

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

III-V 多接面太陽電池內建電場的研究

Study of the built-in electric field of III-V multi-junction solar cells

計畫編號：1012001INER024

受委託機關(構)：中原大學

計畫主持人：沈志霖

核研所聯絡人員：楊智超

聯絡電話：(03)2653249

E-mail address：jlshen@cycu.edu.tw

報告日期：101.12.05

目 錄

目錄.....	i
中文摘要、關鍵字.....	1
英文摘要、關鍵字.....	2
壹、計畫起源與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	5
一、採用之方法與原因.....	5
(一) 建立以調製光譜研究太陽能電池的內建電場與轉換效率的 探討.....	5
(二) 以電流-電壓曲線特性研究三接面太陽能電池效率.....	10
參、主要發現與結論.....	13
一、主要發現.....	13
二、結論.....	27
肆、參考文獻.....	28

中文摘要：

我們利用電調製反射光譜量測磷化銦鎵太陽能電池，得到隨偏壓增加其內建電場減小之趨勢圖，並利用太陽能電池之電流-電壓曲線圖得到收集效率隨偏壓的趨勢圖，而藉由上述兩趨勢圖，我們可以帶入公式得到樣品隨偏壓變化之介面復合速度與少數載子遷移率比值。我們也發現隨著照光功率增加而內建電場有減小的趨勢，我們利用公式擬合此趨勢並加以討論。

從電調製反射光譜量測兩種不同砷化鎵太陽能電池，發現兩樣品在照光功率的增加下，內建電場減少量之趨勢有所差異，利用公式去擬合發現其差異是兩樣品之逆向飽和電流不同所致。

關鍵詞：

內建電場、III-V 族太陽能電池、法蘭克振盪

Abstract :

This thesis studied the built-in electric field of InGaP solar cells by electroreflectance(ER) measurements. With the increased bias, a decrease of the built-in electric field was found. Using current-voltage characteristics and the built-in electric field as a function of bias, we can get the information about the interface recombination velocity and minority carrier mobility. With the increased illumination power of a laser, a trend of decreasing built-in electric field was found. We fitted built-in electric field as a function of the illumination power by a formula associated with the short-circuit current.

Two kinds of GaAs solar cells under different illumination power were measured by ER. The results show that built-in electric field in each GaAs solar cell has been reduced by increasing the illumination power. The decrease of the built-in electric field for these two solar cells was found to be different. Using a formula to fit the experiments, we found that the difference in the decrease of built-in electric fields is due to a difference of reverse saturation current.

Key words :

Built-in electric field 、 III-V solar cell 、 FKO

壹、計畫緣起與目的

有鑑於能源危機問題，尋找再生能源方案已經到了刻不容緩的地步。一般太陽能電池可分為有機太陽能電池及無機太陽能電池兩種，其中無機太陽能電池是以半導體p-n介面所組成。在無機太陽能電池的材料中，常選用IV、II-VI 或III-V族等化合物半導體，如：矽(Si)、鍺(Ge)、砷化鎵(GaAs)、碲化鎘(CdTe)、硫化鎘(CdS)、磷化銦(InP)、磷化銦鎵(InGaP)等。此外，亦有多晶(polycrystalline)半導體與半導體異質結(hetero-junction)等。這些材料的能隙皆可吸收一部份的太陽光光譜且有高的遷移率與載子生命期，可以應用於光伏能量轉換(photovoltaic energy conversion)。實際上較常用的太陽能電池材料為矽，因為矽是地球上第二多的元素，且其無毒又有長久的發展。矽的能隙為1.12eV，可吻合大部份的太陽光光譜。由於矽為間接能隙半導體，因此對光的吸收不好，故以矽為主要吸收層的太陽能電池光電轉換效率不是最佳。事實上目前具有最佳的光電轉換效率為III-V族化合物半導體太陽能電池。III-V族化合物半導體之所以具有比矽基太陽能電池更高的光電轉換效率，主要原因在於III-V族化合物半導體的能帶結構通常為直接能隙。III-V族化合物半導體的單界面太陽能電池，其能量轉換效率達到30 %[1]，相較於矽半導體之轉換效率20 %[2]高出許多；近年來，III-V族化合物半導體的多界面太陽能電池也是發展迅速，此類型的太陽能電池由多種不同能隙

的半導體材料所組成，不同半導體之間由穿隧層所連接。光線入射後，由不同能隙的半導體分別吸收，故可以減少電子與聲子的交互作用而提高太陽能電池的轉換效率達40%以上[3]。

調制光譜 [4-7]自 1964 年發展至今約有三十餘年的時間，由於調制光譜是一種非接觸性、非破壞性且易於著手的量測方法，所以早已被使用於研究半導體的電子結構和微結構，如超晶格、量子井、異質界面等。近來由於調制光譜技術的非破壞性的優點使得業界更利用此一技術來鑑定實際的元件，如高速電子遷移率電晶體、異質界面雙極性電晶體、面射型雷射等。由於實驗是量測材料受到某一週期性的物理量微擾所產生的反射率變化，故具有一微分形式的譜線，能將許多微細結構的訊號強調出來，以得到許多有用的參數，包括了能帶間的躍遷、載子濃度、雜質效應、單軸性應力、激子作用的強弱、半導體表面及介面間的電場、費米能階在表面的能量、深層缺陷、活化能、材料均勻度及化合物的組成等。

由於多界面太陽能電池是未來的趨勢，以磷化銦鎵(上層)、砷化鎵(中層)以及鍺(底層)之三界面太陽能電池最為普遍，欲了解三界面太陽能電池之光電特性，不仿先從各層太陽能電池著手。相較於砷化鎵，磷化銦鎵鮮少人對其作光電特性研究。本文就是利用電調製反射光譜(Electroreflectance，簡稱 ER)量測磷化銦鎵太陽能電池在不同偏壓與不同雷射照光功率的內建電場變化，以及電流電壓曲線圖，利用公式擬合

之結果做討論；而兩不同的砷化鎵太陽能電池在不同雷射照光功率下的內建電場變化量之趨勢差異，藉由公式擬合也可反應出樣品逆向飽和電流的不同。

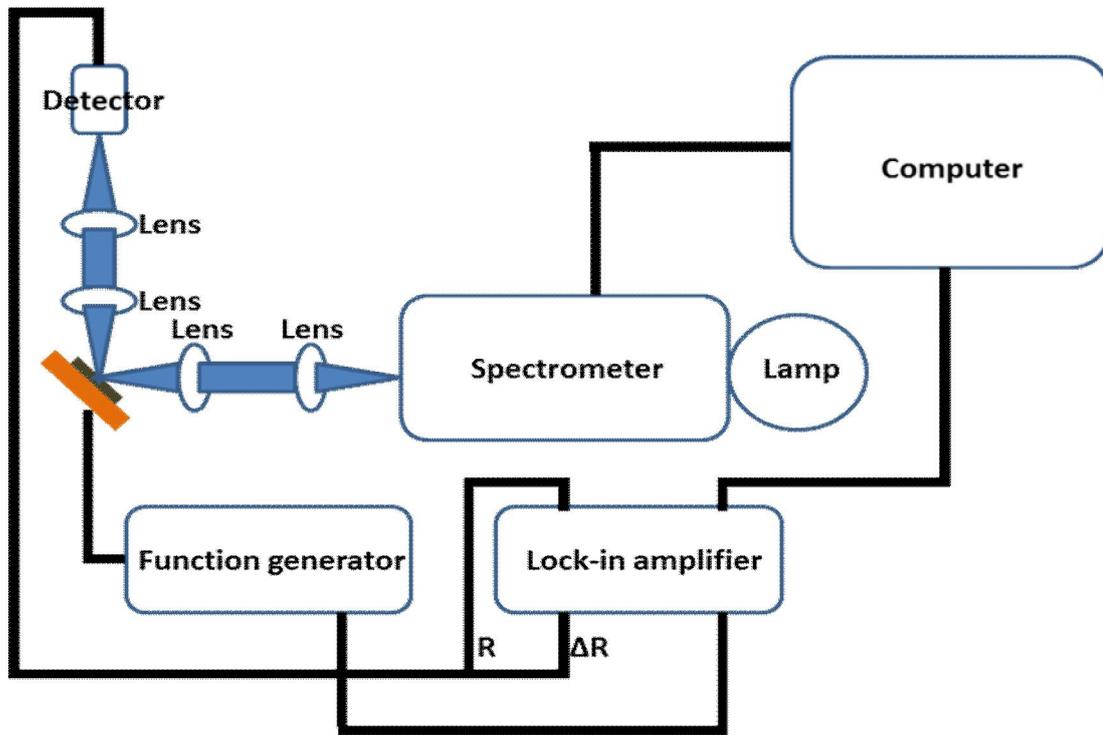
貳、研究方法與過程

一、採用之方法與原因

(一) 建立以調製光譜研究太陽能電池的內建電場與轉換效率的

探討：

電場調制反射光譜量測系統如圖一所示，其作用方式為樣品放於一基座上，並利用訊號產生器給樣品一固定頻率之交流電壓作為調製源，當光經過光譜儀分成各色光之後，以透鏡聚焦在樣品上，反射光也以透鏡收集照設於光檢測器，鎖相放大器收到光檢測器之交流(ΔR)及直流(R)電壓訊號，傳送至電腦，電腦控制光譜儀並處理接收之訊號，即可得到反射率微分之光譜訊號($\Delta R/R$)。



圖一 電調製反射光譜量測系統

原理如下：

調制光譜(modulation spectroscopy)是指利用樣品的光學性質，對樣品加以週期性的微擾，使樣品的光學性質產生相同週期的微小變化量，所得到的反射光變化量的光譜。而利用調制光譜學做半導體特性量測的方法不論在低溫或室溫環境下皆操作簡便，並能突顯布里淵區的臨界點附近的能量躍遷，有效除去光譜的背景訊號。再配合樣品的介電函數所發展出的一套理論，雖然我們並不能夠直接測得介電函數，但是因為介電函數與電子能帶之結構有敏銳的相關性，如對表面或介面電場反應都很靈敏等，近年來已被廣泛的應用在研究半導體的電子結構和微結構上。

電場調製光譜在不同電場擾動下有不同的譜線圖形，其能量範圍大致可分為高電場($eFa_0 \cong Eg$)以及中、低電場($eFa_0 \ll Eg$)。其中 a_0 為晶格常數， F 為電場， Eg 是能隙， eFa_0 為電子在晶格內受電場作功得到的能量。當 $eFa_0 \cong Eg$ 時，電場的能量大到足以使能帶間的簡併態分離。因此要了解樣品的能帶結構，我們必須限制外加電場的能量在中低電場範圍內，也就是 $eFa_0 \ll Eg$ 。表一 列出電場強度對應的譜線形狀之關係[8]

電場能量	低電場	中電場	高電場
載子平均能量	$eFa_0 \ll Eg$ $ \hbar\Omega \ll \Gamma/3$	$eFa_0 \ll Eg$ $ \hbar\Omega \geq \Gamma/3$	$eFa_0 \cong Eg$ $ \hbar\Omega \geq \Gamma/3$
譜線圖形	三次微分光譜	Franz-Keldysh Oscillation	Stark effect

表一 各電場強度對應的譜線形狀之關係

其中 $\hbar\Omega$ 稱為光電特徵能量(characteristic electro-optic energy)，可表式

$$(\hbar\omega)^3 = \frac{e^2 \hbar^2 F^2}{8\mu} \quad (1)$$

μ ：電子電洞有效縮減質量

$\hbar\Omega$: 光電特徵能量

Γ : 寬化參數

F: 電場

e: 電子電荷

Franz-Keldysh 效應:

所謂的 Franz-Keldysh 效應是指材料在均勻電場下，吸收譜線會呈現隨入射光能量週期性振盪的情形。當入射光能量小於材料能隙時，吸收譜線會呈指數衰減，而當入射光能量大於材料能隙時，則呈現週期性振盪。此振盪稱為 Franz-Keldysh 振盪(FKO)，當電場變大，則振盪週期變的越大。FKO 的週期與樣品中的電場有著密切的關係，透過 FKO 週期的測量，可求出半導體的內建電場(Built-in electric field)或介面電場。對束縛態諸如激子，雜質態及量子井而言，由於電場無法對粒子加速，其譜線為其絕對的一階導函數。

利用 Airy 函數的漸近(asymptotic)表示式與考慮增寬參數 Γ ，則譜線 $\Delta R/R$ 可簡單的表示為[9]:

$$\frac{\Delta R}{R} \cong E^2 (E - E_g)^{-\frac{(d+1)}{4}} \exp \left[-\frac{\Gamma (E - E_g)^{\frac{1}{2}}}{\hbar\omega} \right] \times \cos \left[\frac{4}{3} \left(\frac{(E - E_g)^{\frac{3}{2}}}{\hbar\omega} \right) - \frac{\pi}{4} (d - 1) \right] \quad (2)$$

$\hbar\Omega$: 光電特徵能量

d: 臨界點的維度

E: 震盪點極值能量

E_g: 能隙

Γ: 寬化參數

臨界點形式	3D	2D	1D	激子
d(維度)	2.5	3	3.5	2

表2 各臨界點形式對應的維度之關係

進一步考慮電子-電洞的庫倫交互作用，則(2)式可表為

$$\frac{\Delta R}{R} \cong E^2 (E - E_g)^{-\frac{(d+1)}{4}} \exp \left[-\frac{\Gamma (E - E_g)^{\frac{1}{2}}}{\hbar \omega} \right] \times \cos \left[\frac{4}{3} \left(\frac{(E - E_g)^{\frac{3}{2}}}{\hbar \omega} \right) + \chi \right] \quad (3)$$

其中χ為任一相位因子(phase factor)與電子-電洞交互作用的強度、維度和短距離散射過程有關，由(3)式得知FKO的極值位置應發生在

$$n\pi = \frac{4}{3} \left(\frac{E - E_g}{\hbar \omega} \right)^{\frac{3}{2}} + \chi \quad (4)$$

其中為E_n 為第n個極值的能量。若以 $\frac{4}{3} \left(\frac{E - E_g}{\hbar \Omega} \right)^{\frac{3}{2}}$ 為縱軸，n為橫軸作

圖亦可得到一斜率為(ħΩ)^{3/2}的斜直線，根據(1)式之定義，我們就可以得到電場的大小。

(二) 以電流-電壓曲線特性研究三接面太陽能電池效率：

太陽能電池是利用p-n接面產生的光伏效應而儲存電能。在此利用一理想p-n接面的電流-電壓曲線特性圖來簡單說明其特性，如圖2所示。

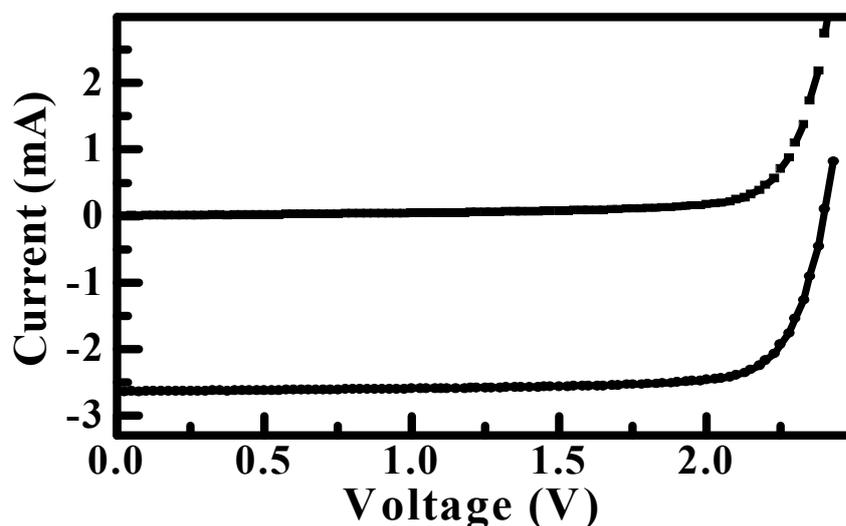


圖2 電流-電壓曲線特性圖

理想電流-電壓曲線以公式(5)所示。當太陽能電池照光時，p-n二極體內會有光電流的產生。因為p-n接面的內建電場方向是從n型指向p型，因此光子被吸收產生的電子-電洞對，電子會往n型端跑，而電洞會往p型端跑，因此電子和電洞二者形成的光電流會由n型流到p型。因為一般二極體的正電流方向是定義為由p型流到n型。因此相對於原本的理想二極體，太陽能電池照光產生的光電流乃一負向電流。而太陽能電池的電流-電壓關係就是理想二極體加上一個負向的光電流 I_L [10]。

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT}} \right) - I_{sc} \quad (5)$$

I：太陽能電池電流 (Current)

I_s ：逆向飽和電流 (saturation current)

q：電子電荷 (charge)

V：太陽能電池電壓 (voltage)

n：理想因子 (ideal factor)

k：波茲曼常數 (Boltamann Constant)

T：絕對溫度 (K)

I_L ：光電流 (photocurrent)

照光後電流-電壓曲線會由原本的第一象限下降至第四象限。而當V=0時有一短路電流(I_{sc})，也就是入射光產生的光電流。當I=0時有一開路電壓(V_{oc})。由於照光後的電流-電壓曲線處於第四象限，可得一最大的輸出功率，如公式(6)。利用公式(7)計算可得照光後最大輸出功率(P_m)與理想的最大輸出功率($I_{sc} \times V_{oc}$)比值，填充係數(FF)，由此比值可知樣品的品質好壞與否，並聯電阻、串聯電阻影響程度。另外，太陽電池的效率(efficiency)為太陽電池將入射光的功率轉換成最大輸出之電功率的比例，如公式(8)，為一般製作太陽能電池最重視的一個結果參數。

$$P_{max} = I_m \times V_m \quad (6)$$

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (7)$$

$$E_{ff} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \quad (8)$$

I_m : 最大輸出功率之電流

V_m : 最大輸出功率之電壓

I_{sc} : 短路電流 (Short-circuit current)

V_{oc} : 開路電壓 (Open-circuit voltage)

P_{in} : 入射光功率

參、主要發現與結論

一、主要發現

3-1 磷化銦鎵太陽能電池之光電特性

圖 3 為磷化銦鎵太陽能電池在不同偏壓下得電調製反射光譜，從圖可觀察出 FKO 的週期現象，根據 FKO 分析方法(圖 4)，就可以得到不同偏壓下樣品的內建電場，如圖 5。

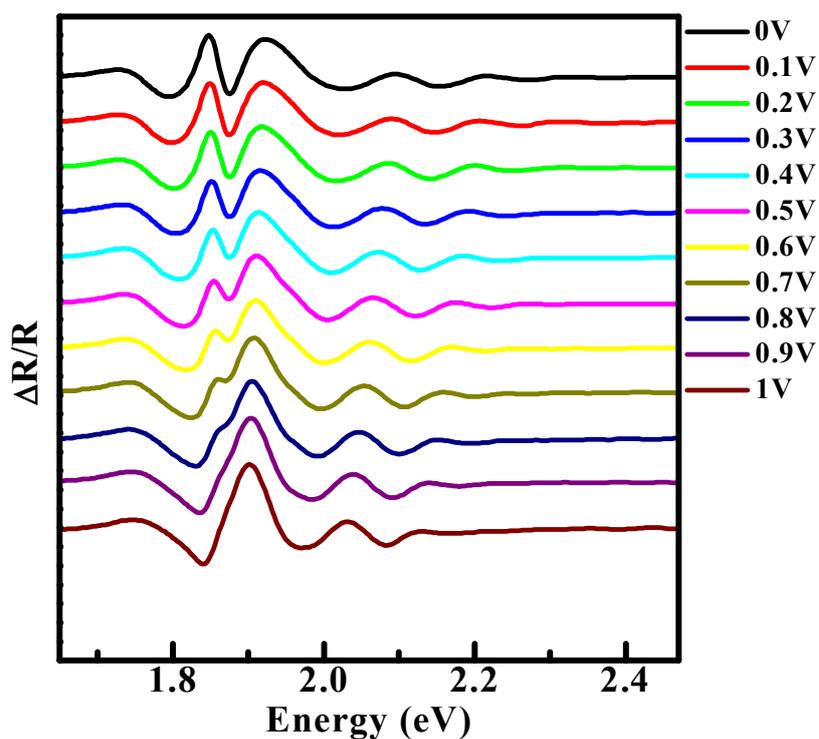


圖 3 磷化銦鎵太陽能電池之不同偏壓下的電調製反射光譜

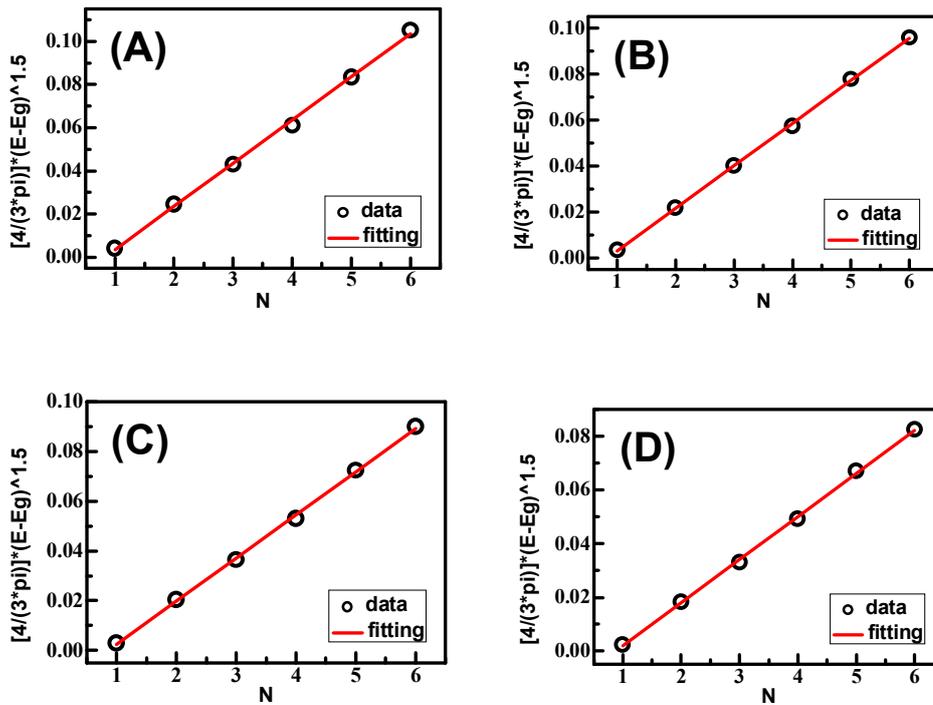


圖 4 磷化銦鎵太陽能電池在不同偏壓下的FKO擬合
(A)0V (B)0.2V (C)0.4V (D)0.6V

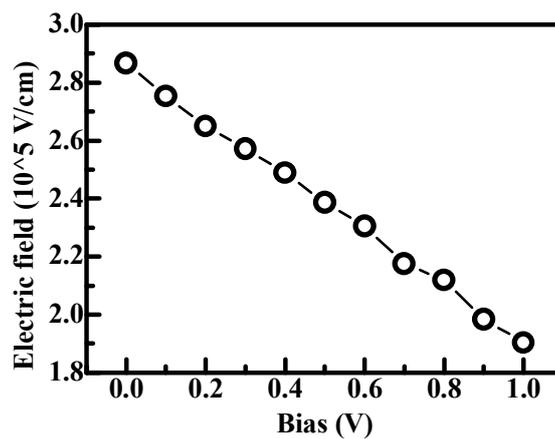


圖 5 磷化銦鎵太陽能電池內建電場隨外加偏壓變化圖

圖 6 為磷化銦鎵太陽能電池電流-電壓曲線圖，黑色線是未照光之曲線，藍色線是照 405nm 雷射 20mW 之曲線圖，紅色線是將未照光曲

線圖直接位移到與照 405nm 雷射 20mW 下同一 I_{sc} 位置，我們可以發現照光下的曲線與未照光位移後的曲線並不是完全吻合，藉由公式(9)[11]可以得到收集效率隨偏壓的變化，如圖 6。

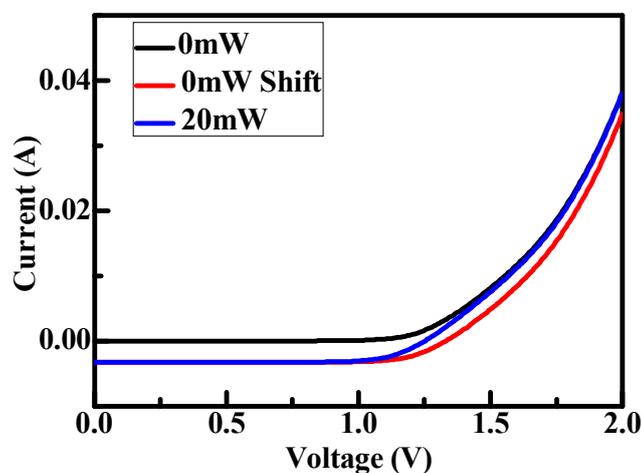


圖 6 磷化銦鎵太陽能電池電流-電壓曲線圖，黑線為未照光，藍線為照 405nm 雷射 20mW，紅線為將未照光曲線位移到與照光同一 I_{sc} 位置

$$I_L(V) = I_{L0}(V)\eta_C(V) \quad (9)$$

$I_L(V)$ ：照光下隨偏壓變化之電流值

$I_{L0}(V)$ ：將未照光下隨偏壓變化之電流值位移到與照光同一 I_{sc} 位置

$\eta_C(V)$ ：隨偏壓變化之收集效率

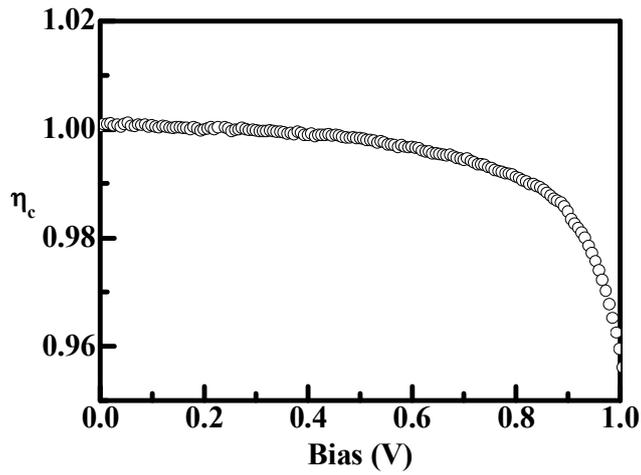


圖 7 收集效率與偏壓作圖

我們再藉由公式(10)[11]便可以求得介面復合速度與少數載子遷移率之比值，如圖 7。

$$\eta_c(V) = \frac{\mu F_0(V)}{S + \mu F_0(V)} \quad (10)$$

$\eta_c(V)$ ：隨偏壓變化之收集效率

S ：介面復合速度

μ ：少數載子遷移率

$F_0(V)$ ：隨偏壓變化之內建電場

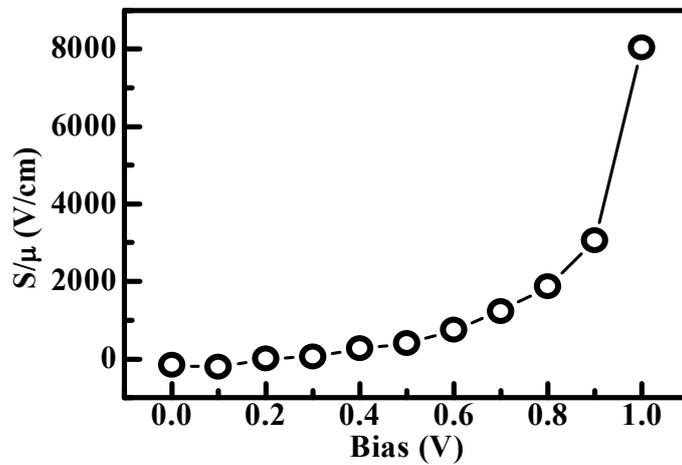


圖 8 介面復合速度與少數載子遷移率比值隨偏壓之變化

我們發現介面復合速度與少數載子遷移率比值會隨偏壓增加而增大，由圖 8 可以確定介面復合速度或是少數載子遷移率至少有一項是偏壓的函數，期待未來我們能從其他實驗中得知其中一參數，再反推另一參數。

圖 9 是量測磷化銦鎵太陽能電池在不同雷射功率下的電調製反射光譜，所選用的雷射為 405nm，探測源是選用鹵素燈經光譜儀分各色光打在樣品上，調製源是使用訊號產生器給樣品 0.1V 之交流電壓，其頻率為 200Hz，而選用的光偵測器是矽。我們一樣可以發現電調製反射光譜在光能量高於磷化銦鎵能隙時，譜線出現許多的 FKO 訊號。從圖 9 可觀察出 FKO 的高低震盪點隨雷射功率增強有紅位移的現象，根據第三章所述的 FKO 分析方法，就可以得到不同雷射功率下樣品的內建電場，如圖 10。

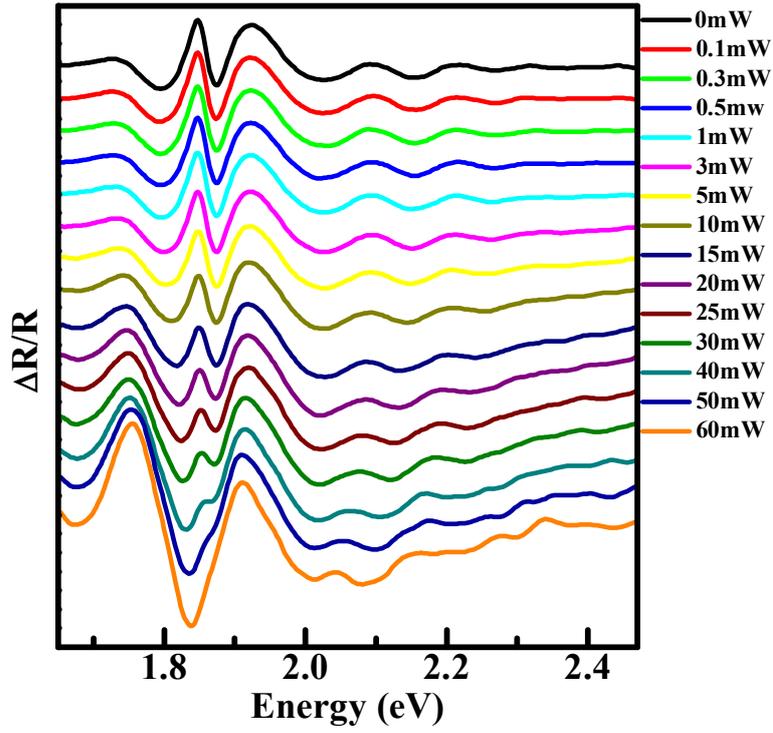


圖 9 磷化銦鎵太陽能電池在不同雷射功率下的電調製反射光譜

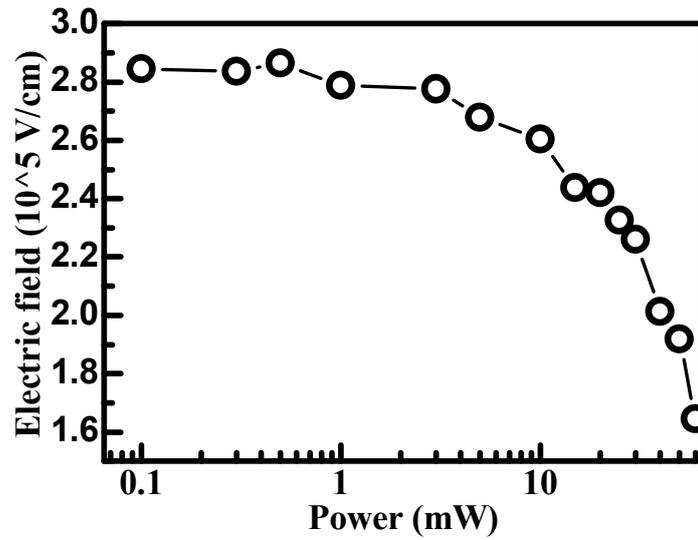


圖 10 磷化銦鎵太陽能電池內建電場與不同雷射功率取對數作圖

從圖 10 我們發現內建電場在超過某一功率時會下降的相當迅速，從公式(11)[12]可以了解到在 $J_{pc} \ll AJ_0$ 時，內建電場幾乎沒有改變；而在 $J_{pc} \gg AJ_0$ 時，內建電場才會有明顯的變化，所以我們將公式(11)去擬合此趨勢，於是我們從未照光之磷化銦鎵太陽能電池得到其逆向飽和電流。對於太陽能電池來說，電流-電壓曲線圖絕對是一個基本又相當重要的量測方法，從實驗中可以得到許多資訊，像是逆向飽和電流、理想因子、串聯電阻、並聯電阻以及最具象徵性的轉換效率。

$$F = F_0 - \frac{n k T}{e W} \ln\left(\frac{J_{pc}}{A J_0} + 1\right) \quad (11)$$

F : 內建電場 (built-in electric field)

F_0 : 未照光之內建電場

n : 理想因子 (ideal factor)

k : 波茲曼常數 (Boltzmann Constant)

T : 絕對溫度 (K)

J_{pc} : 光電流密度 (photocurrent density)

J_0 : 逆向飽和電流密度 (saturation current density)

A : 幾何因子 (geometric factor)

因為公式(11)是光電流與內建電場作圖。圖 11 是不同雷射 (405nm)照光功率下的磷化銦鎵電流電壓曲線圖，之後我們將不同雷射照光功率轉換成所產生的光電流，如圖 12。

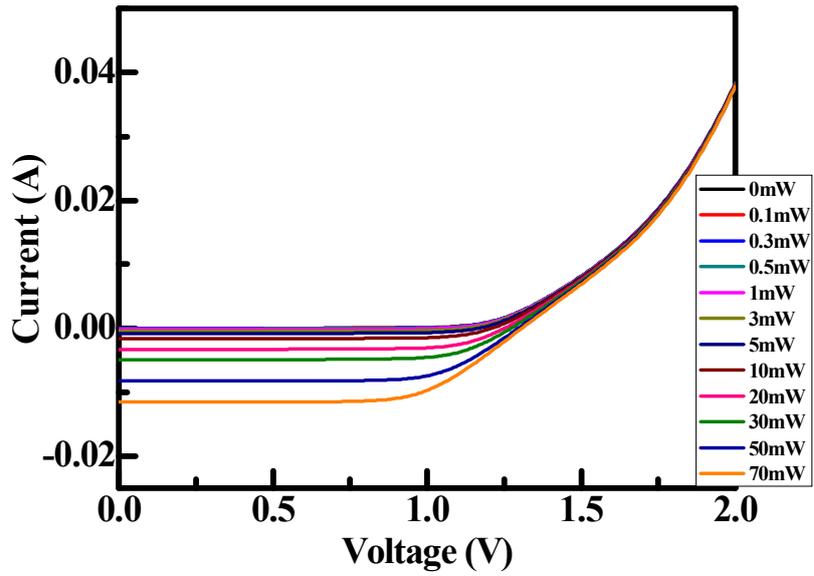


圖 11 不同雷射功率下的磷化銦鎵太陽能電池電流-電壓曲線圖

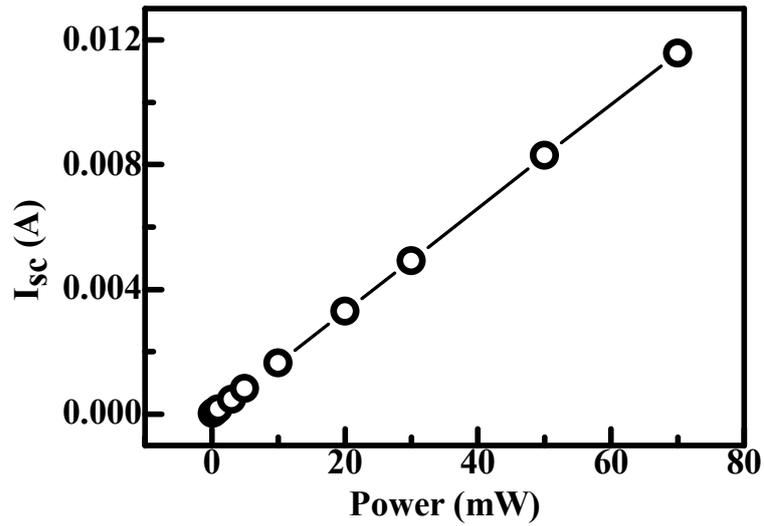


圖 12 磷化銦鎵太陽能電池不同雷射功率與光電流作圖

把不同雷射功率轉換成產生的光電流後取對數與內建電場作圖，如圖 13，再利用從電流-電壓曲線圖所得到的逆向飽和電流代入

公式(11)便可以完整擬合我們的實驗數據，而 J_{pc} 與 AJ_0 的比值是趨勢走向的重要指標。

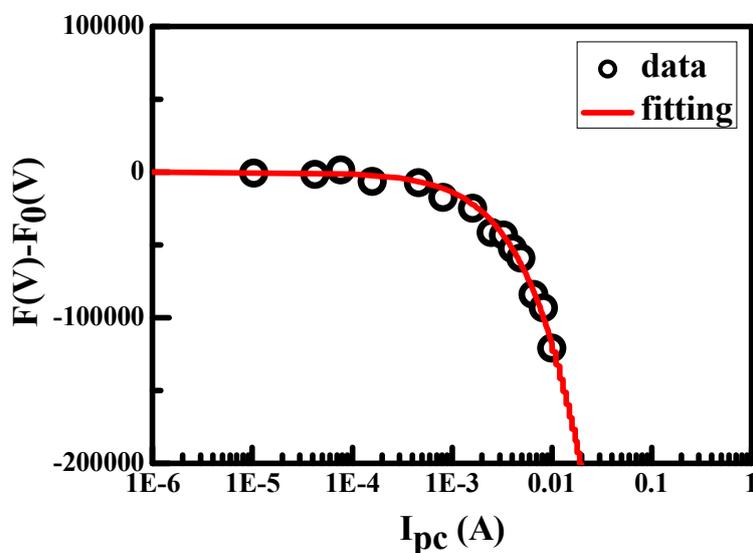


圖 13 黑色圈是磷化銦鎵太陽能電池光電流取對數與內建電場變化量作圖，紅色線是擬合線

3-2 砷化鎵太陽能電池之內建電場分析

砷化鎵太陽能電池不管是在學術界或業界都已有普遍又廣泛的研究，而我們試著將兩砷化鎵太陽能電池有緩衝層、無緩衝層做不同雷射功率下的電調製反射光譜，如圖 14。所選用的雷射為 532nm，探測源是選用鹵素燈經光譜儀分各色光打在樣品上，調製源是使用訊號產生器給樣品 0.2V 之交流電壓，其頻率為 200Hz，而選用的光偵測器是矽。我們一樣可以發現在光能量高於砷化鎵能隙時，電調製反射譜線出現許多的 FKO 訊號，利用第三章所述的 FKO 分析方

法，就可以得到兩砷化鎵太陽能電池在不同雷射功率下樣品的內建電場，如圖 15 與圖 16。

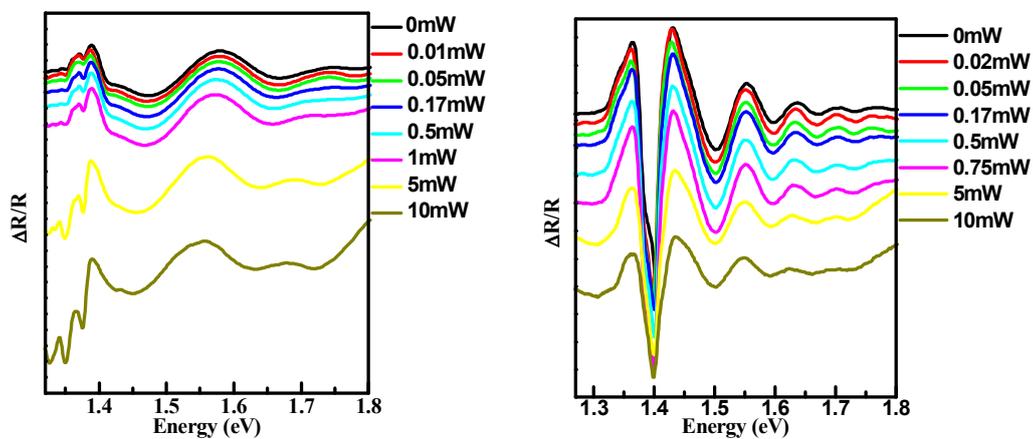


圖 14 砷化鎵太陽能電池有緩衝層(右)與無緩衝層(左)不同雷射功率下的電調製反射光譜

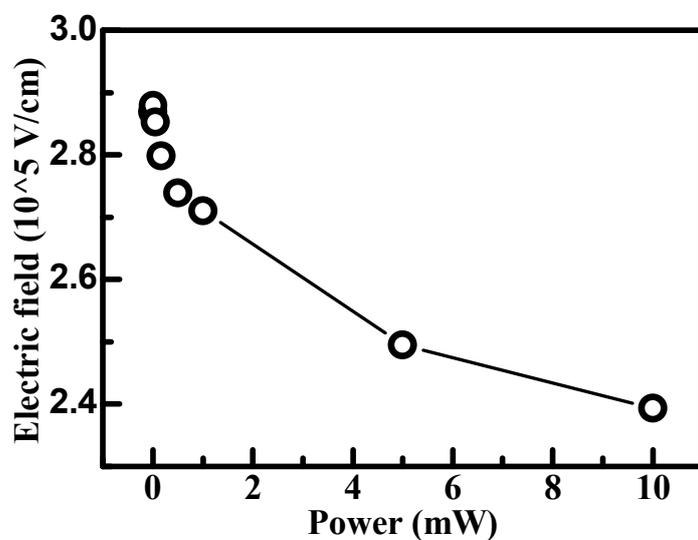


圖 15 砷化鎵太陽能電池無緩衝層不同雷射功率與內建電場作圖

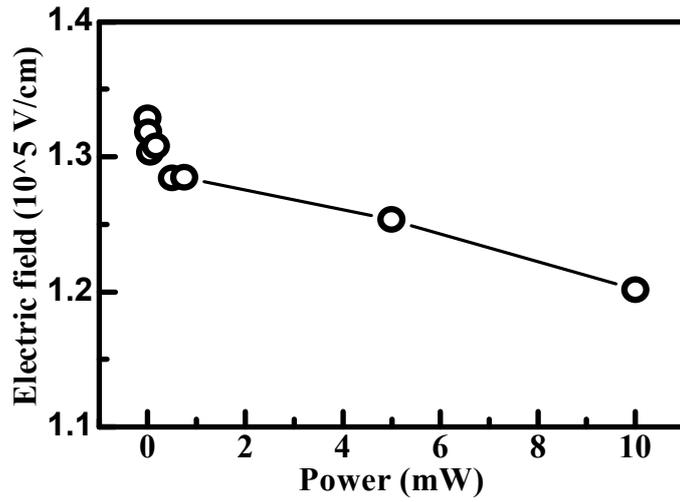


圖 16 砷化鎵太陽能電池有緩衝層不同雷射功率與內建電場作圖

我們想再次利用公式(11)去擬合兩砷化鎵太陽能電池，先將兩樣品做不同雷射照光功率下的電流-電壓曲線圖，如圖 17、圖 18，並轉換成其光電流，如圖 19、圖 20。

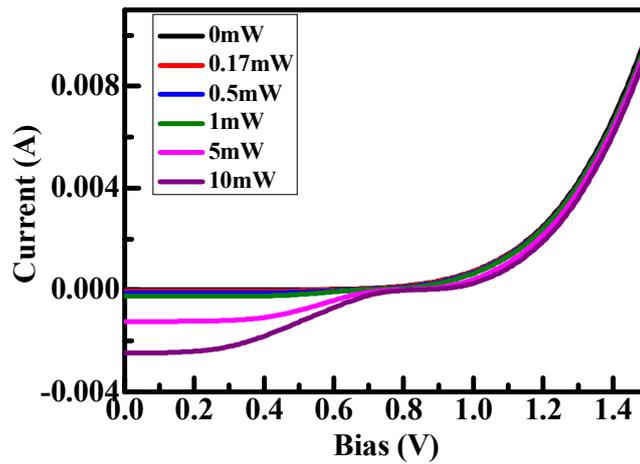


圖 17 不同雷射功率下的砷化鎵太陽能電池無緩衝層
電流-電壓曲線圖

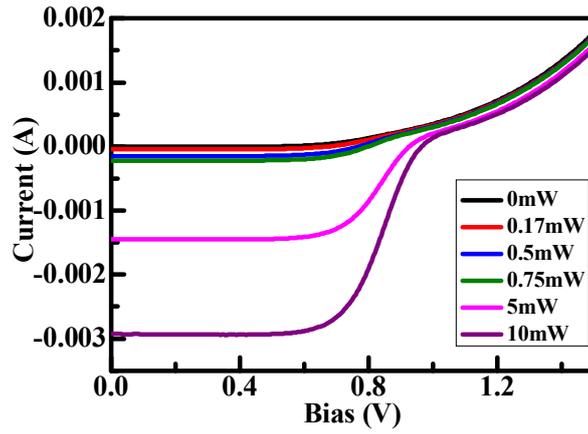


圖 18 不同雷射功率下的砷化鎵太陽能電池有緩衝層
電流-電壓曲線圖

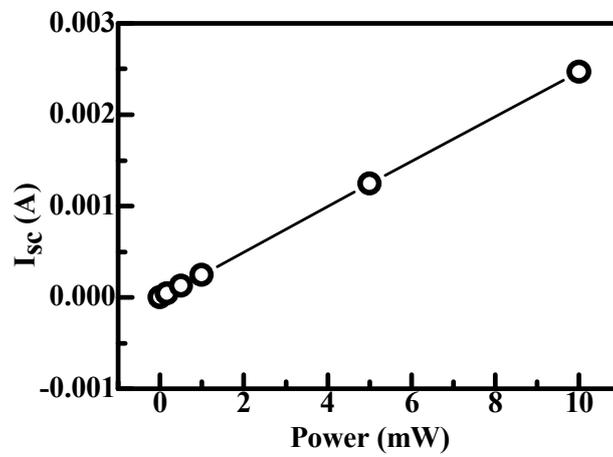


圖 19 砷化鎵太陽能電池無緩衝層不同雷射功率與光電流作圖

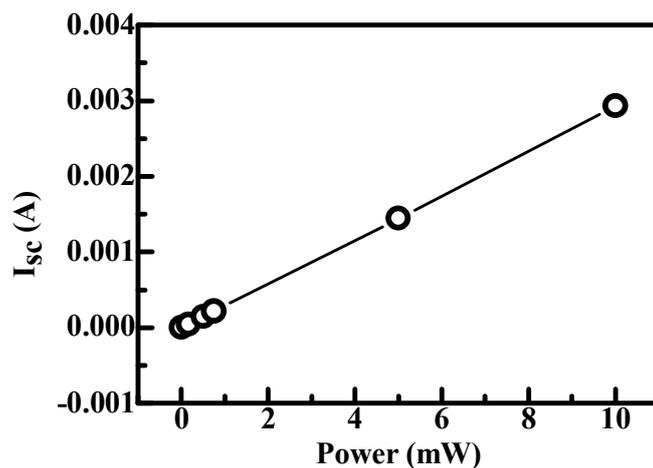


圖 20 砷化鎵太陽能電池有緩衝層不同雷射功率與光電流作圖

把兩樣品不同雷射功率轉換成產生的光電流後取對數與內建電場作圖，如圖 21，並利用公式(11)去擬合。

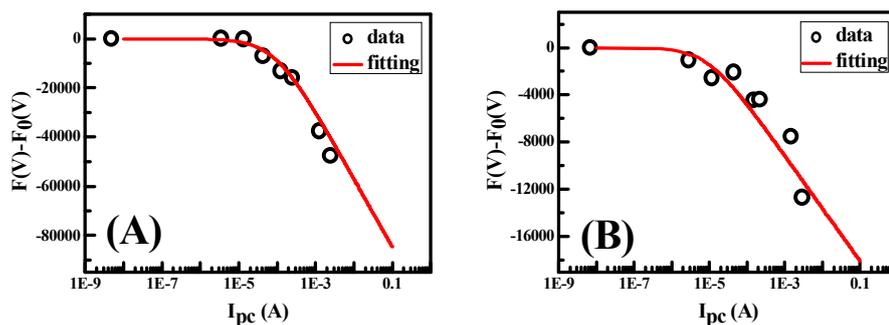


圖 21 黑色圈是砷化鎵太陽能電池光電流取對數與內建電場變化量作圖，紅色線是擬合線。(A) 無緩衝層 (B) 有緩衝層

從圖 21 我們擬合樣品的逆向飽和電流也的確是有所不同，如表 3；因為無緩衝層樣品在擬合時逆向飽和電流較大，所以需要較大的

光電流才能有明顯的內建電場變化，相反的，有緩衝層樣品在擬合時逆向飽和電流較小，所以能在較小的光電流產生明顯的內建電場變化。

	擬合參 I_0 數 (A)
無緩衝層	9×10^{-8}
有緩衝層	9×10^{-9}

表 3 兩樣品之擬合參數

二、結論

本論文第一部份利用電調製反射光譜量測磷化銦鎵太陽能電池之光電特性。從樣品電流-電壓曲線圖與變偏壓之電調製反射光譜得到介面復合速度與少數載子遷移率比值隨偏壓增加而增大；而樣品隨著照光功率增加，內建電場相對減小，利用簡化後的公式便可完整擬合實驗結果，並可以了解到在 $J_{pc} \ll AJ_0$ 時，內建電場幾乎沒有改變；而在 $J_{pc} \gg AJ_0$ 時，內建電場才會有明顯的變化。

第二部份是從電調製反射光譜量測兩種不同砷化鎵太陽能電池，發現在照光功率的改變下，內建電場變化量之趨勢有所差異，利用公式去擬合發現其差異是兩樣品之逆向飽和電流不同所致，若逆向飽和電流較大，需要較大的光電流才會有明顯的內建電場變化，相反若逆向飽和電流較小，則較小的光電流便能觀察到內建電場的明顯變化。

我們中原大學光電半導體實驗室團隊與核能研究所太陽能光電組共同發展新量測方式，利用電場調制光譜研究單層太陽能電池的內建電場；本年度更設計一套可適用於三層結構太陽能電池的量測方式，希望藉由建立此一項新的分析技術，探討三層甚或成長多層太陽能電池時的內建電場，相關的成果文獻已經成功發表在期刊[13]中。此量測技術的優點在於為一個非破壞性量測的樣品品質，也可經由此實驗內容進行個子電池層的內建電場量測及互相交互作用。

肆、參考文獻

1. [N. J. Ekins-Daukes, I. Ballard, C. D. J. Calder, K. W. J. Barnham, G. Hill and J. S. Roberts, Appl. Phys. Lett. 82, 1974 (2003).
2. Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Prog. Photovolt: Res. Appl.16, 61 (2008).
3. R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam, Appl. Phys. Lett. 90, 183516 (2007).
4. M. Cardona, in Modulation Spectroscopy (Academic, New York, 1969).
5. D. E. Aspnes, in Handbook on Semiconductors, edited by M. Balkanski (North-Holland, New York, 1980).
6. F. H. Pollak, in Handbook on Semiconductors, edited by M. Balkanski (North-Holland, New York, 1994).
7. H. Shen and M. Dutta, J. Appl. Phys. 78, 2151 (1995).
8. D. E. Aspnes, Surf. Sci. 37,418 (1973)
9. Y. S. Chen, K. S. Wu, D. P. Wang, K. F. Huang and T. C. Huang, Appl. Phys. Lett, 85,4064 (2004).
10. 物理雙月刊，二十七卷五期 (2005)。

11. S. Hegedus, D. Desai, and C. Thompson, *Prog. Photovolt*, 15, 587 (2007).
12. Hideo Takeuchi, Yoshitaka Kamo, Yoshitsugu Yamamoto, and Tomoki Oku, Masahiro Totsuka, Masaaki Nakayama, *J. Appl. Phys*, 97, 063708 (2005).
13. Gia-Wei Shu, Jun-Jie Yang, I-Jen Shu, Ji-Lin Shen, Min-De Yang, Chih-Hung Wu, and Ying-Sheng Huang, *J. J. Appl. Phys.* ,51, 072301 (2012)