

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

III-V 多接面太陽電池的光伏效應的研究
Study of the photo-voltage effect of III-V multi-junction solar cells

計畫編號：1022001INER018

受委託機關(構)：中原大學

計畫主持人：沈志霖

聯絡電話：(03)2653249

E-mail address：jlshen@cycu.edu.tw

核研所聯絡人員：楊智超

報告日期：2013 年 12 月 5 日

目 錄

目錄.....	i
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫起源與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、採用之方法與原因.....	4
(一) 電激螢光影像分析系統.....	4
(二) 以電流-電壓曲線特性研究三接面太陽能電池效率.....	6
(三) 以SPICE程式模擬.....	8
參、主要發現與結論.....	9
一、主要發現.....	9
二、結論.....	31
肆、參考文獻.....	32

中文摘要：

本論文研究在不同雷射照射下三接面太陽能電池的空間解析電激螢光影像。在本研究中，當入射的雷射光只被中間層子電池砷化鎵(頂層子電池磷化銦鎵)吸收，頂層子電池磷化銦鎵(中間層子電池砷化鎵)的電激螢光強度會變弱。隨著入射的雷射光功率越來越大時，電激螢光強度成指數遞減。當入射的雷射光只被底層子電池鍺吸收，頂層子電池磷化銦鎵與中間層子電池砷化鎵的電激螢光強度皆會變弱。從上述結果並利用二極體光伏效應的公式，可以求出三個子電池的光伏電壓(photo voltage)。我們也用SPICE電路模擬，算出三個子電池的光伏電壓，並與實驗結果做比較。

關鍵詞：

電激螢光影像、III-V 族太陽能電池、光伏效應

Abstract :

Spatially-resolved electroluminescence (EL) images in InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells were investigated under irradiation of different laser. Upon irradiating the laser with the energy absorbed by the InGaAs middle subcell (InGaP top subcell) only, the EL intensity of the InGaP top subcell (InGaAs middle subcell) is quenched. With increasing the irradiation power of the laser, the EL intensity quenches exponentially. Upon irradiating the laser with the energy absorbed by the Ge bottom subcell only, the EL intensity of the top subcell and middle subcell is quenched. From the above results and the diode equation, photovoltages of three subcells can be determined. We use Simulation Program Integrated Circuit Emphasis (SPICE) to simulate the photovoltages of three subcells in the triple-junction solar cell. The simulated results are in good agreement with the experimental results.

Key words :

Electroluminescence images 、 III-V solar cell 、 photovoltages

壹、計畫緣起與目的

太陽能電池由半導體 p-n 介面所組成。利用光照射 p-n 介面產生光伏效應(Photovoltaic effect)，因此把太陽光能量轉換成電能即為太陽能電池(solar cell)。太陽能電池的種類繁多，依材料的種類來區分，可分為 IV 族：單晶矽(single crystal silicon)、多晶矽(polycrystal silicon)、非晶矽(amorphous silicon)，III-V 族：砷化鎵(GaAs)、磷化銦(InP)、磷化鎵銦(InGaP)，II-VI 族：碲化鎘(CdTe)，III-VI 族：硒化銦銅(CuInSe_2)、等。這些材料有較高的載子遷移率與載子生命期且能隙吻合一部分太陽能光譜，可適用於光伏能量轉換(photovoltaic energy conversion)。然而，實際上較常用的太陽能電池材料是矽(Si)，矽在地表上容易取得且價格便宜無毒，但轉換效率頂多只有 17%。近年來以 III-V 族化合物半導體為主，如砷化鎵(GaAs)、磷化銦鎵(InGaP)等、III-V 族太陽能電池轉換效率比矽太陽能電池高很多，是因為 III-V 族太陽能電池多為直接能隙(direct bandgap)，單接面太陽能電池其能量轉換效率最多只能達到 27%。而多接面太陽能電池由不同能隙接面的半導體組成，各接面分別吸收不同波段的太陽光，有效利用太陽光全光譜以提高光電轉換效率，逐漸成為現今發展的趨勢。近幾年已證明，三接面太陽能電池效率已達 44.5% 以上[1,2]。為了進一步改進轉換效率和穩定性，電激螢光(EL)圖像技術最近已被用來作為提供空間解析的太陽能電池的光電，和材料特

性的信息。其無破壞、快速描述等特性是提供太陽能電池參數的重要工具：如少數載流子擴散長度[3-5]、缺陷或裂紋[6]、匯流條焊接觸點檢測功率損失[7]。此外，電激螢光圖像可量測外部量子效率[8-9]，薄層電阻[10]，串聯和並聯電阻[11]，電壓和電流等[12-14]。

在本研究中，我們對三接面太陽能電池使用了不同激發光能量的電激螢光圖像來研究三接面太陽能電池的光伏效應。當入射的雷射光只被中間層子電池砷化鎵(頂層子電池磷化銦鎵)吸收，頂層子電池磷化銦鎵(中間層子電池砷化鎵)的電激螢光強度會變弱。隨著入射的雷射光功率越來越大時，電激螢光強度成指數遞減。當入射的雷射光只被底層子電池鍍吸收，頂層子電池磷化銦鎵與中間層子電池砷化鎵的電激螢光強度皆會變弱。這些現象可由外加光偏壓下，多接面太陽能電池的接面變化與子電池空乏區的電壓變化來解釋。此研究深入了解三接面太陽能電池各子電池的二極體光伏效應，未來在三接面太陽能電池元件的設計或模組間的改善將會有所幫助。

貳、研究方法與過程

一、採用之方法與原因

(一) 電激螢光影像分析系統

電致螢光(EL)是對晶片施予外加偏壓而使晶片釋放螢光。

實驗中所使用之 EL 影像擷取鏡頭為電荷耦合器(charge-coupled device camera CCD)，有效解析度為 1200 x 1024 像素如圖 1，影像分析的空間解析度受限於光學系統，如果樣品為 5×5 平方毫米的測量是在一幀內，那麼空間分辨率為 5 mm/1024 像素。電致螢光量測步驟首先為避免實驗環境中其他不必要之光源影響，所以實驗環境必須於暗室下進行機台。並且使用方格紙在 CCD 擷取影像範圍中心點做定位，以免目標物至於影像邊緣時造成的魚眼效果造成影像的變形。電流的供給採取定電流方式，電流條件為 35 mA，曝光時間為 1 ms。

電致螢光實驗量測的步驟如下：

- (1) 將晶片先固定在電致螢光機台內(將晶片正極與電致螢光量測機台的負極連接，晶片負極與機台正極連接)。
- (2) 打開電致螢光影像擷取的拍攝程式 Gentec，設定所需拍攝的參數。
- (3) 開啟電致螢光電源開關，開啟電源供應器開關，給予定電流。(4) 進行晶片拍攝及影像擷取。
- (5) 在我們的研究中，將樣品進一步利用雷射照射(波長為 532 nm、780 nm、1064 nm)，以不同激發光能量的電激螢光圖像來研究三接面太陽能電池的光伏效應。

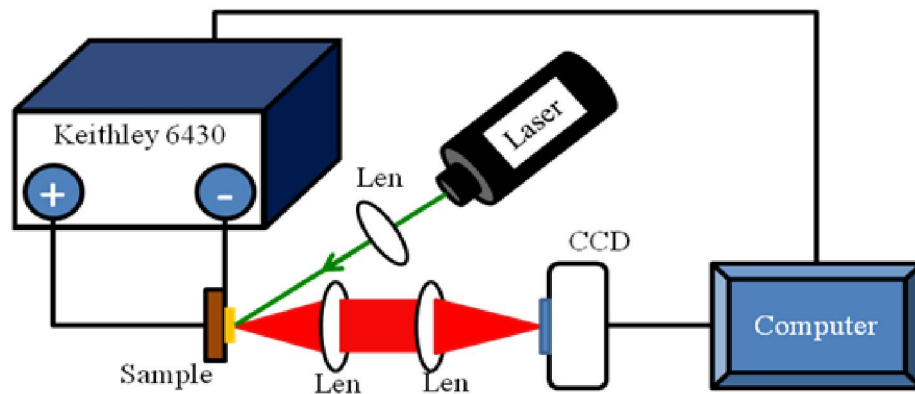


圖1 電激螢光影像量測系統架設圖。

(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。

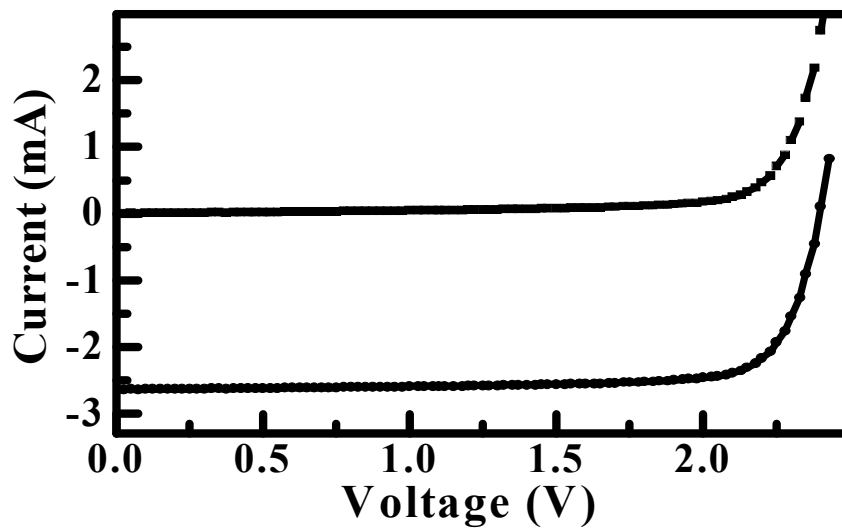


圖2 電流-電壓曲線特性圖

理想電流-電壓曲線以公式(1)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。

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT}} \right) - I_{sc} \quad (1)$$

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)

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]。

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(2)。利用公式(3)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(4)，為一般製作太陽能電池最重視的一個結果參數。

$$P_{\max} = I_m \times V_m \quad (2)$$

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3)$$

$$E_{ff} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \quad (4)$$

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

(三) 以SPICE程式模擬

以積體電路為重點的模擬程式(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, SPICE)，是一種用於電路描述與模擬的

語言與模擬器軟體，用於檢測電路的連接和功能的完整性，以及用於預測電路的行為。SPICE 主要用於類比電路和混合訊號電路的模擬。由此我們便可以清楚地了解：SPICE 這套程式原先發展的目的是為了模擬電子系統中日益重要的積體電路。

由於積體電路不如傳統電路一般可以在麵包板(breadboard)或印刷電路板(Printed circuit board)上做實驗來驗證設計結果，所以為了提高積體電路正式生產時的良率(yield)及降低成本，勢必要在進入實際製程階段前對其電路特性做「檢查」，確保性能在規格範圍之內。我們利用這麼強大功能的軟體分析都多接面太陽能元件是很好工具。

參、主要發現與結論

一、主要發現

3-1 改變雷射功率下的電激螢光影像

圖 3 為室溫下三接面太陽能電池外加 35mA 的電激螢光光譜圖。頂端子電池磷化銦鎵以及中間子電池砷化鎵螢光峰值分別在 1.81 eV、1.41 eV，磷化銦鎵以及砷化鎵屬於直接能隙(direct bandgap)，而底部子電池鍺螢光峰值有高能量(0.8 eV)與低能量(0.67 eV)部份，分別為直接能隙(direct bandgap)與間接能隙(indirect

bandgap)，本文以能量大於直接能隙之雷射來探討電激螢光影像圖變化。

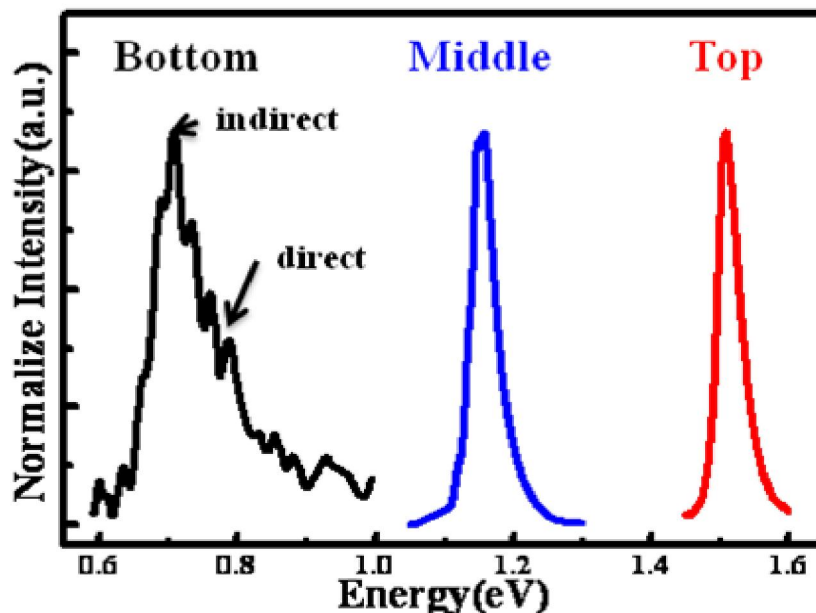


圖 3 室溫下不同子電池在 35mA 下之電激螢光光譜圖

圖 4(a)~(b)分別為頂部子電池磷化銦鎵在施以 35mA 電流下無照射 780nm 雷射電激螢光影像圖。圖 5(a)~(b)分別為頂部子電池磷化銦鎵在施以 35 mA 電流下無照射 1064 nm 雷射電激螢光影像圖。圖 6(a)~(b)分別為中間子電池砷化鎵($\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$)在施以 35 mA 電流下無照射 532 nm 雷射電激螢光影像圖。圖 7(a)~(b)分別為中間子電池砷化鎵在施以 35 mA 電流下無照射 1064 nm 雷射的電激螢光影像圖。

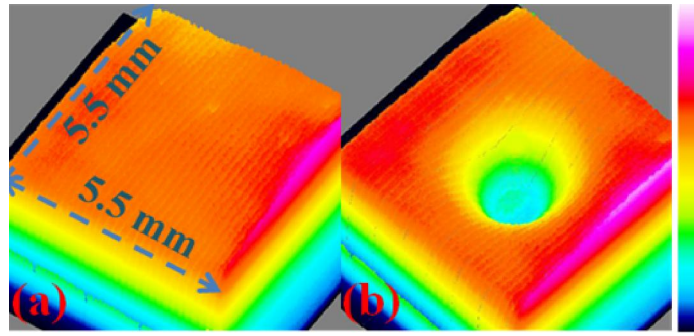


圖 4 在 35 mA 下的頂部子電池磷化銦鎵電激螢光影像圖(a)無照射雷射(b)照射 780 nm 雷射。

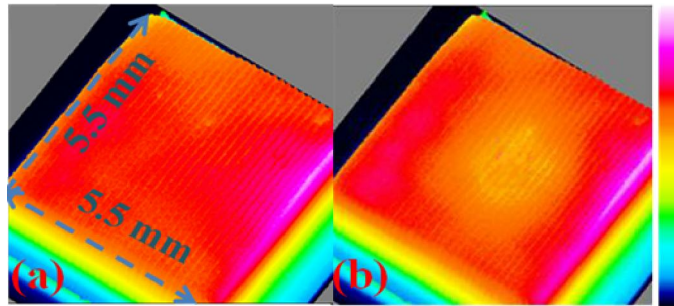


圖 5 在 35 mA 下的頂部子電池磷化銦鎵電激螢光影像圖(a)無照射雷射(b)照射 1064 nm 雷射。

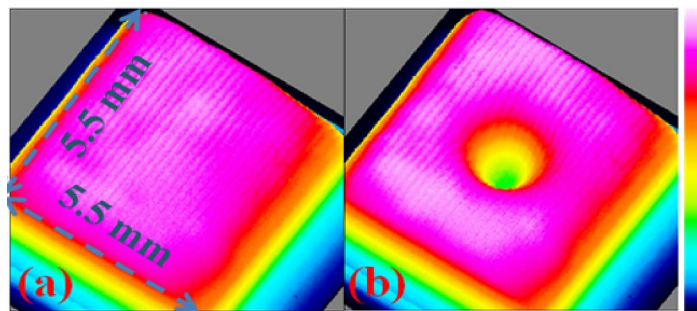


圖 6 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵電激螢光影像圖(a)無照射雷射(b)照射 532 nm 雷射。

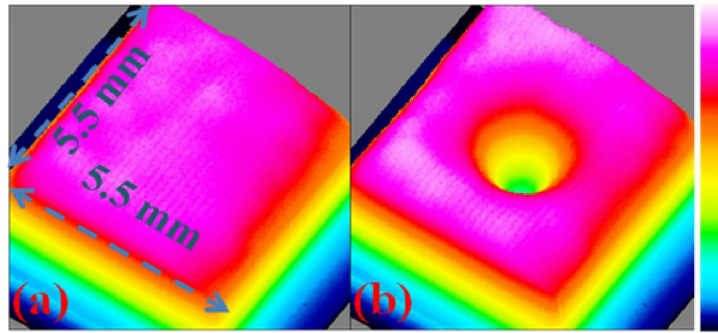


圖 7 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵電激螢光影像圖(a)無照射雷射(b)照射 1064 nm 雷射。

圖 8 (a)-(d)為頂部子電池磷化銦鎵在施以 35 mA 電流下照射不同功率的 780 nm 雷射的電激螢光影像圖，雷射輸出強度變化範圍 0 到 86 mW。圖 9 (a)-(d)為頂部子電池磷化銦鎵在施以 35 mA 電流下照射不同功率的 1064 nm 雷射的電激螢光影像圖，雷射輸出強度變化範圍 0 到 86 mW。圖 10 (a)-(d)為中間子電池砷化鎵在施以 35 mA 電流下照射不同功率的 532 nm 雷射的電激螢光影像圖，雷射輸出強度變化範圍 0 到 86 mW。圖 11 (a)-(d)為中間子電池砷化鎵在施以 35 mA 電流下照射不同功率的 1064 nm 雷射的電激螢光影像圖，雷射輸出強度變化範圍 0 到 86 mW。

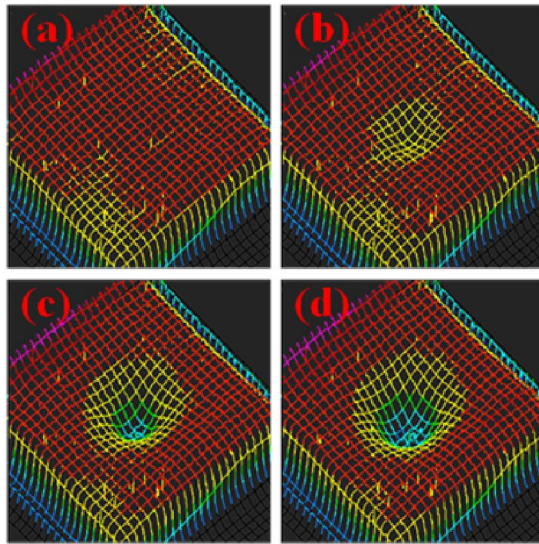


圖 8 在 35 mA 下的頂部子電池磷化銦鎵照射不同功率的 780 nm 雷射電激螢光影像圖(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW。

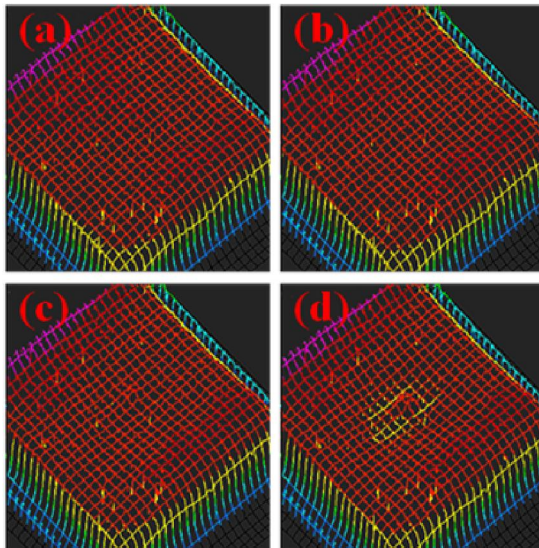


圖 9 在 35 mA 下的頂部子電池磷化銦鎵照射不同功率的 1064 nm 雷射電激螢光影像圖(a)0 mW (b)2.58 mW (c)10.05 mW (d)20.48 mW。

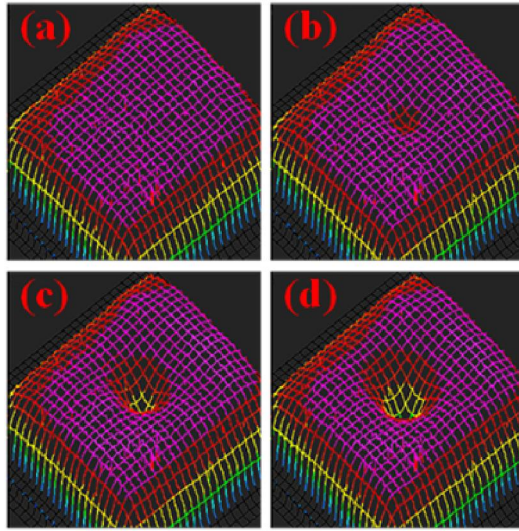


圖 10 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵照射不同功率的 532nm 雷射電激螢光影像圖(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW。

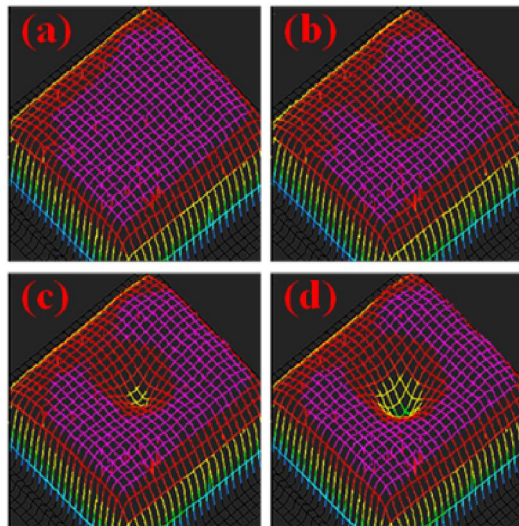


圖 11 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵照射不同功率的 1064 nm 雷射電激螢光影像圖(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW。

我們觀察到電激螢光影像強度在入射雷射的光點內和周圍有明顯的下降。發現當雷射照射功率增加時，電激螢光影像強度會降低，電激螢光影像的行為可以證明不同子電池之間有相互作用。

圖 12 顯示頂部子電池磷化銦鎵電激螢光影像強度隨不同功率的 780 nm 雷射光照射沿著一維分佈的記錄。圖 13 顯示頂部子電池磷化銦鎵電激螢光影像強度隨不同功率的 1064 nm 雷射光照射沿著一維分佈的記錄。圖 14 顯示中間子電池砷化鎵電激螢光影像強度隨不同功率的 532 nm 雷射光照射沿著一維分佈的記錄。圖 15 顯示中間子電池砷化鎵電激螢光影像強度隨不同功率的 1064 nm 雷射光照射沿著一維分佈的記錄。照射的雷射功率增加，電激螢光影像強度減小，電激螢光影像強度面積積分隨著照射的雷射功率指數型的變化下降。

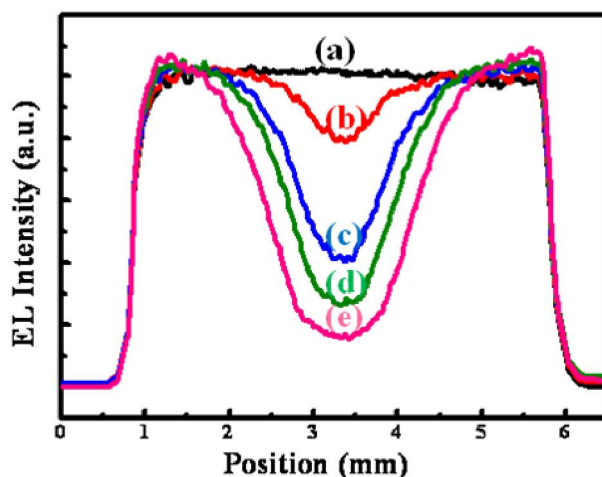


圖 12 在 35 mA 下頂部子電池磷化銦鎵照射不同功率的 780 nm 雷射電激螢光影像圖一維分佈(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW(e)55.8 mW。

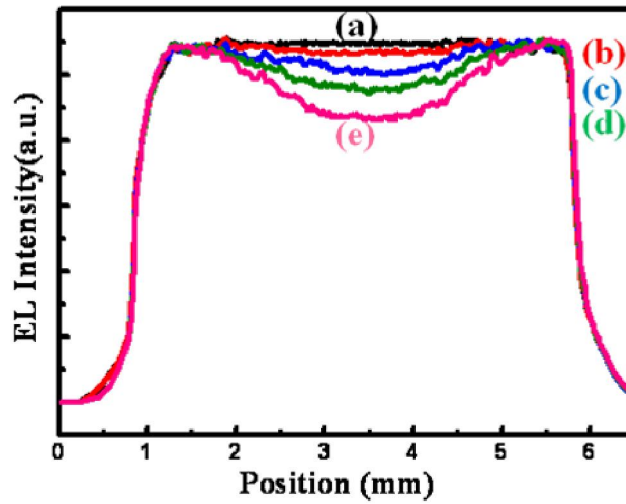


圖 13 在 35 mA 下的頂部子電池磷化銦鎵照射不同功率的 1064 nm 雷射電激螢光影像圖一維分佈(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW(e)55.8 mW。

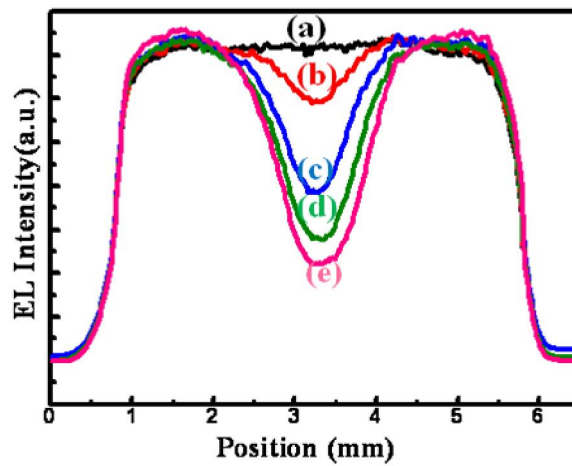


圖 14 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵照射不同功率的 532 nm 雷射電激螢光影像圖一維分佈(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW(e)55.8 mW。

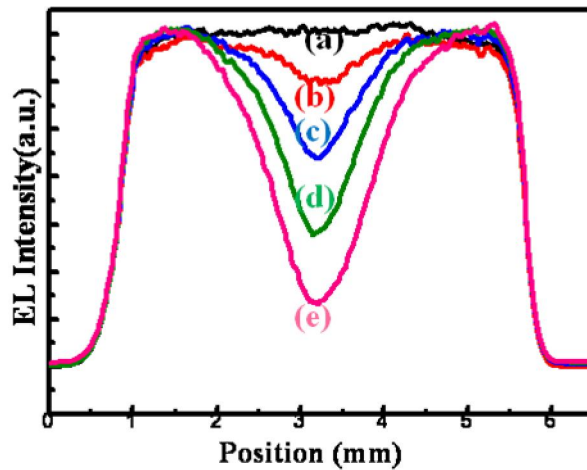
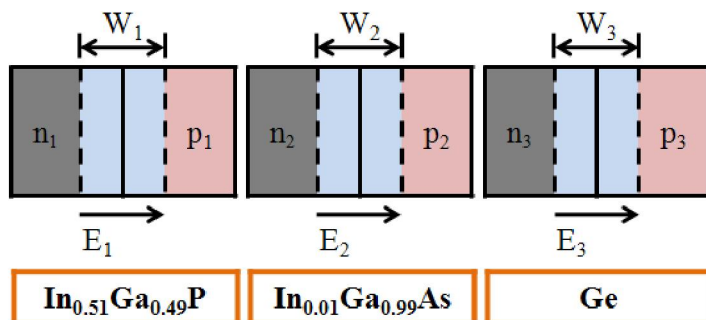


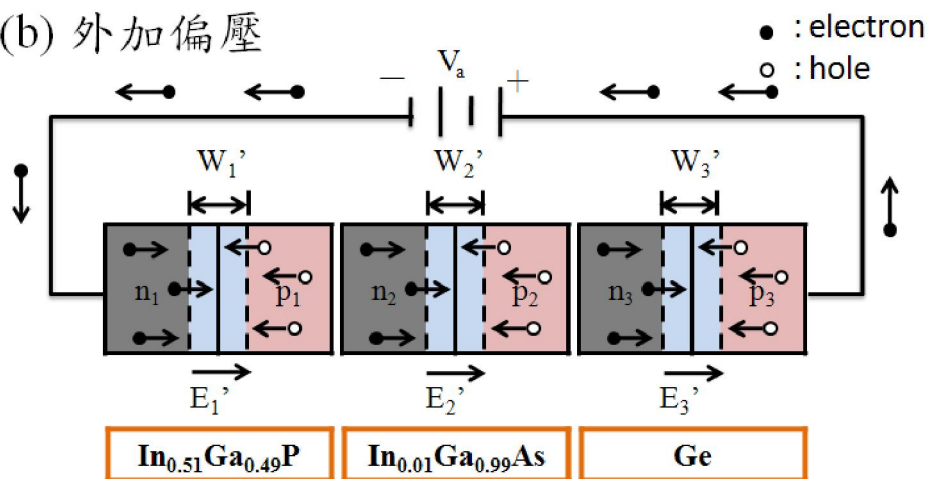
圖 15 在 35 mA 下的中間子電池砷化鎵照射不同功率的 1064 nm 雷射電激螢光影像圖一維分佈(a)0 mW(b)2.58 mW(c)10.05 mW(d)20.48 mW(e)55.8 mW。

我們可以定性地解釋上述實驗結果，三接面太陽能電池的原理圖顯示在圖 16。圖 16(a) 顯示了三接面太陽能電池的三個子電池，在零偏壓下，各子電池有不同的內建電場(E)和空乏區(W)。圖 16 (b) 顯示正向偏壓下三接面太陽能電池的三個子電池。內建電場(E)和空乏區(W)隨著外加偏壓的變化而改變；當偏壓增加內建電場(E)和空乏區(W)階下降。實心圓代表輸入電子，空心圓代表輸入電洞。結合兩個輸入電流。圖 16 (c)顯示三接面太陽能電池在正向偏壓和雷射照射下的結構。雷射在中間子電池產生的許多電子-電洞對(光電流)。光子載流漂移是因為內建電場和擴散的濃度梯度。光子產生的

(a) 無外加偏壓



(b) 外加偏壓



(c) 外加偏壓和打一道雷射

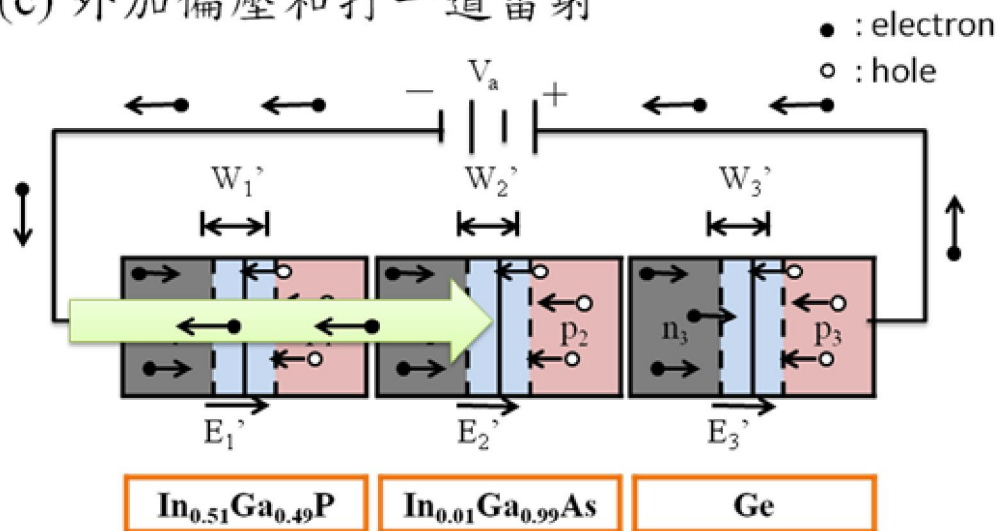


圖 16 三界面太陽能電池的三個子電池，在偏壓下以及照射雷射的

電子(實心圓)由中間子電池漂移和擴散到頂部子電池。通過雷射照射產生的電子(實心圓)移動到頂部子電池，頂部子電池的空乏區和內建電廠會相應增加。當太陽能電池被雷射光照射時，輸入電子(實心圓)在頂端子電池會碰到一個更大的電位勢壘。較大的電位勢壘阻礙了輸入電子通過頂端界面，所以電激螢光強度被限制。我們固定輸入電流，表示內建電場(E_1')和空乏區(W_1')為常數。由於雷射功率增加，所產生的電子也相應增加。當所產生的電子增加，頂部子電池的電位勢壘也會增加，阻礙輸入電子通過頂端界面並且降低了電激螢光強度。

在不同雷射功率的照射下 EL 強度的定量描述並根據 pn 界面二極體模型分析。在正向偏壓下的條件下，子電池的電激螢光強度(I_{EL})正比於 $n_p(0)$ [15] 公式(5):

$$I_{EL} \propto n_p(0) L \quad (5)$$

$n_p(0)$ 是在 pn 界面邊緣的過量少數載子， L 是有效的擴散長度。所施加的正向電壓 V_f ， $n_p(0)$ 方程計算公式(6) [15]:

$$n_p(0) = n_p \exp(eV_f/kT) \quad (6)$$

n_p 是 p 層中的平衡時少數載子濃度， e 是電子電荷， k 是 Boltzmann 常數， T 是量測溫度，結合公式(5)與公式(6)，電激螢光強度(I_{EL})由 V_f 表

示成公式(7):

$$\ln I_{EL} = C + eV_f/kT \quad (7)$$

C 是一個常數，因此電激螢光強度可以由外加偏壓控制。

當它層串接的子電池被雷射照射，會因為吸收雷射而產生光偏壓。

根據二極體的方程式，光偏壓 V_{ph} 可以表示為公式(8) [16]

$$V_{ph} = \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{J_{PC}}{GJ_0} + 1 \right) \quad (8)$$

n 是理想因子， G 是幾何學因子， J_0 是飽和電流密度。

我們假設光子電流密度(J_{PC})和照射雷射功率成比例公式(9)

$$J_{PC} = P\eta(1 - R)/A\hbar\omega \quad (9)$$

P 是雷射功率， η 是量子效率， R 是太陽能電池的反射率， A 試樣品面

積， $\hbar\omega$ 是光子能量。由於光伏效應是由雷射照射而引起， V_f 在公式

(4.5)修改為 V_f' ，等於 $(V_f - V_{ph})$ ，而公式(7)從而取代

$$\ln I_{EL} = C + e(V_f - V_{ph})/kT \quad (10)$$

圖 17、圖 18、圖 19、圖 20 分別為頂部子電池與 780 nm 雷射功率的關係、頂部子電池與 1064 nm 雷射功率的關係、中間子電池與 532 nm 雷射功率的關係、中間子電池與 1064 nm 雷射功率的關

係，實線為公式(10)擬合，當頂部子電池的 V_f 為 1.43 伏特、中間子電池的 V_f 為 0.93 伏特，電激螢光影像強度面積積分與公式(10)吻合。

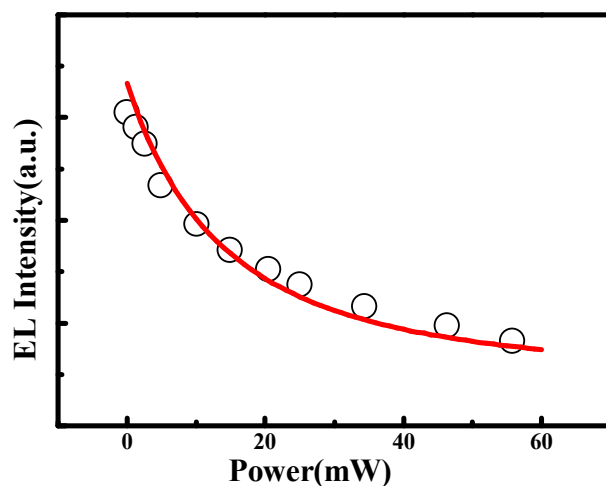


圖 17 空心圈圖為頂部子電池磷化銦鎵在不同 780 nm 雷射功率照射下電激螢光影像強度面積積分，實線為公式(10)擬合。

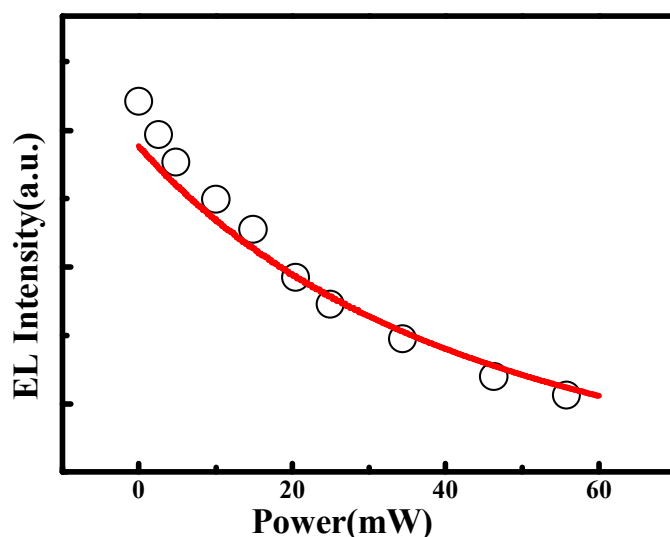


圖 18 空心圈圖為頂部子電池磷化銦鎵在不同 1064 nm 雷射功率照射下電激螢光影像強度面積積分，實線為公式(10)擬合。

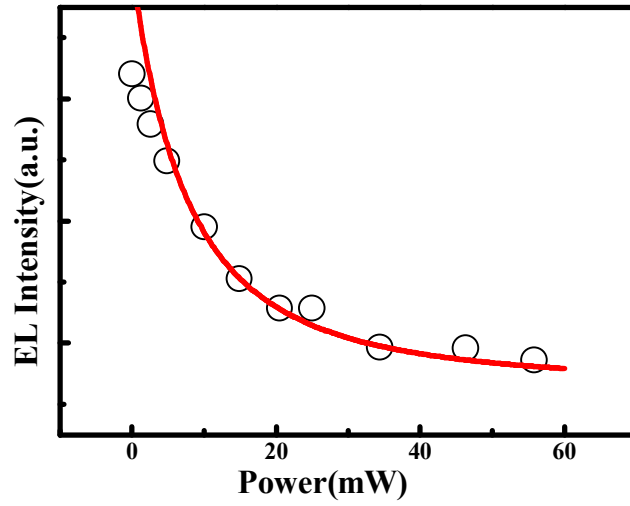


圖 19 空心圈圖為中間子電池砷化鎵在不同 532 nm 雷射功率照射下電激螢光影像強度面積積分，實線為公式(10)擬合。

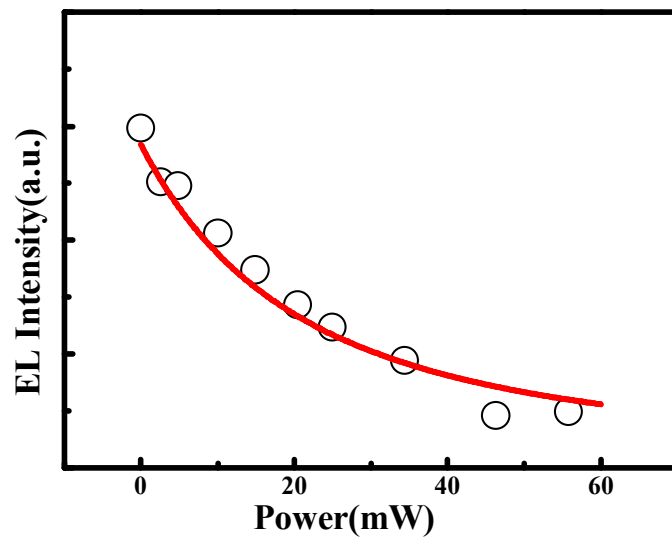


圖 20 空心圈圖為中間子電池砷化鎵在不同 1064 nm 雷射功率照射下電激螢光影像強度面積積分，實線為公式(10)擬合。

圖 21 為多接面太陽能電池使用 SPICE 模擬的等效電路模擬圖，從圖中我們可發現二個子電池之間連接在一起時是以串連的方式，圖中的 R_L 為串聯電阻， R_{sh} 為並聯電阻。不同的操作區域，在低電流時可見到產生和複合電流的增加，產生較高的二極體理想係數 $n=2$ ，對於中等電流得到的是低階注入和擴散限制電流 $n=1$ ，大電流是高階注入 $n=2$ 。 i_{pc} 是當子電池照射其可吸收之頻譜範圍的光時，在該層產生的光子電流。我們先使模擬電路電流-電壓與未照光的多接面太陽能電池電流-電壓曲線擬合，顯示於圖 22，表 1 為 SPICE 模擬電路的電流-電壓曲線參數。利用 SPICE 模擬電路得到在偏壓下各個子電池的端電壓變化，顯示於圖 23。

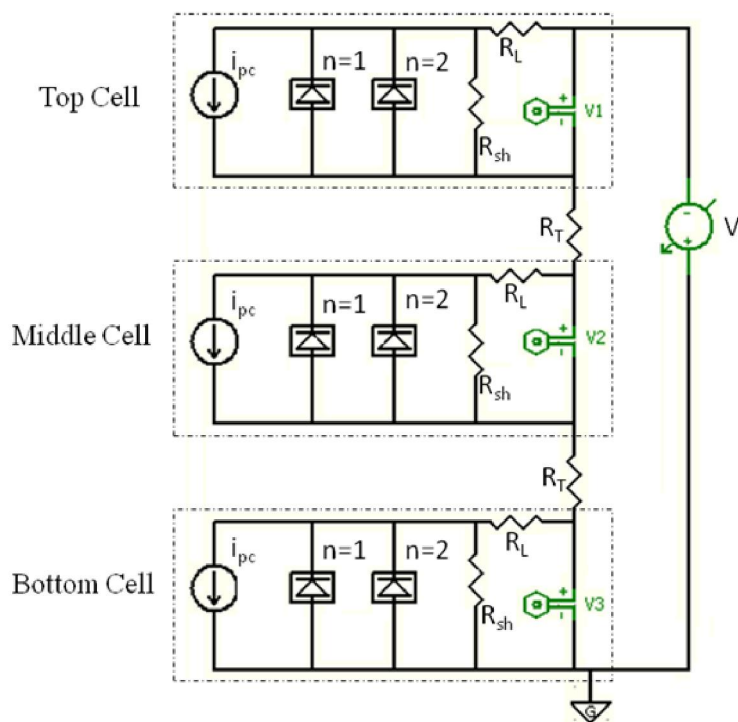


圖 21 SPICE 等效電路模擬圖。

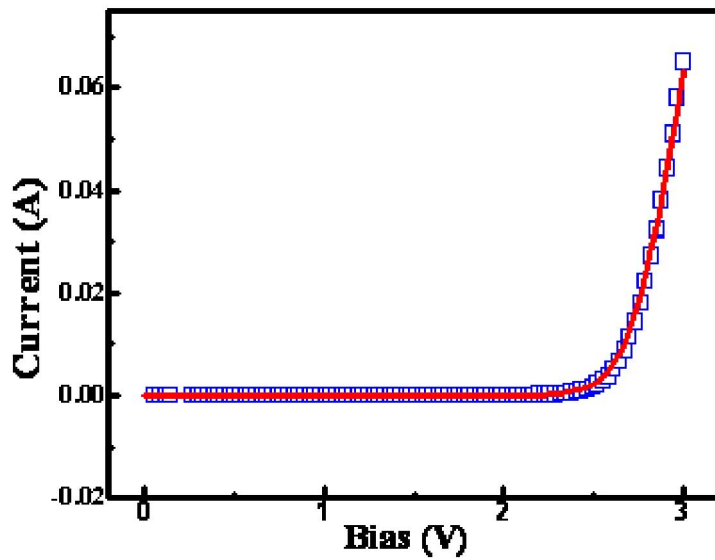


圖 22 多接面太陽能電池電流-電壓曲線圖，藍色方形為未照光，紅線為模擬電路。

Subcell i/material	Top/ $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	Middle/ $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$	Ge/ Bottom
$I_{\text{sat}(N=1)} (\text{A}/\text{cm}^3)$	1.1×10^{-22}	2.2×10^{-18}	9.6×10^{-11}
$I_{\text{sat}(N=2)} (\text{A}/\text{cm}^3)$	2.2×10^{-14}	1×10^{-11}	7.9×10^{-8}
$E_g (\text{eV})$	1.82	1.43	0.8
$R_{\text{Sh}} (\text{cm}^3)$	200k	200k	50k
$R_L (\text{cm}^3)$	0.35	3	0.35
$R_T (\text{cm}^3)$	0.001		

表 1 SPICE 等效模擬電路的參數。

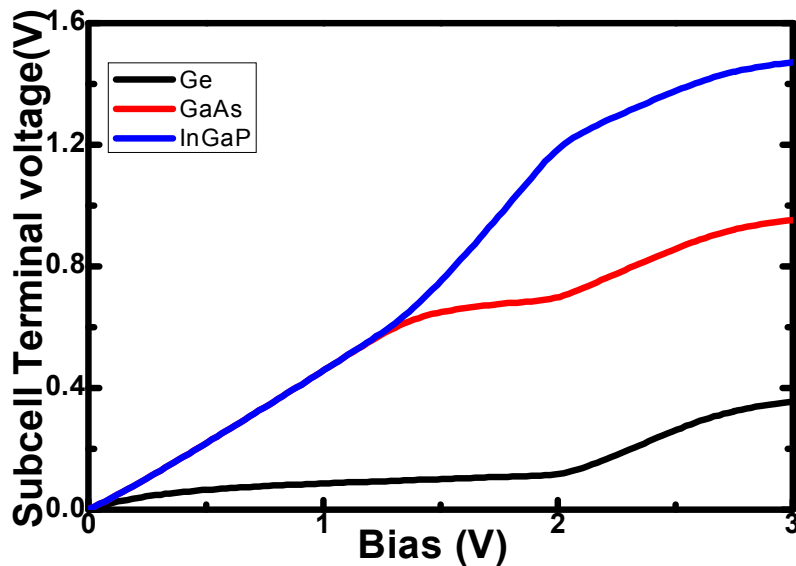


圖 23 用模擬電路表示三個串接子電池外加偏壓下各個子電池的端電壓。頂端子電池磷化銦鎵(藍線)、中間子電池砷化鎵(紅線)和底部子電池鍺(黑線)。

電激螢光影像實驗為對多接面太陽能電池施以 35 mA 電流，相當於施以 2.7 V 電壓，SPICE 等效模擬電路中，偏壓 2.7 V 時頂端子電池磷化銦鎵端電壓為 1.43V，中間子電池砷化鎵端電壓為 0.93V。

利用圖 20 模擬電路，改變頂端、中間、底部子電池的光子電流 i_{PC} ，相當於只對多接面太陽能電池照射 532 nm、780 nm、1064 nm 雷射光，在不同的光子電流 i_{PC} 下，發無照射的二個子電池的端電壓會隨著被照射子電池的光子電流 i_{PC} 增加而降低，我們利用公式(10)擬合，並跟前小節的結果比較。

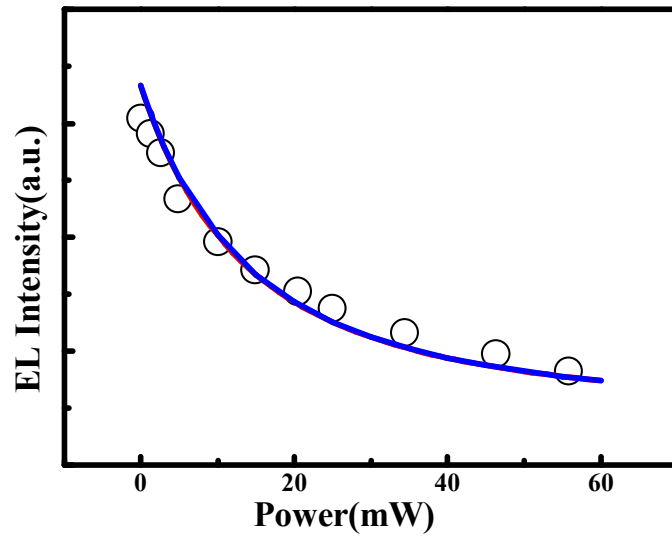


圖 24 雷射功率對電激螢光強度說明：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合、藍色實線為電路模擬對改變中間子電池照光強度下頂端子電池磷化銦鎵的結果。

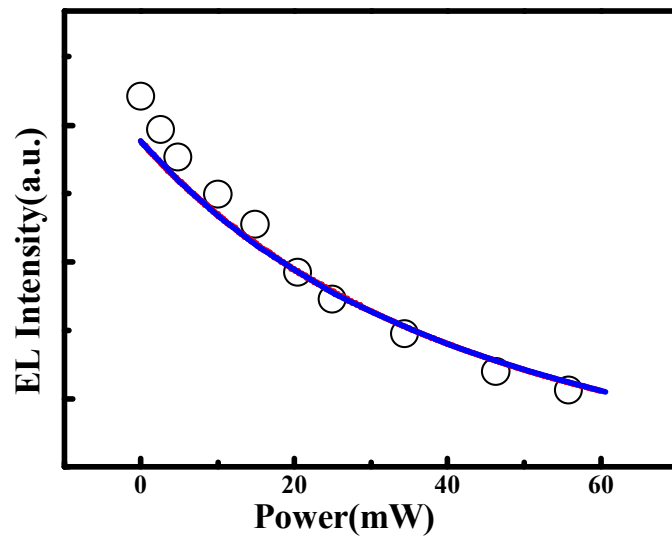


圖 25 雷射功率對電激螢光強度說明：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合、藍色實線為電路模擬對改變底部子電池照光強度下頂端子電池磷化銦鎵的結果。

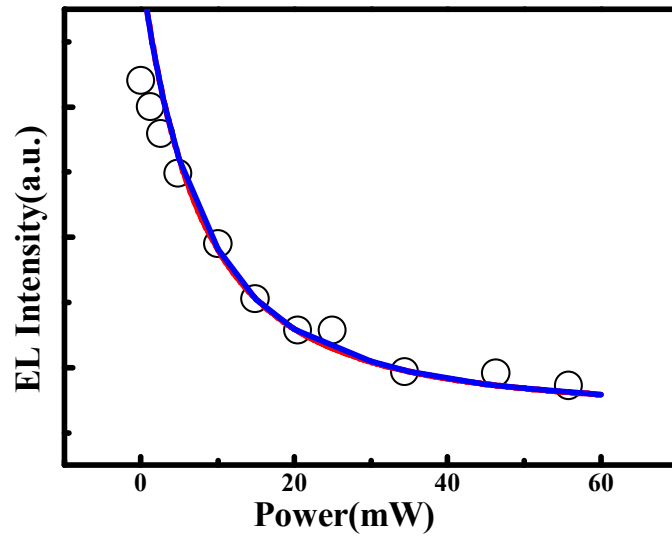


圖 26 雷射功率對電激螢光強度說明：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合、藍色實線為電路模擬對改變頂端子電池照光強度下中間子電池砷化鎵的結果。

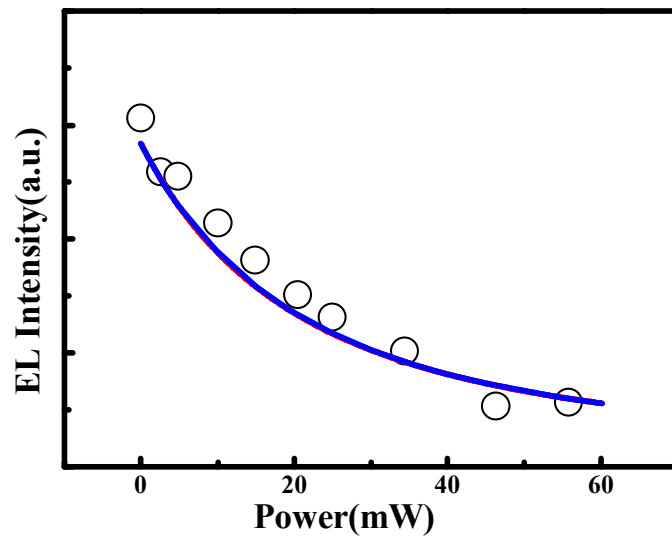


圖 27 雷射功率對電激螢光強度說明：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合、藍色實線為電路模擬對改變底部子電池照光強度下中間子電池砷化鎵的結果。

照射的雷射功率增加，電激螢光影像強度減小，當他層串接的子電池被雷射照射，會因為吸收雷射而產生光電壓。根據圖 24、25、26 和 27 的結果，因為雷射照射功率增加、光電流增加公式(8)，使的產生的光電壓，我們根據公式(8)、(10)算出不同雷射以及光電流輸入下各層子電池的光電壓變化。

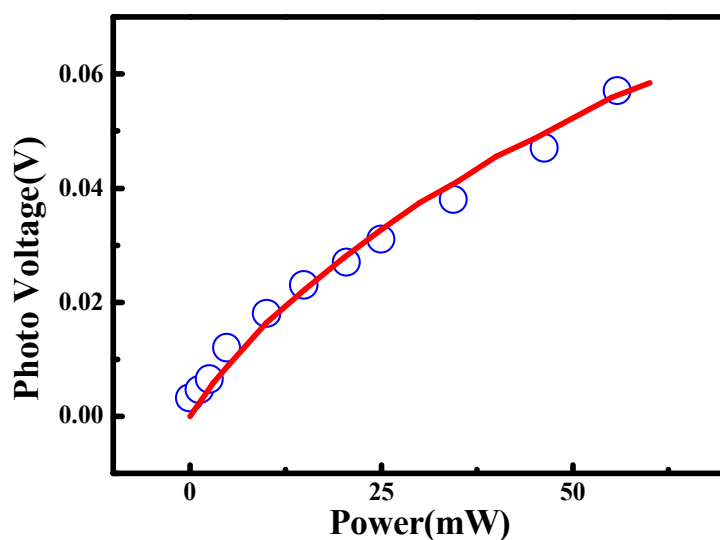


圖 28 雷射功率對電激螢光強度：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合對改變中間子電池照光強度下頂端子電池磷化銦鎵的光子電壓。

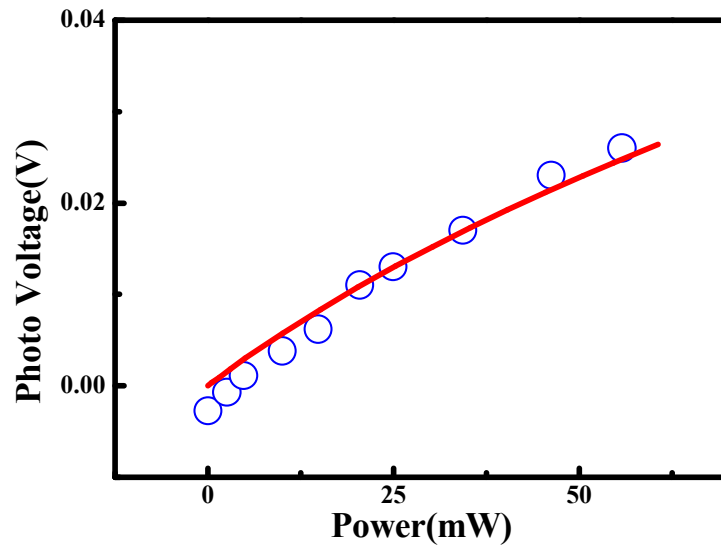


圖 29 雷射功率對電激螢光強度：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合
對改變底部子電池照光強度下頂端子電池磷化銦鎵的光子電壓。

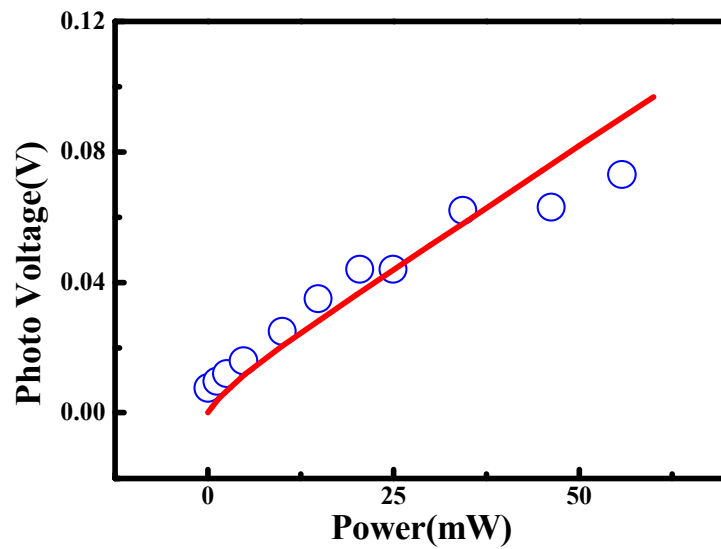


圖 30 雷射功率對電激螢光強度：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合
對改變頂端子電池照光強度下中間子電池磷化銦鎵的光子電壓。

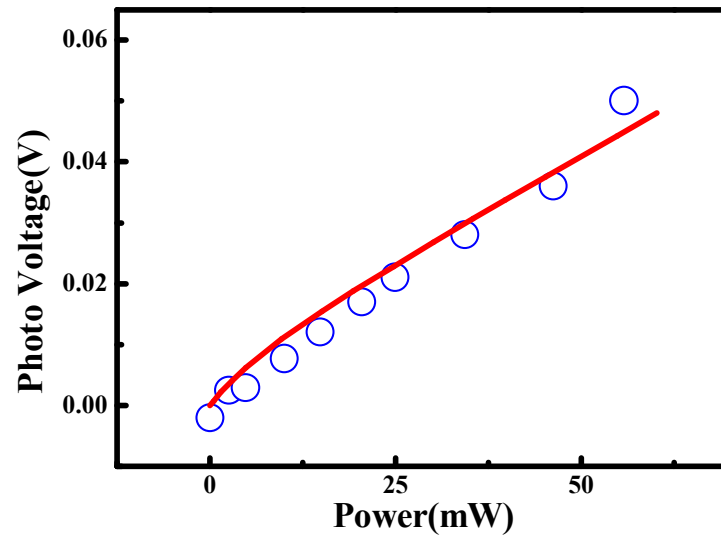


圖 31 雷射功率對電激螢光強度：空心圓圈為實驗、紅色實線為擬合
對改變底部子電池照光強度下中間子電池磷化銦鎵的光子電壓。

我們利用 SPICE 軟體分析各層在不同的雷射照光強度變化
下，測量光強變化轉成光伏效應下各子電池之電壓變化分別為圖
28、29、30、31。

二、結論

我們使用電激螢光影像、SPICE 模擬等效電路、外加偏壓下光激螢光研究多接面太陽能電池的接面。頂端子電池磷化銦鎵電激螢光影像被照射雷射能量為 1.59eV、1.17eV 而減弱，中間子電池砷化鎵電激螢光影像被照射雷射能量為 2.33eV、1.17eV 而減弱。我們證明頂端子電池、中間子電池和底部子電池之間有相互作用。並用 SPICE 模擬等效電路得出雷射在其他子電池造成的 V_{ph} ，被減弱的電激螢光影像強度是由於其他子電池被雷射照射產生的光子電壓 V_{ph} 抑制順向偏壓，雷射照射的照射功率的增加，發光強度呈指數下降，而外加偏壓下光激螢光，使得多接面太陽能電池的接面變化，子電池空乏區隨其端電壓呈指數變化。

抑制的電激螢光現象，有可能發展成為一個光控設備。另一方面，利用電激螢光強度可分析三接面太陽能電池中的各子電池光電流匹配的問題。這項研究在多接面太陽能電池的設計中是有用的。

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，利用電激螢光影像研究多接面太陽能電池的光伏效應，相關的成果文獻已經成功發表在期刊[17-18]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各子電池層的光伏效應量測與各子電池層相互交互作用。

肆、参考文献

1. 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).
2. W. Guter, J. Schone, S. P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer, A. Wekkeli, E. Welser, E. Oliva, A. W. Bett, and F. Dimroth, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 223504, (2009).
3. T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, and Y. Uraoka, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 262108, (2005).
4. P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schäffer, W. Warta, and S. W. Glunz, *J. Appl. Phys.*, **101**, 123110, (2007).
5. J. A. Giesecke, M. Kasemann, and W. Warta, *J. Appl. Phys.*, **106**, 014907, (2009).
6. C. G. Zimmermann, *J. Appl. Phys.*, **100**, 023714, (2006)
7. V. Gazuz and C. Buerhop, *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 115702, (2011).
8. U. Rau, *Physical Review B*, **76**, 085303, (2007).
9. T. Kirchartz, A. Helbig, W. Rietz, M. I. Reuter, J. H. Werner and U. Rau, *Prog. Photovolt.*, **17**, 394–402, (2009).
10. M. Paire, L. Lombez, J. F. Guillemoles, and D. Lincot, *J. Appl. Phys.*,

- 108, 034907, (2010).
11. G. Brown, A. Pudov, B. Cardozo, V. Faifer, E. Bykov, and M. Contreras, *J. Appl. Phys.*, 108, 074516, (2010).
 12. T. Fuyuki, H. Kondo, Y. Kaji, A. Ogane, and Y. Takahashi, *J. Appl. Phys.*, 101, 023711, (2007).
 13. C. G. Zimmermann, *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, 30, (2009).
 14. T. Potthoff, K. Bothe, U. Eitner, D. Hinken and M. Kontges, *Prog. Photovolt.*, 18, 100, (2010).
 15. K. Ramspeck, K. Bothe, D. Hinken, B. Fischer, J. Schmidt, and R. Brendel, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 153502, (2007).
 16. K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka and T. Fuyuki, *J. J. Appl. Phys.* 43, 882, (2004)
 17. G.W. Shu, N. N. Ou, P. Y. Hsueh, T. N. Lin, J. S. Wang, J. L. Shen, C. H. Wu, and C. H. Ko, *Applied Physics Express* 6, 102302, (2013)
 18. G. W. Shu, J. Y. Lin, H. T. Jian, J. L. Shen, S. C. Wang, C. L. Chou, W. C. Chou, C. H. Wu, C. H. Chiu, and H. C. Kuo, *Optics Express* 21,123, (2013)