陽能電池材料的能隙。
- (三)模擬光線經過大氣層的厚度對非晶型太陽電池電流的影響。

參、研究設備及器材

一、太陽能板

單晶矽太陽能板、非晶矽太陽能板

二、光學設備

濾光片(波長：黃 540nm、橘 580nm、紅 640nm)、分光儀、透明玻璃磚

三、電路裝置及校準、量測工具

(毫)安培計、伏特計、直流電源器、電位計、鱷魚夾、三用電表、可變電阻、量角器、大頭針、照度計

四、其他

筆記型電腦、暗箱、遮光盒、單槍投影機

肆、研究過程、結果與討論

【實驗一】順、逆向偏壓測量

(一) 實驗目的

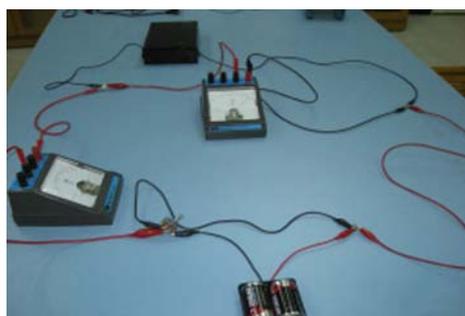
測量太陽電池之順向偏壓及逆向偏壓，探討其二極體性質。

(二) 儀器設備

- (1)單晶矽太陽能板、(2)濾光片(紅色 640 nm)、(3)安培計、(4)伏特計、(5)直流電源器、(6)電位計、(7)遮光盒、(8)電線、(9)鱷魚夾



實驗一儀器設備



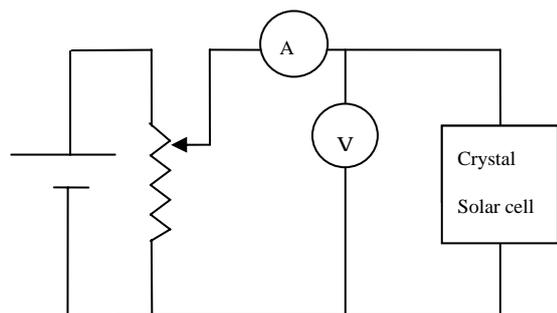
實驗一裝置圖

(三) 研究過程

1. 連接好以下電路。

(1) 用於低電阻

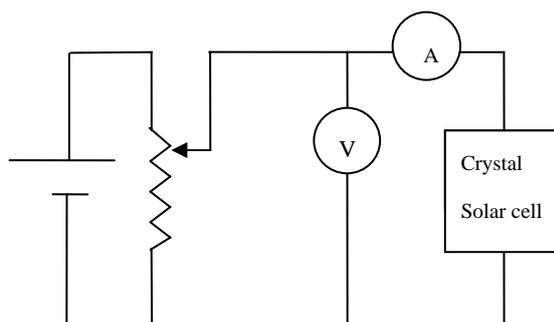
(順向偏壓 0.7V 以上，
太陽電池視為低電阻)



圖(一)

(2) 用於高電阻

(順向偏壓 0.7V 以下及逆向偏壓，
太陽電池視為高電阻)

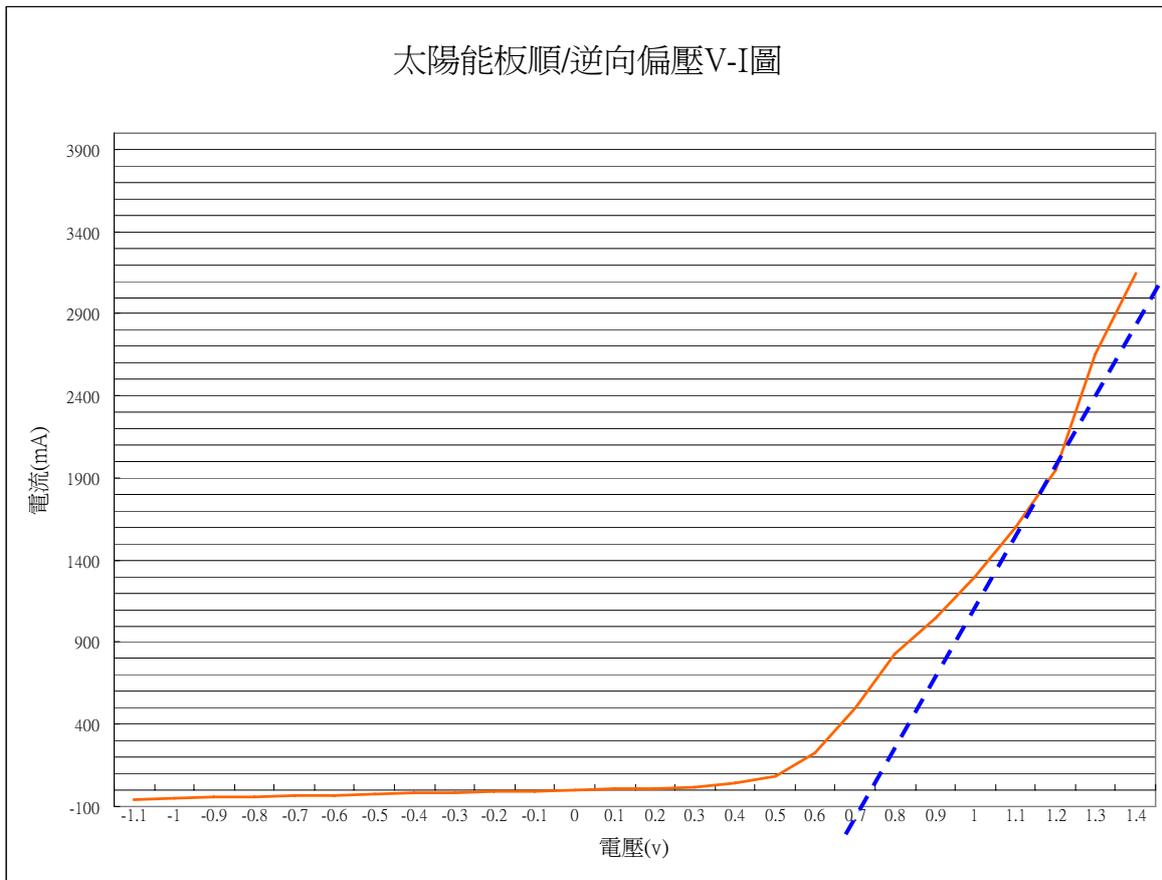


圖(二)

2. 將太陽能板之 P 邊連接電池正極，N 邊連接電池負極，以測量其順向偏壓。
3. 利用直流電源器及電位計(將可變電阻的三個接頭皆用電線連接，作為一個可控制電壓大小的裝置)調整電壓，從 0V 開始，每次增加 0.1V，測量通過太陽能板之電流。
4. 將太陽能板之 P 邊連接電池負極，N 邊連接電池正極，以測量其逆向偏壓。
5. 重複步驟 3

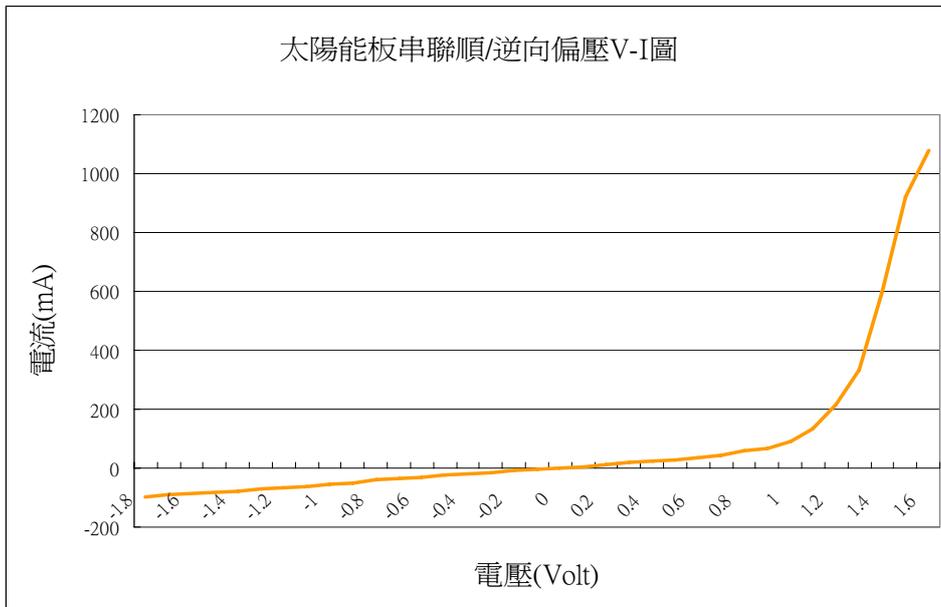
(四) 研究結果

1. 單片單晶型太陽能板



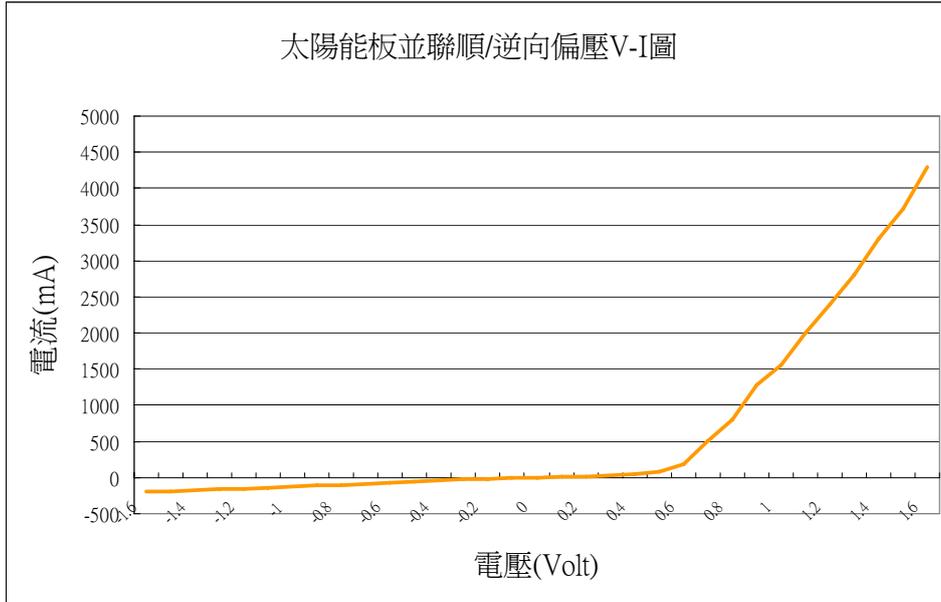
圖(三)

2. 串聯兩片單晶矽太陽能板



圖(四)

3. 並聯兩片單晶矽太陽能板



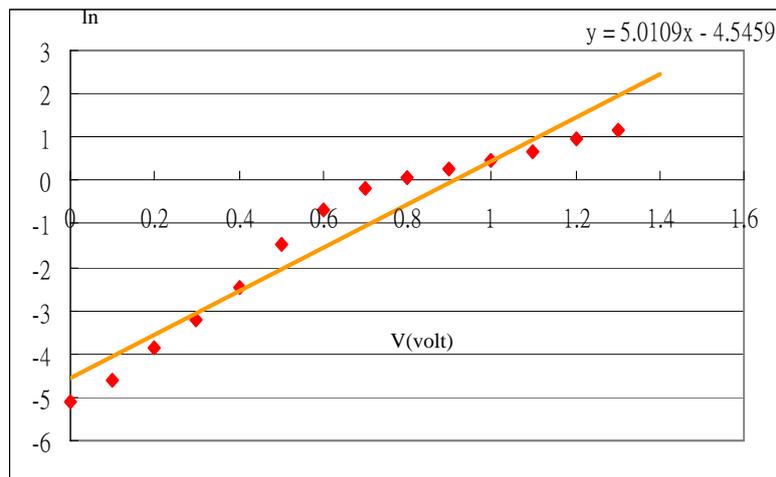
圖(五)

(五) 實驗討論

1. 太陽電池確有二極體之性質。
2. 由書中得知 PN 二極體之順向偏壓曲線：(參一)

$$I = I_s (e^{\beta V} - 1), I_s \text{ (saturation current)、} \beta = \frac{q}{kT} \text{ 其倒數為熱電壓 } V_T \text{ (thermal voltage)} = \frac{kT}{q}。$$

3. 利用 EXCEL 計算 $I = I_s (e^{\beta V} - 1)$ ，因式中的 -1 與其他數值相比很小，故將 -1 省略不計，以方便計算；以 V 作 x 軸， $\ln I$ 作 y 軸，並求出線性公式，得下圖：



圖(六)

其中斜率 5.0109 即為 β 值，y 截距為 $\ln I = -4.5459$ ，取 EXP 即為 I_s ，故得 $\beta = 5.0109 \text{ (volt}^{-1}\text{)}$ $I_s = 0.010611 \text{ (mA)}$

4. 本實驗中太陽能板不照光，不利用其發電功能，而作二極體使用，即為一電阻不固定之負載。因此不可將它當作電池討論。
5. 當逆向偏壓時，由圖知斜率倒數偏大，表示電阻偏大，電流非常小；順向偏壓時，最初

當電壓甚小時，電流值亦小，但當電壓介於 0.6~0.7V 之間時，電流增加的速率突然加大，超過 0.7V 後，電壓小幅上升，電流便急遽加大。即 0.7V 為太陽能板的導通電壓。如圖三，曲線的斜率增加，表示太陽能板之電阻降低。

6. 使實驗結果更精準，可以稍微調整電路接法。從之前實驗可以看出，逆向偏壓時太陽能板一直都是高電阻；順向偏壓在低電壓時太陽能板也是高電阻，超過 0.7V 後太陽能板是低電阻。本實驗即分為高、低電阻兩種不同接法來測量。
7. 串聯、並聯，逆向偏壓時的電流值一樣增加緩慢，電阻非常大。
8. 串聯順向偏壓時，導通電壓約為單片時之兩倍，即 1.4V，符合串聯電路時，各電阻之電壓相加等於總電壓。串聯的電流則比單片時小，符合在串聯時，因電阻增加，而使電流變小。
9. 並聯順向偏壓時，導通電壓與單片時大約相通，符合並聯電路時，各電阻分電壓皆相同，且等於總電壓。並聯的總電流部分則會增加，流過各太陽能板之分電流相加則為安培計所測出之總電流。

【實驗二】照度對太陽電池的影響

(一) 實驗目的

測量太陽電池在各照度之下之開路電壓、短路電流，討論其影響。

(二) 儀器設備

- (1)單晶矽太陽能板、(2)暗箱、(3)電腦、(4)單槍投影機、(5)三用電表、(6)照度計、(7)電線、(8)鱷魚夾



實驗二儀器設備及裝置圖



夜晚暗箱內實驗圖

(三) 研究過程

1. 短路電流測量 I_{sc} (short circuit current)

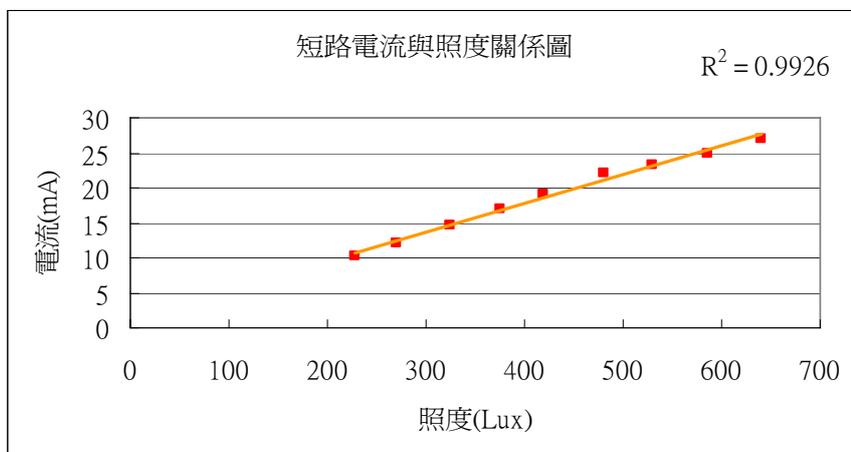
- (1) 連接毫安培計和太陽能板，放入一邊開口之暗箱，其中太陽能板平貼在箱底正中央。
- (2) 利用單槍投影機投射白光，垂直照射暗箱中太陽能板。
- (3) 為確定光垂直入射，以大頭針插在太陽能板上下二處，若大頭針沒有影子，表示光源垂直入射。
- (4) 同時記錄太陽能板表面的照度及輸出之電流。
- (5) 調整單槍投影機的亮度以改變照度，測量電流。

2. 開路電壓測量 V_{oc} (open circuit voltage)

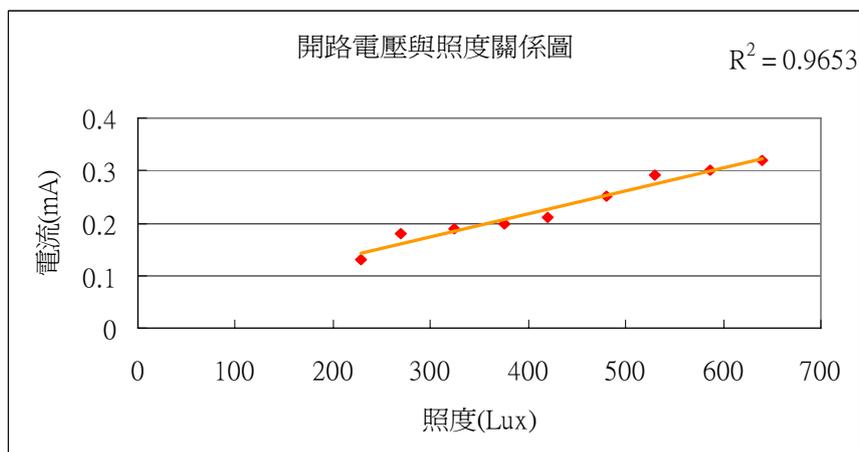
- (1) 連接伏特計和太陽能板。利用單槍投影機投射白光，垂直照射暗箱中之太陽能板。

- (2) 確定光垂直入射太陽能板。
- (3) 同時記錄太陽能板表面的照度及所輸出之電壓。
- (4) 調整單槍投影機的亮度以改變照度，測量電壓。

(四) 研究結果



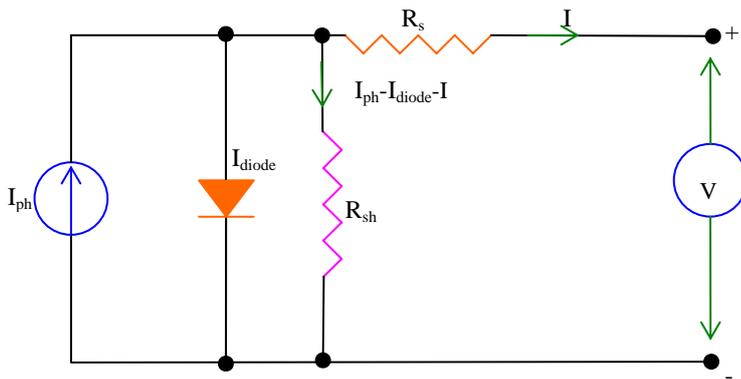
圖(七)



圖(八)

(五) 實驗討論

1. 當照度增加時，電流與電壓亦增加，但不成正比。
2. 使用 EXCEL 分析，其相關係數 R 非常接近 1，代表照度及開路電壓、短路電流之關係非常接近一線性函數。
3. 單槍投影機長時間使用，輸出光的照度會下降。因此每次測量電壓、電流之前，皆需以照度計測量照度。單槍投影機使用一段時間也須適時關機，以免影響實驗的準確度。
4. 太陽能板平貼箱底，不可有一端翹起，以確保光垂直入射。
5. 已知太陽電池的等效電路：(參二)



假設太陽電池由一個理想電流源、一個 PN 二極體、一個並聯電阻 R_{sh} (shunt resistance)和一個串聯電阻 R_s (series resistance)組成。

根據克希荷夫定律， $IR_s + V = (I_{ph} - I_{diode} - I)R_{sh}$ 。

假設 $R_{sh} = \infty$ ； $R_s = 0$ 。

$$I = I_{ph} - I_{diode} = I_{ph} - I_s(e^{\beta V} - 1)$$

若 $V = 0$ $I_{ph} = I_{sc}$

若 $I = 0$ $I_{sc} - I_s(e^{\beta V} - 1) = 0$

$$V_{oc} = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s} + 1\right)$$

將實驗一所求出的 β 及 I_s 與實驗二的開路電壓、短路電流代入此公式中，發現：

照度(Lux)	228	270	325	376	420	480	530	586	640
開路電壓(volt)	0.13	0.18	0.19	0.2	0.21	0.25	0.29	0.3	0.32
短路電流(mA)	10.2	12.1	14.6	17	19	22	23.2	25	27
理論值 V_{oc}	1.3709	1.4049	1.4424	1.4727	1.4949	1.5242	1.5347	1.5497	1.5650
差值	1.2409	1.2249	1.2524	1.2727	1.2849	1.2742	1.2447	1.2497	1.2450

* 差值指理論 V_{oc} 與實際 V_{oc} 的差值

由此得知，太陽電池的實際運作情況並不符合此「理想」的假設，而具有內電阻。

即 $R_{sh} \neq \infty$ ； $R_s \neq 0$ 。

考慮太陽電池並聯電阻 R_{sh} 及串聯電阻 R_s 後，其電壓-電流關係為

$$I = I_s \left(e^{\frac{(V - IR_s)/R_{sh}}{\beta}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_s \text{ (參二)}$$

6. 因為單槍投影機照度與短路電流的關係非常接近線性，因此太陽電池也可以當作一簡單的照度計，測量單槍投影機的照度。照度與短路電流的關係式為：

$$\text{照度(Lux)} = 24.135 \times \text{短路電流(mA)} - 27.814$$

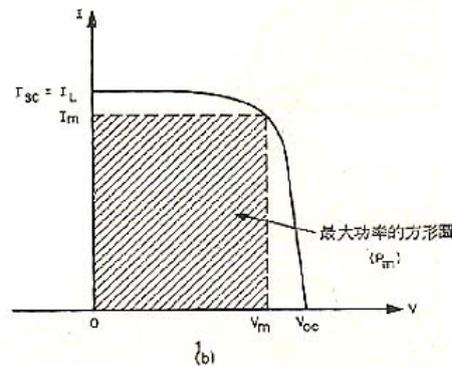
【實驗三】填充因子的測量

(一) 實驗目的

求出不同操縱變因之下太陽能電池的發電狀況。得出太陽能板開路電壓與短路電流的值之後，找出在不同電阻的負載下之最大功率，並利用 $FF = \frac{P_m}{I_{sc}V_{oc}}$ 求得填充因子 FF。

以三個方向的實驗來討論：

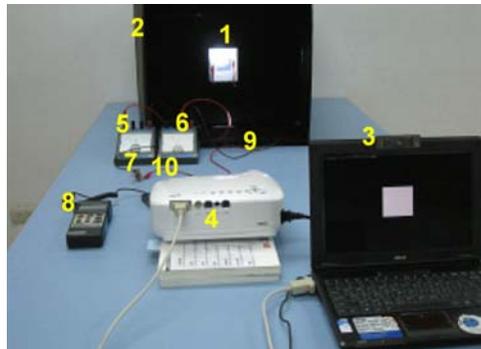
(1)不同光源。(2)不同照度。(3)不同太陽電池種類。



參(三)

(二) 儀器設備

(1)太陽能板(單晶矽、非晶矽、砷化鎵)、(2)暗箱、(3)電腦、(4)單槍投影機、(5)毫安培計、(6)伏特計、(7)可變電阻、(8)照度計、(9)電線、(10)鱷魚夾



實驗三儀器設備及裝置圖

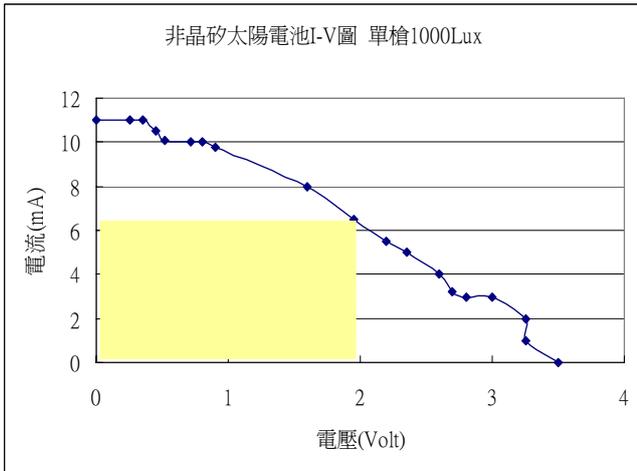
(三) 研究過程

1. 將單槍投影機之照度調整為 500Lux
2. 連接好電路，並以單晶矽太陽電池實驗
3. 將可變電阻之電阻值由 11000Ω 開始減少，測量各電阻值下的電壓、電流
4. 改以陽光照射，重複步驟 3
5. 改為非晶矽太陽電池，重複步驟 3
6. 改為 1000Lux，重複步驟 2、3

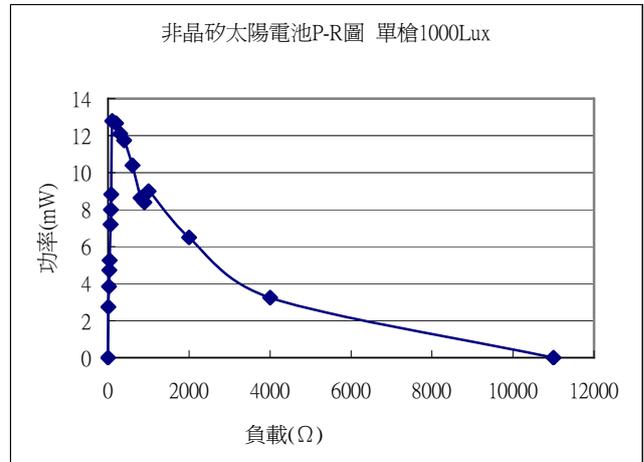
(四) 研究結果

1. 相同太陽電池種類、照度，不同光源(單槍投影機、陽光)

(1) 以單槍投影機照射 (非晶矽太陽電池，照度 1000Lux)



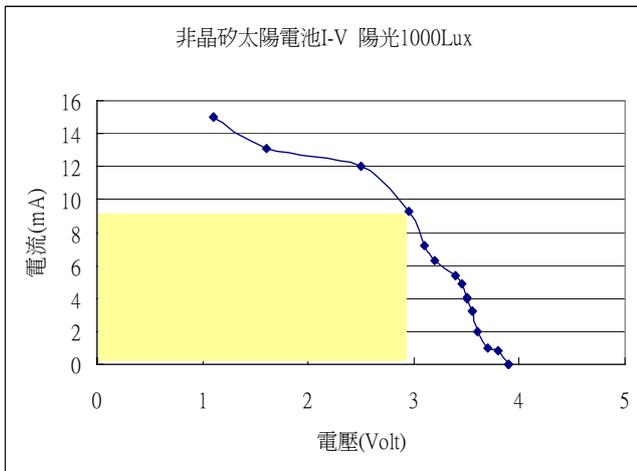
圖(九)



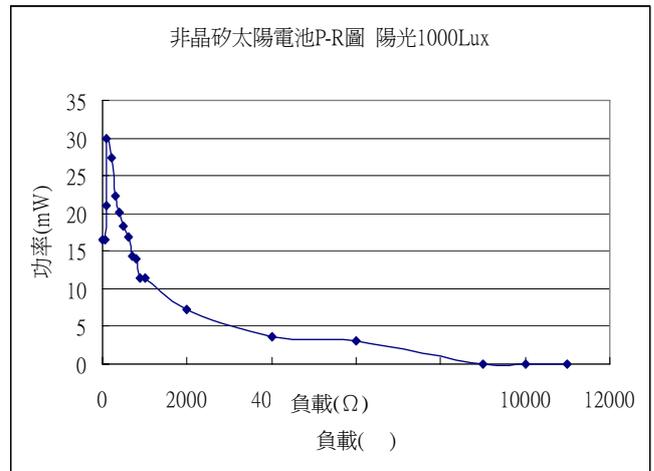
圖(十)

$$FF = \frac{12.8}{(3.5 \times 11)} = 33.2\%$$

(2) 以陽光照射 (非晶矽太陽電池，照度 1000Lux)



圖(十一)

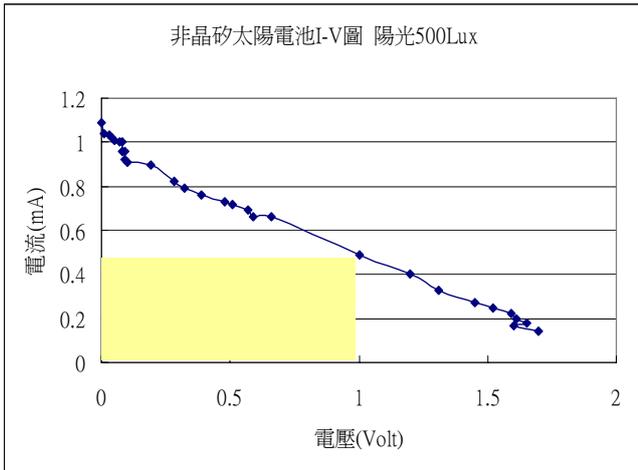


圖(十二)

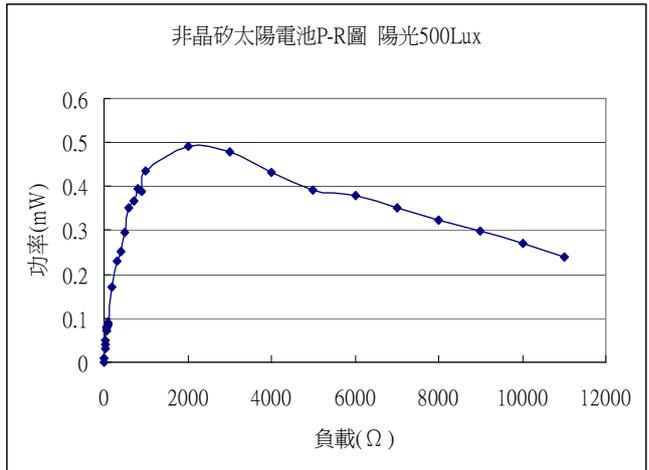
$$FF = \frac{30}{(3.9 \times 15)} = 51.2\%$$

2.相同太陽電池種類，相同光源，不同照度(500Lux、1000Lux)

(1) 照度 500Lux (非晶矽太陽電池，陽光照射)



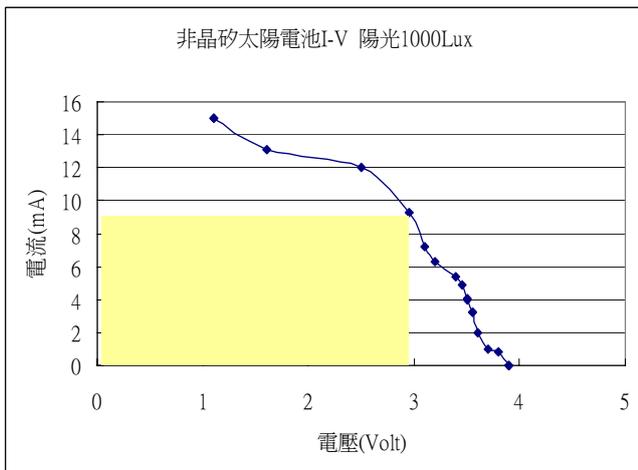
圖(十七)



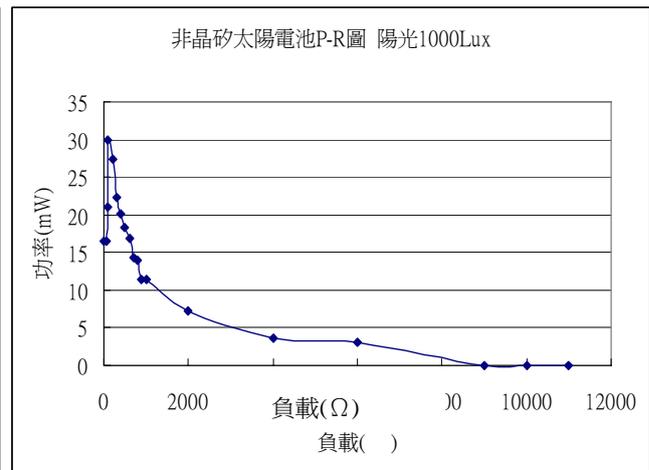
圖(十八)

$$FF = \frac{0.49}{(1.7 \times 1.09)} = 26.4\%$$

(2) 照度 1000Lux (非晶矽太陽電池，陽光照射)



圖(十九)

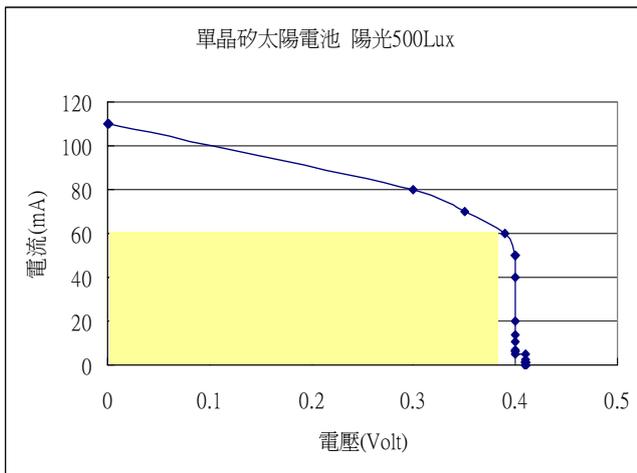


圖(二十)

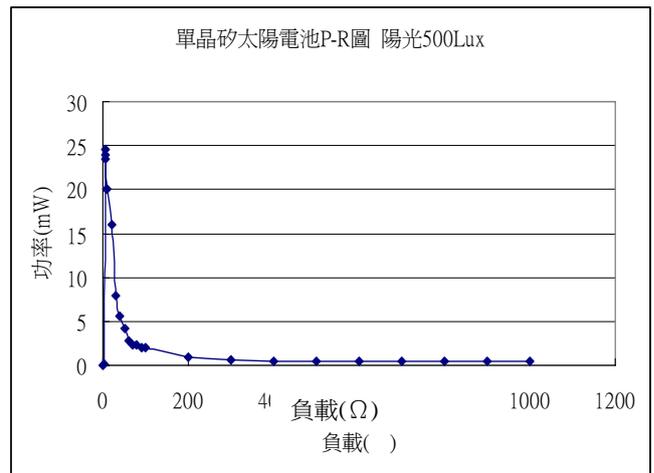
$$FF = \frac{30}{(3.9 \times 15)} = 51.2\%$$

3.相同光源、照度大小下，不同太陽電池種類

(1) 單晶矽太陽電池（陽光照射，照度 500Lux）



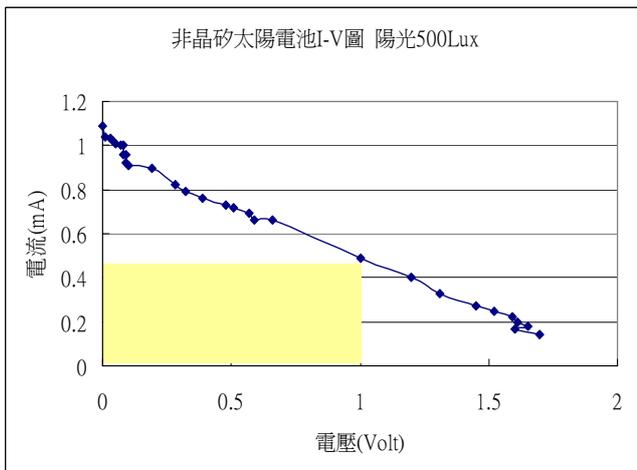
圖(二十一)



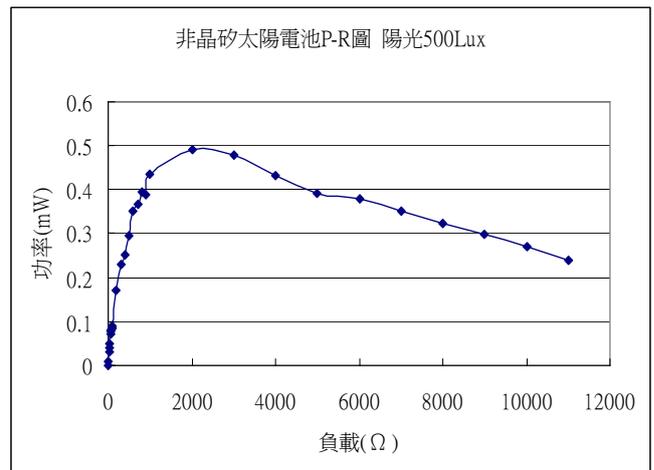
圖(二十二)

$$FF = \frac{24.5}{(0.41 \times 110)} = 54.3\%$$

(2) 非晶矽太陽電池（陽光照射，照度 500Lux）



圖(二十四)



圖(二十五)

$$FF = \frac{0.49}{(1.7 \times 1.09)} = 26.4\%$$

(五) 實驗討論

1. 光源種類

- (1) 同一太陽電池，相同照度，以陽光照射者之 FF 略勝一籌。
- (2) 以單槍投影機照射時，負載 100Ω 時功率最大，為 12.8 毫瓦；以陽光照射，負載 100Ω 時功率亦最大，為 30 毫瓦，由此可知陽光為較適合太陽電池工作的環境。
- (3) 由於陽光的照度難以控制，所以我們以偏振片互相旋轉來控制入射光的量，進而使照度穩定，降低天候因素所造成的實驗誤差。

2. 照度

- (1) 照度較大者，其開路電壓與短路電流皆較大。
- (2) 照度大者之 FF 大於照度較小者。
- (3) 照度 500Lux，負載為 800Ω 時功率最大，為 8.97 毫瓦；當照度調為 1000Lux 時，負載為 100Ω 時功率最大，為 12.8 毫瓦。顯示照度愈大，最大功率也愈大，其適合的負載愈小。

3. 不同太陽電池

- (1) 以陽光照射，相同照度下，單晶矽太陽電池輸出電流與電壓比非晶矽太陽電池大。
- (2) 出現最大功率時的電阻值，單晶矽太陽電池比非晶矽太陽電池小。
- (3) 單晶矽太陽電池負載為 6Ω 時功率最大，為 24.5 毫瓦；非晶矽太陽電池負載為 2000Ω 時功率最大，為 0.49 毫瓦。

* 降低實驗誤差方法：

1. 實驗時必須注意照度的一致，可利用偏振片做適當調整。尤其陽光的照度時有變化，會對電壓、電流值造成明顯影響。
2. 不同負載下之 $I-V$ 曲線與理論略有差異，可能是實驗誤差和環境因子所致，例如大氣的變化、入射角度的誤差是外在光線的漫射，都可能影響。

【實驗四】 $\cos \theta$ 因子對太陽電池之影響

(一) 實驗目的

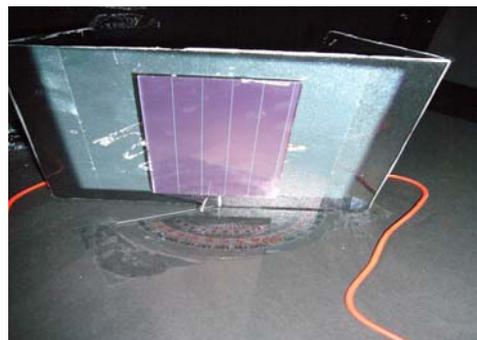
了解光線照射角度的 $\cos \theta$ 對太陽電池之電壓、電流之影響。

(二) 儀器設備

(1)非晶型太陽能板、(2)暗箱、(3)電腦、(4)單槍投影機、(5)毫安培計、(6)伏特計、(7)照度計、(8)電線、(9)鱷魚夾、(10)太陽電池架、(11)量角器、(12)大頭針



實驗四儀器設備、裝置圖

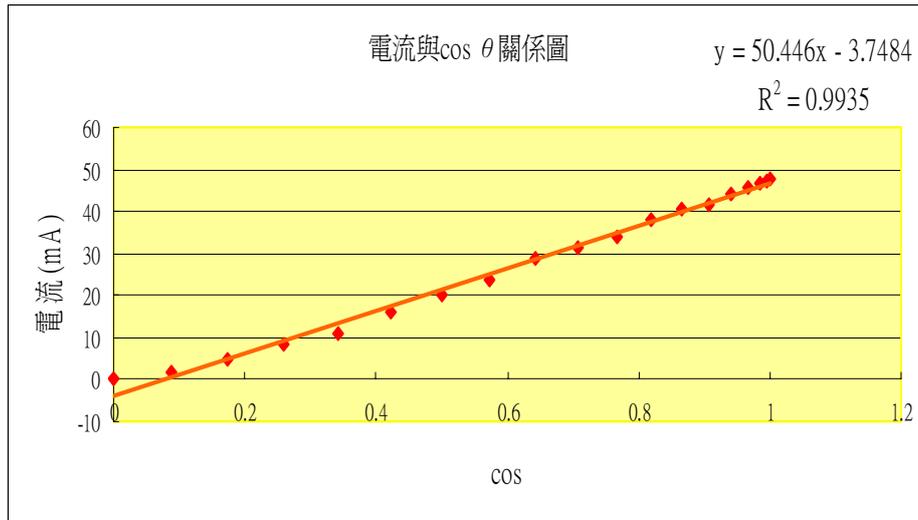


以量角器了解 $\cos \theta$ 值實驗圖

(三) 研究過程

1. 將大頭針插在太陽能板上、下兩側，並固定在自製的黑色架上
2. 連接毫安培計和太陽能板，用單槍投影機照射之
3. 固定量角器，測量不同角度時的電壓與電流

(四)研究結果



圖(三十)

(五)實驗討論

1. 光線垂直入射時電流及電壓最大。電流、電壓值隨入射角增加而變小。
2. 使用太陽能板時必須隨時調整它與入射陽光之角度，以充分利用陽光。
3. 爲了校正光源與太陽電池法線的夾角是否如量角器所標示，我們在太陽能板上下兩端插置大頭針，以竿影成像作爲校正。且之所以插置在上下兩端，是因爲要確保再上下兩側受光角度一致，若插置中間則有破壞內部構造、電路之虞。
5. 當光線與法線成零度時，因爲照射面積(A)最大所以功率最大，但因太陽會移動，使用平面鏡反射可使入射光較多，由此可知 $A \cdot \cos \theta \propto I$ 。

【實驗五】光線與經過大氣層厚度之影響

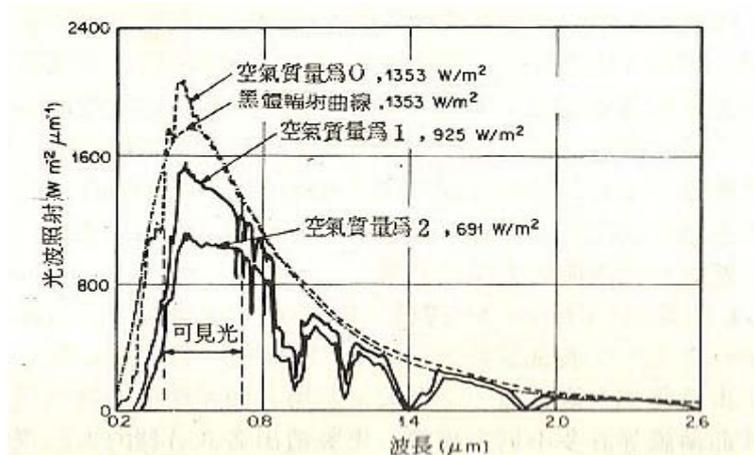
(一) 實驗目的

探討所經過大氣層厚度對太陽電池電流的影響。

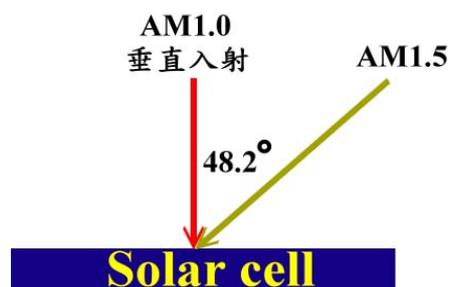
太陽從天頂垂直入射時恰經過 1 個大氣層，定爲 AM1；由此可計算出當入射角爲 48.2°時，經過 1.5 個大氣層，爲 AM1.5，約爲下午 15:00。

可由實驗數據，反推 AM0(陽光不經過大氣層)時的電流。

*AM=Air Mass(陽光經過的大氣厚度)



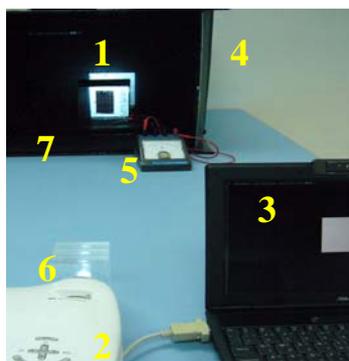
經過 AM0、AM1、AM2 時，光線被空氣吸收的情況 參(三)



由上圖可知，若入射角為 0° 時，經過 1 個大氣層；
則可計算出當入射角為 48.2° 時，經過 1.5 個大氣層

(二) 儀器設備

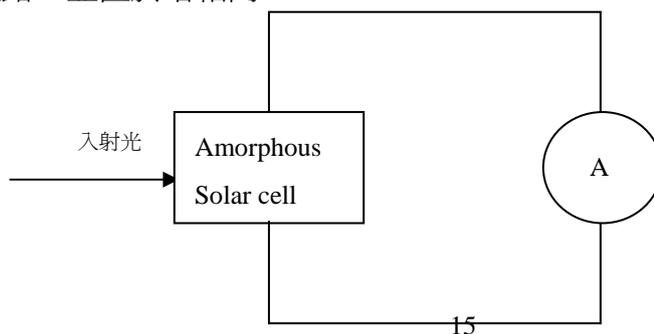
- (1) 非晶型太陽電池、(2) 單槍投影機、(3) 電腦、(4) 暗箱、(5) 安培計、(6) 透明玻璃磚、(7) 量角器、(8) 鱷魚夾、(9) 照度計



實驗五設備及裝置圖

(三) 研究過程

1. 連接電路，並置於暗箱內



圖(三十一)

1. 測量太陽電池處的照度及其電流
2. 分別放置模擬 AM1 的 2 塊玻璃磚及模擬 AM1.5 的 3 塊玻璃磚於單槍投影機前，重複步驟 2
3. 旋轉太陽能板，使其與入射光成 48.2 度角，保持照度相同，測量其電流
4. 實際於正午 12:00 測量太陽電池短路電流，同一天下午 15:00 再度測量

(四) 研究結果

1. 使用玻璃磚模擬大氣層厚度

玻璃磚個數	0	2	3
模擬大氣層厚度	AM0	AM1	AM1.5
照度(Lux)	500	420	360
電流(mA)	5.2	4.5	4

2. 單槍照射角度改變

實驗項目	直射	斜射(入射角 48.2°)	模擬 AM1.5 並斜射
電流(mA)	5.2	4	3

3. 同一天不同時間，測量實際大氣層厚度對電流之影響

實際大氣層厚度	AM1 直射	AM1.5 直射
照度(Lux)	92000	51200
電流(mA)	111	70

(五) 實驗討論

1. 大氣層厚度及照射角度會影響電流強度，且具有特定比例關係。
2. 玻璃磚模擬的結果，計算 $\frac{4}{4.5} \times \frac{4}{5.2} = 0.683761$ ，代表斜射進入 1.5 個模擬的大氣層電流減少約 31.7%
3. 同時考慮經過大氣層厚度以及斜射的影響，計算 $4 \times \frac{4}{5.2} = 3.076923$ ，與實驗值 3 約略相符。
4. 測試實際之 AM1 及 AM1.5，計算：假設經過一大氣層透光的比例為 x ，則經過 1.5 個大氣層時之透光比例為經過一大氣層時之 $x^{0.5}$ 倍

$$x^{0.5} = \frac{70}{111} \quad x = 0.397695$$

即陽光經過 1 個大氣層 39.77% 可透過，減少 60.23%。

5. 由 4 可推知，AM0(陽光不經過大氣層)電流為 $111 \div 0.397695 = 279.1084\text{mA}$
6. 空氣其實對陽光照度、太陽電池電流的影響很大。故晴朗的中午時效果最佳。陽光入射角變大或陰雨天，效果都會變差。
7. 非中午的時段，應將太陽能板正對太陽，使光線垂直入射，避免 $\cos \theta$ 因子的影響。

【實驗六】太陽電池能隙測量

(一)實驗目的

了解太陽能電池材料能隙的大小。

(二)儀器設備

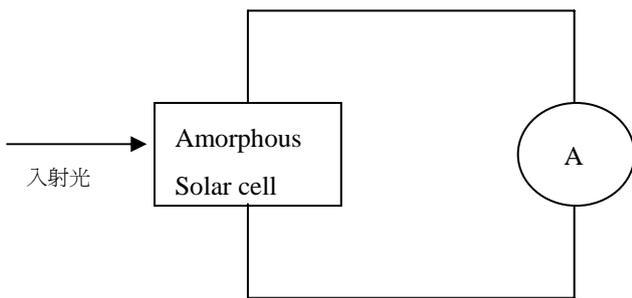
(1)非晶型太陽能板、(2)濾光片(波長：黃 540nm、橘 580nm、紅 640nm)、(3)單槍投影機、(4)暗箱、(5)安培計、(6)電線、(7)鱷魚夾、(8)電腦



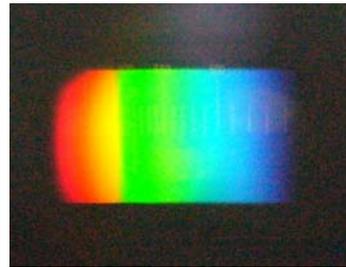
實驗六儀器設備

(三)研究過程

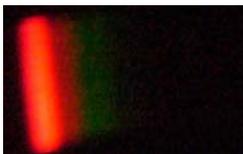
5. 連接好以下電路並至入黑箱中



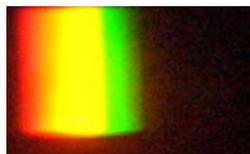
圖(三十二)



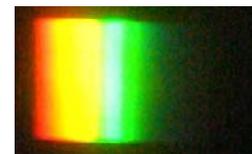
連續光譜



紅色濾光片光譜



橙色濾光片光譜



黃色濾光片光譜

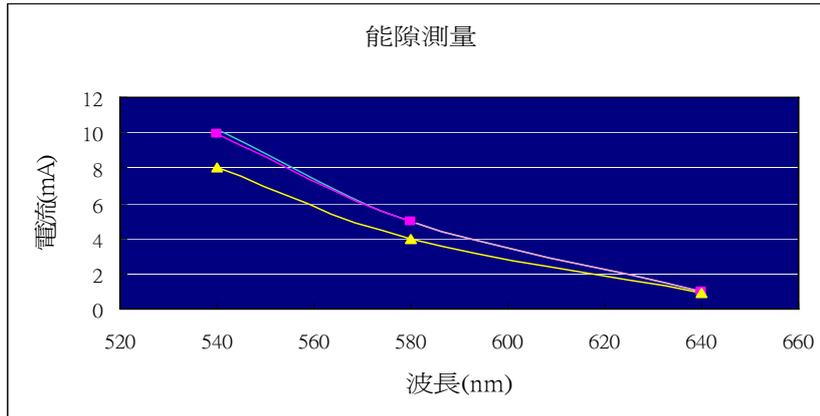
2. 以濾光片(波長為黃 540nm)擋住單槍投影機的鏡頭，照射太陽電池

3. 測量短路電流，橘 580nm、紅 640nm 濾光片以此類推

4. 增加照度以提高電流

5. 重複步驟 2、3

(四)研究結果



圖(三十三)

求出三條關係線公式，並計算出 x 截距，取平均值即是能激發太陽能板之能量最小的光線之波長。

$$\frac{(662.16 + 658.84 + 658.97)}{3} = 659.99(\text{nm})$$

$$\text{能隙(eV)} = \frac{1240(\text{nm} \cdot \text{eV})}{\text{波長}(\text{nm})} = \frac{1240(\text{nm} \cdot \text{eV})}{659.99(\text{nm})} = 1.878816(\text{eV})$$

(五)實驗討論

1. 利用各種不同規格之濾光片，將比標示之波長更短(即能量更高)的光線濾去，觀察其對電流之影響。
2. 關係線之 x 截距代表無論什麼照度的入射光，其光電流均為 0mA，即所能激發太陽能板之最低能量光的波長，由此可計算出能隙。
3. 利用照度改變電流，截距仍大致相同。顯示只要半導體之性質相同，其能隙皆一樣，與照度無關。
4. 使用毫安培計，可以減少誤差。
5. 需特別注意外來光線的影響，避免讓單槍投影機以外的光照射太陽電池。
6. 此太陽電池的材料應是非晶矽 Amorphous(室溫下能隙 1.7eV)，但因濾光片波長為廠商所提供，現有的儀器也無從校正，而造成實驗上之誤差。

【實驗七】短路電流與溫度的關係

(一)實驗目的

探討溫度對太陽電池短路電流的影響。

(二)儀器設備

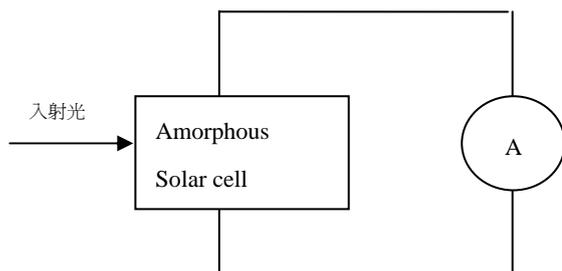
(1)非晶型太陽能板、(2)濾光片(波長：黃 540nm、橙 580nm、紅 640nm)、(3)單槍投影機、(4)暗箱、(5)液態氮、(6)測溫計、(7)安培計、(8)鱷魚夾、(9)筆記型電腦



實驗七儀器設備

(三)研究過程

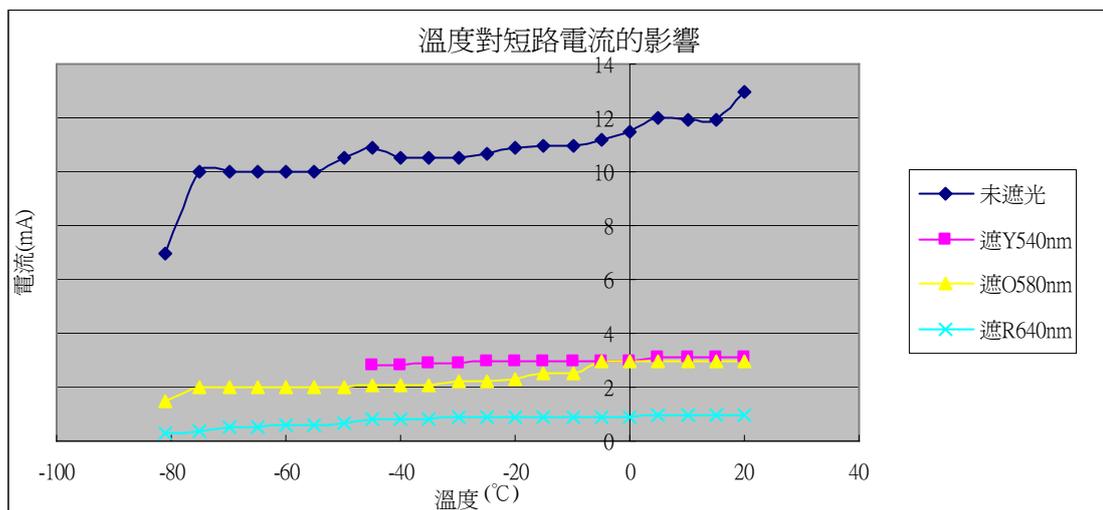
1. 連接好以下電路並置入黑箱中



圖(三十四)

2. 將太陽能板置入液態氮中使其降溫，並將測溫器平貼於其上。
3. 使用黃 540nm 濾光片遮住單槍投影機的鏡頭，使其照射太陽能板。
4. 讓溫度逐漸升高至室溫，每五度一間隔測量其短路電流。
5. 橙 580nm、紅 640nm 濾光片依此類推。

(四)研究結果



圖(三十五)

(五)實驗討論

1. 可通過紅色濾光片濾光之光線的能量為三者之中最小，故同一溫度、照度下，短路電流最小。
2. 短路電流隨溫度漸升。0°C 以下，變化尤明顯。超過 0°C 後，電流上升速率趨緩。
3. 高溫時，激發太陽電池短路電流所需外加的能量變少，同樣能量的光可激發較大的電流。

伍、結論

一、結構及基本性質

1. 太陽電池是一 PN 二極體。作負載使用時亦具有順、逆向偏壓之別。其飽和電流 I_s 為 $0.010611(\text{mA})$ ，而熱電壓 V_T 的倒數 β 為 $5.0109(\text{volt}^{-1})$ 。此二數字為二極體之順向偏壓公式 $I=I_s(e^{\beta V}-1)$ 中的常數。
2. 單晶矽太陽電池作二極體使用時，導通電壓約 0.7V 。兩片串聯時，導通電壓變為約 $1.3\sim 1.4\text{V}$ ；兩片並聯時，導通電壓仍是 0.7V 。
3. 照度增加時，電壓及電流亦增加，其變化的曲線非常接近一線性函數，但不成正比。
4. 因為單槍投影機照度與短路電流的關係非常接近線性，因此太陽電池可以當作一簡單的照度計，測量單槍投影機的照度。其照度與短路電流的關係式：
$$\text{照度(Lux)}=24.135\times\text{短路電流(mA)}-27.814。$$
5. 太陽電池中有內電阻，故實際功率與理論上仍有差異。
6. 太陽電池的功率會隨負載的電阻大小而改變，在特定電阻下有一最大值。但此最大值與理論上可達之最大值(開路電壓及短路電流的乘積)仍有相當大的差距，其填充因子約在 $25\sim 55\%$ 之間。光源條件不同，填充因子大小也不同。
7. 陽光比單槍投影機適合太陽電池工作。
8. 照度較大，填充因子也較大。
9. 光源條件相同時，單晶矽太陽電池輸出電流與電壓大於非晶矽太陽電池。

二、各種外界條件對太陽電池的影響

1. 電流值隨光源入射角增加而變小，其大小與入射角之 $\cos \theta$ 成正比。
2. 波長大於 $645.51(\text{nm})$ 的光線，無論什麼照度，皆無法激發非晶矽太陽電池形成光電流。由此可推知此非晶矽太陽能電池的能隙為 $1.920962(\text{eV})$ 。
3. 太陽光受大氣層阻擋，部分波長的光會被大量吸收。經過的大氣層厚度愈大，所獲得的陽光能量會愈小，電流亦隨之減少。
4. 陽光經過 1 個大氣層透光的比例為 39.77% 。
5. AM0(陽光不經過大氣層)下的短路電流為 279.1084mA 。

陸、參考資料

- 參一、Adel S. Sedra、Kenneth C. Smith 著。曹恆偉、林浩雄譯(民 88)。微電子電路(上)。臺北市：台北圖書有限公司。
- 參二、林明憲(民 96)。太陽電池技術入門。台北縣：全華圖書股份有限公司。
- 參三、施敏著。馮武雄譯(民 76)。半導體元件物理學。臺北市：中央圖書出版社。
- 參四、第二屆亞洲區物理奧林匹亞競賽試題。

【評語】 040108

1. 以市售矽太陽能板對照度入射角、光源種類在不同偏壓下測出電壓、電流值找出不同負載時之最大功率，並獲具體結論。團隊分工與合作良好。
2. 雖對單晶與非結晶太陽能板比較分析，資料豐富，唯大部分測量探討之物理內容與問題較為常見。