

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

III-V 族多接面太陽能電池的轉換效率機制研究

Study of the conversion efficiency of III-V multi-junction solar cells

計畫編號：1002001INER042

受委託機關(構)：私立中原大學

計畫主持人：沈志霖

核研所參與人員：吳志宏

核研所參與人員所屬單位：太陽光電

聯絡電話：(03)2653249

E-mail address：jlshen@cycu.edu.tw

報告日期：100.11.11

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.....	6
一、採用之方法與原因.....	6
(一) 建立以外加氙燈環境下，以光激螢光光譜研究三接面太陽 能電(InGaP/InGaAs/Ge)的接面溫度機制:.....	7
參、主要發現與結論.....	8
一、主要發現.....	8
二、結論.....	18
肆、參考文獻.....	20

中文摘要：

我們分別利用三種不同波長的雷射當作激發光能量，經由光激螢光光譜的量測，研究三接面太陽能電池(InGaP/InGaAs/Ge)各子電池之接面溫度。其中各子電池接面溫度可藉由 Varshni 經驗公式擬合螢光峰值能量位置對應溫度的變化關係用以當作一校準趨勢，再利用室溫下外加一模擬太陽光光譜的氬燈，利用各子電池層螢光峰值能量位置隨照光功率之線性關係，計算各子電池層之接面溫度。

關鍵詞：

接面溫度、III-V 族太陽能電池、光激螢光

Abstract :

The three junction temperatures of the three individual subcells of the InGaP/InGaAs/Ge solar cells were measured using photoluminescence (PL) with three different excitation lasers. The junction temperatures in each subcell were calibrated by using the Varshni relation between the PL peak energy and the heat-sink temperature. By illumination of an extra xenon-mercury lamp, the linear relation between the PL energy and illumination level clearly occurs and is advantageously used for deriving the junction temperature. We also investigated the thermal resistance of each subcell in the InGaP/InGaAs/Ge solar cells. An extra laser with different wavelengths of 520 nm, 808 nm, 1043 nm was used to increase the temperature of the InGaP, InGaAs, Ge subcells, respectively. Based on concept of energy conservation, the thermal resistance is found to be for the InGaP, InGaAs, Ge subcells, respectively.

Key words :

Junction temperature 、 III-V solar cell 、 photoluminescence

壹、計畫緣起與目的

由於石油日益短缺，使得尋找替代能源或節約能源的方法，已經到刻不容緩的地步。在替代能源方法中，太陽光能源是其中的一種，並且屬於環保的綠色能源。太陽在一天中所產生的能源是足夠讓目前地球的人口使用長達 27 年之久，所以如何將太陽光能源轉變成可以使用的能源是很重要的課題。近年來以 III-V 化合物半導體 (GaAs/Ge 或 InGaP/GaAs/Ge) 所構成單接面或多接面結構的太陽能電池受到相當的重視，因為轉換效率可高達 40% [1-3] 以上。

近幾年，三接面太陽能電池效率完成度方面，Solar Junction 公司利用三接面的太陽能電池已達到效率 43.5%。而多接面太陽能電池的特性行為是很複雜的，為了要提升太陽能電池光電轉換效率，研究其各種特性是很重要的，如外部量子效應(external quantum efficiency)、內部量子效應(internal quantum efficiency)、電流電壓(I-V) 特性、電激螢光(electroluminescence)等。

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，有效運用太陽光全光譜，以提高光電轉換效率，逐漸成為現今發展的趨勢。此外，III-V 族化合物半導體組成成份、磊晶成長技術及後段製程技術的討論也是必要的。熱特性對太陽能電池及二極體也是影響很大，若溫度上升，二極體的轉換效率會造成很大的影響，近幾年，接面溫度成為發光二極體(light

emitting diodes, LED)中重要的參數之一，二極體的溫度改變，其發光效率(light efficiency)、壽命(lifetime)、放光波長(emission wavelength)等都會受到影響，已由不同方式進行研究，如二極體正向電壓(diode-forward voltage)、發光位置改變(emission peak energy shift) [1-4]。三接面太陽能電池在設計上會運用高聚光的方式增加入射光功率，高聚光會將部分能量轉換成熱能，增加太陽能電池的接面溫度，隨溫度增加，開路電壓(open circuit voltage)會減小，導致轉換效率下降[5-7]，因此量測太陽能電池的接面溫度是很重要的，而利用此非破壞性的光學量測技術，對於模擬元件在實際運作的情況下，所得到的接面溫度將更具真實意義，未來將利用在元件上的設計或模組間樣品的接面溫度參數取得，進而改善元件結構設計或模組設計是很有幫助的一量測技術。

我們團隊與核能研究所太陽光電組共同創新一新技術，利用光激螢光光譜的量測方式，建立一項新的分析技術來探討單層太陽能電池的接面溫度，並且已經成功發表在期刊[8]中。

III-V 族三層太陽能電池中，各子電池層 (InGaP/ InGaAs /Ge) 材料具有不同能隙區隔，我們利用各子電池層吸收不同波段的光學特性，在室溫下利用不同波長的雷射進行各子電池層之光激螢光 (photoluminescence : PL) 光譜量測。而利用光激螢光非破壞性和非接觸式的方法，量測三接面太陽能電池各個子電池對溫度的關係，不

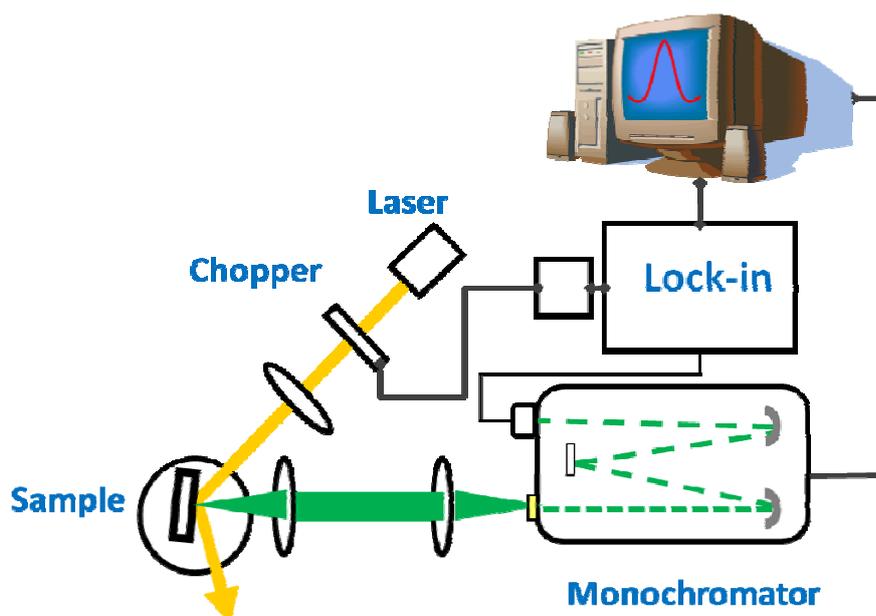
同子電池選用不同激發能量，再加上額外的氙燈光源或激發光能量，改變照光功率，使子電池之接面溫度產生變化，模擬三接面太陽能電池各子電池在不同太陽數情況下之接面溫度。

貳、研究方法與過程

一、採用之方法與原因

(一) 以光激螢光光譜研究三接面太陽能電池(InGaP/InGaAs/Ge)的接面溫度:

光激螢光光譜實驗利用半導體雷射(波長 532 nm、780 nm、1064 nm; 能量分別為 2.33 eV、1.59 eV、1.17 eV)當入射光源。如圖所示，光束經由透鏡聚焦至樣品上。避開反射光，利用透鏡收集螢光，調至平行光再經由另一透鏡聚焦至光譜儀(Jobin Yvon triax 550)。光經光柵(grating)分光後，由光偵測器(Photo detector)接收，將單色光轉為電流訊號，電流經過 SAQ2 彙整後轉為數位訊號送至電腦，再由電腦繪製成光譜圖。將樣品座罩上真空腔蓋，可抽真空至 24 mtorr。利用氦壓縮機可降溫至 10 k。



原理如下：光激螢光光譜對於檢測發光半導體材料是一種有力且無破壞性的技術。藉由分析光激螢光資料，可由光譜中的特徵得知摻雜雜質種類、能隙大小、材料活化能等等。其原理是利用光子能量大於待測樣品能隙的雷射光源激發樣品，使得價帶(valence band)上的電子吸收若干能量並激發躍遷至導帶(conduction band)，同時在價帶上產生電洞，形成電子-電洞對(electron-hole pair)，由於庫倫作用力的吸引，使得電子-電洞對以激子(exciton)的型態存在；吸收過多能量而處於高能階的激發電子與晶格振動，產生非輻射的內在鬆弛作用(internal relaxation)，或藉由釋放聲子(phonon)等過程釋放能量而蛻化至導帶的最低能量邊緣，此時脫離原本平衡環境的電子-電洞對便復合而釋放出能量。當電子和電洞被束縛在一起形成激子，假如這些是自由載子，之後激子可以穿過材料遷移而被稱為自由激子。如果這些載子被庫倫力束縛成缺陷，則這些激子稱為束縛激子。激子是無法幫助導電，但對於激發機制與輻射復合而言可幫助發光。

參、主要發現與結論

一、主要發現

III-V 族三層太陽能電池中，各子電池層 (InGaP/ InGaAs /Ge) 材料具有不同能隙區隔，我們利用各子電池層吸收不同波段的光學特性，在室溫下利用不同波長的雷射進行各子電池層之光激螢光光譜量測。頂層(top cell)磷化銦鎵及中間層(middle)砷化銦鎵子電池螢光峰值位置分別在 1.81eV、1.41eV，磷化銦鎵與砷化銦鎵屬於直接能隙(direct bandgap)，而底層(bottom)鍺子電池螢光峰值位置有高能量(0.8eV)及低能量 (0.67eV)部分，分別為直接能隙(direct bandgap)及間接能隙(indirect bandgap)，本研究選用直接能隙(0.8eV)來探討底層(鍺)子電池層之接面溫度變化。

由頂層磷化銦鎵、中層砷化銦鎵、底層鍺之三接面太陽能電池中各子電池層之變溫光激螢光光譜圖，環境溫度設定從 240K 變化到 310K；隨溫度升高，光激螢光峰值會有明顯紅位移的現象，半導體材料能隙隨溫度變化會遵循 Varshni 經驗公式(1)，低溫下峰值位置幾乎不變，而環境溫度大約高於 200K 之後，峰值位置會成一紅位移線性變化。Varshni 經驗公式，其中 $E_g(0)$ 為 0K 下的能隙能量， α 、 β 分別為平均溫度係數及 Debye 溫度：

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1)$$

圖 1(a)、1(b)、1(c)分別為磷化銦鎵、砷化銦鎵、鍺子電池螢光峰值位置與溫度的線性關係，實線為 Varshni 經驗公式擬合，當溫度高於 200K，峰值下降的趨勢成線性變化。

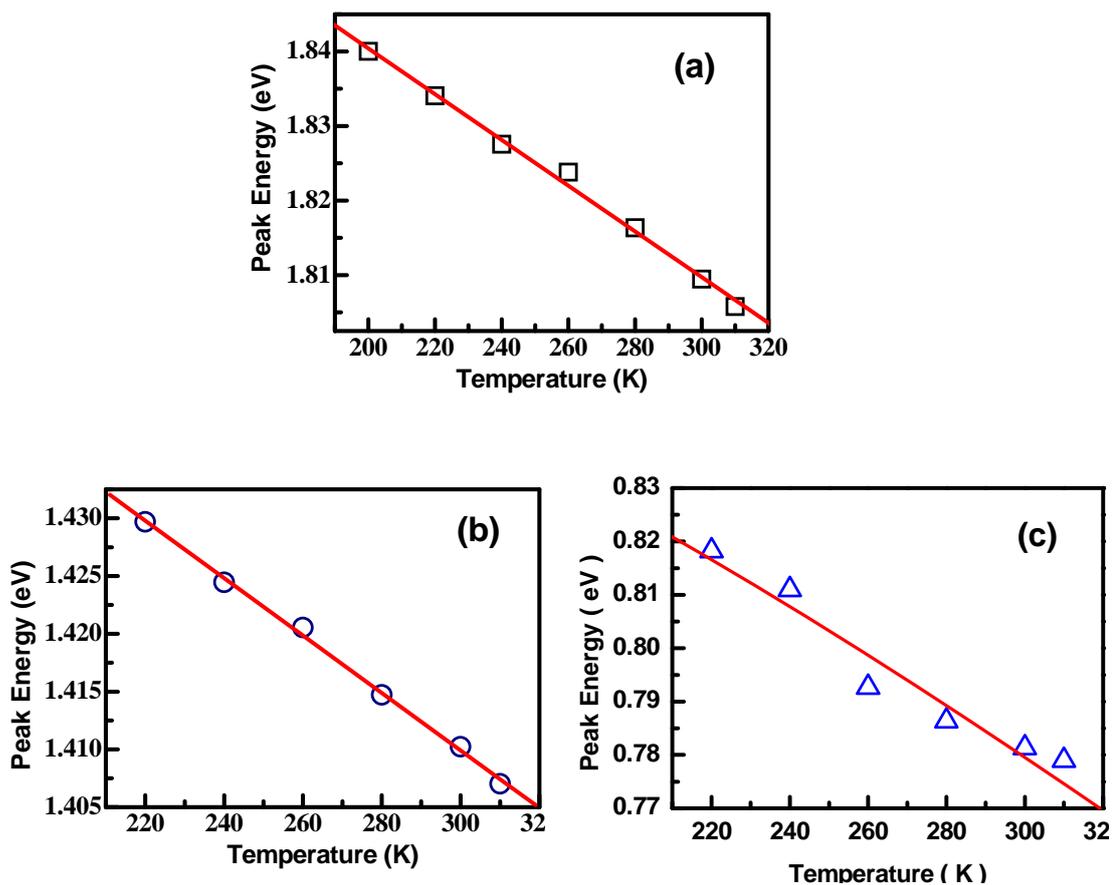


圖 1.各子電池層的光激螢光能量峰值位置隨溫度關係

(a)磷化銦鎵、(b)砷化銦鎵、(c)鍺

我們先利用此方法，找出各層子電池的材料能隙隨溫度變化的趨勢，當作一組反映材料溫度校準用的數據趨勢。圖 2(a)、2(b)、2(c)為磷化銦鎵、砷化銦鎵、鍺子電池在室溫下外加氬燈功率分別為 0、

200、400、600、800mW 之螢光峰值位置，我們發現各子電池螢光峰值有紅位移的現象，這現象主因為太陽能電池受到到熱的影響。隨不同功率之外加氬燈下螢光峰值位置，照光功率越強螢光峰值能量越低，呈一線性關係變化。將螢光能量峰值與 Varshni 經驗公式上擬合趨勢做一比較之後，可以利用相對應的關係式得到如圖 3(a) 磷化銦鎵、3(b)砷化銦鎵、3(c)鍺子電池，在各照度下的接面溫度。

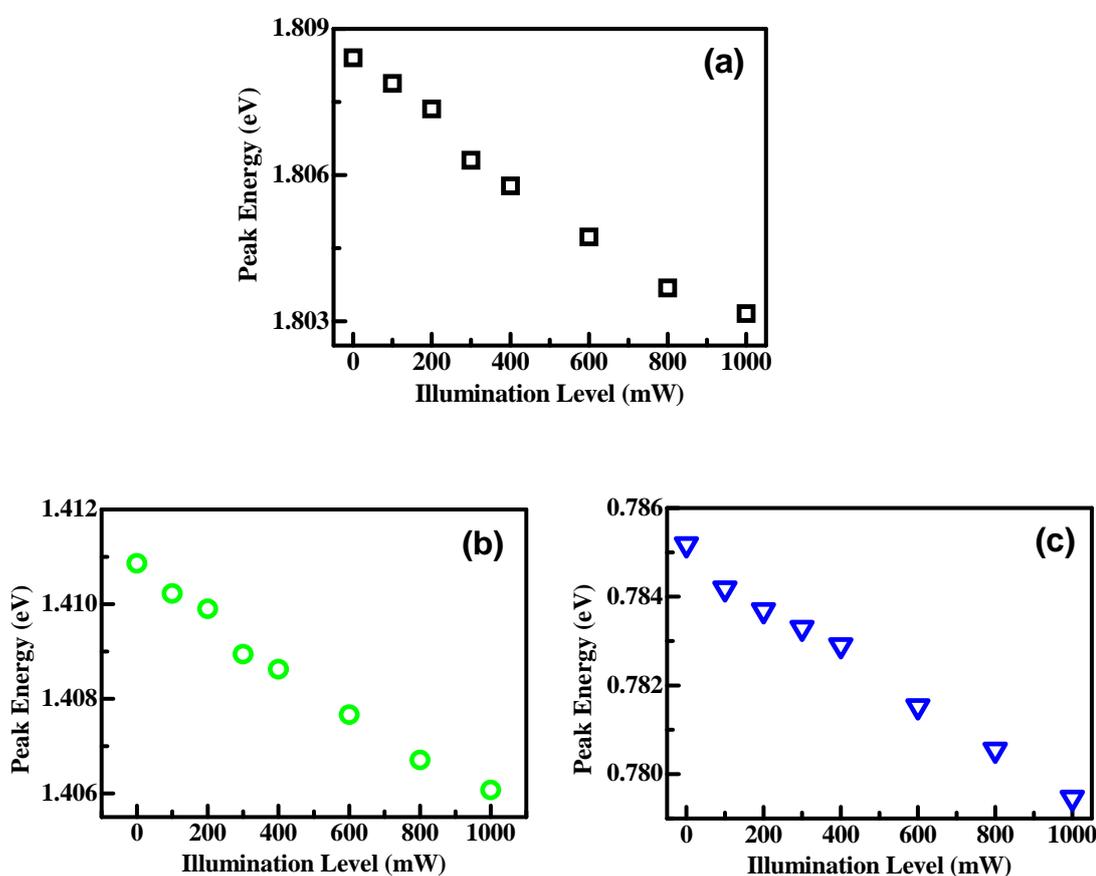


圖 2.室溫下(a)磷化銦鎵、(b)砷化銦鎵、(c)鍺

隨不同功率之外加氬燈螢光峰值位置

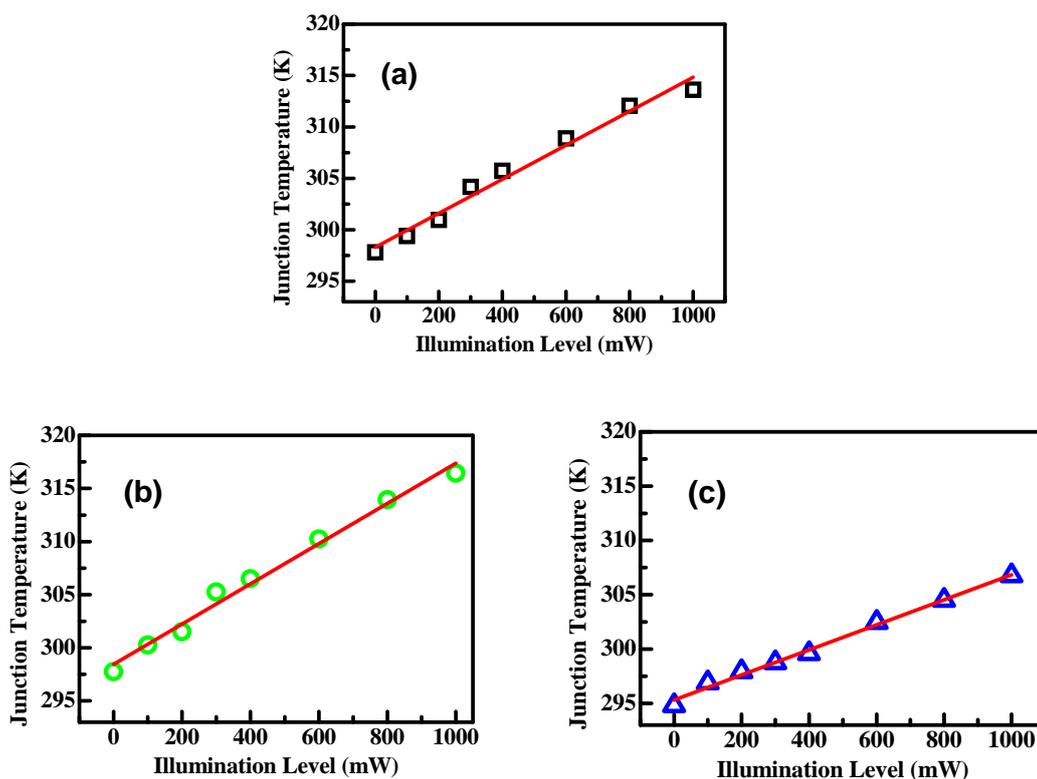


圖 3.不同照光功率下三接面太陽能電池之(a)磷化銦鎵、
(b)砷化銦鎵、(c)鋅子電池之接面溫度為線性關係。

紅色實線為線性擬合之關係，三層作用層照光功率 0W 與 1W 之接面溫度差(ΔT)分別為 17K、19K、12K，底層鋅子電池層溫度上升較前兩層緩慢，我們判斷為是因為能量不均勻分布的氙燈，主要的發光區域座落在紫外光及可見光部分，紅外光部分能量較弱。然而子電池吸收層之厚度也會對接面溫度造成影響，以砷化銦鎵子電池層的光吸收層(3.4 μm)較磷化銦鎵子電池層(400nm)來的厚，可吸

收的光較多，所以溫度變化最大。

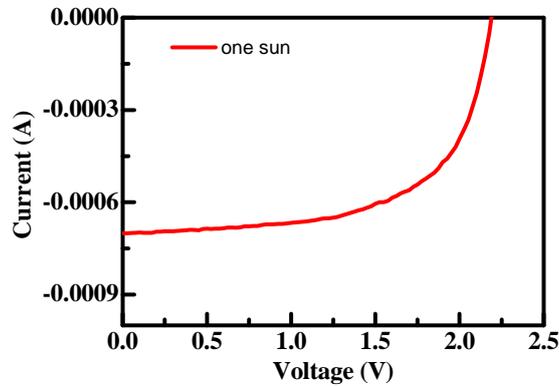


圖 4.室溫下三接面太陽能電池在 one sun 工作環境下之 I-V 曲線

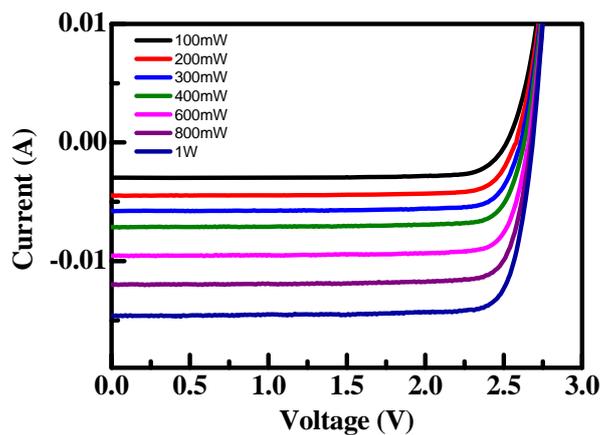


圖 5.室溫下三接面太陽能電池在不同照光功率環境下之 I-V 曲線

圖 4.為室溫三接面太陽能電池在 one sun 工作環境下之 I-V 曲線，入射功率為 $98.5\text{mW}/\text{cm}^2$ ，樣品的作用面積為 7.44mm^2 ，在 $V=0$ 時， I_{sc} 的值為 0.618mA ，圖 5.為外加不同功率的氙燈下之 I-V 曲線，我們發現隨氙燈照光功率增加， I_{sc} 也增加，利用公式(2)可得到不同功

率氙燈照射下之 I_{sc} 與 one sun 工作環境下之 I_{sc} 相除，可得出此時的工作環境相當於的太陽數，圖 6. 為經由此方式換算後模擬太陽能電池隨不同太陽數照射情況下之接面溫度，而其中氙燈功率 1W 相當於 20 suns 左右的工作環境。

$$\frac{\text{multi-suns}}{\text{one sun}} = \frac{I_{sc}(\text{multi-suns})}{I_{sc}(\text{one sun})} \quad \text{公式(2)}$$

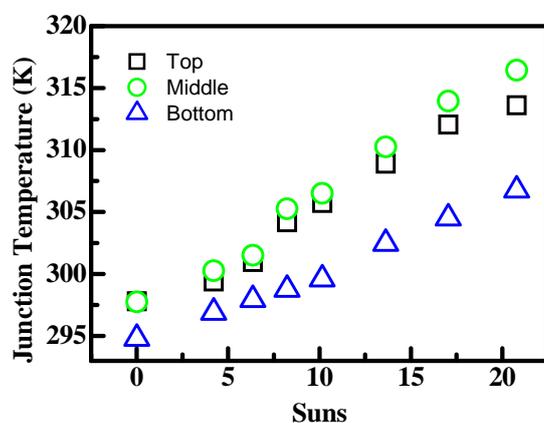


圖 6. 室溫下不同太陽數工作下之接面溫度

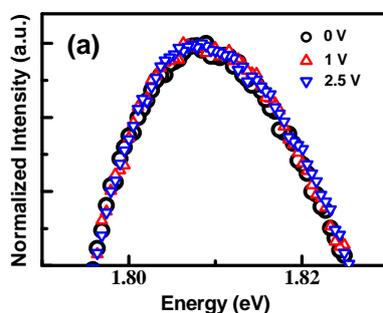
Top	$T_j \text{ (K)} = 0.84284 * \text{Suns} + 296.86$
Middle	$T_j \text{ (K)} = 0.96443 * \text{Suns} + 296.80$
Bottom	$T_j \text{ (K)} = 0.58694 * \text{Suns} + 294.31$

表(1) 不同太陽數與接面溫度之線性關係

由圖 6.可得到一組隨不同太陽數工作下與接面溫度的一線性關係式，整理後將其中的線性關係式整理列表(1)中，由此重要的線性關係中，我們可以推測實際運用在高聚光太陽能模組中，太陽能電池的接面溫度。

由太陽能電池運作原理可知，當元件照光工作時，產生光電子-電洞對在空乏區中被分離，同時內建電場也會隨照光功率發生變化，此現象為光伏效應；為了證明上述所量測的方式是利用熱對太陽能電池接面溫度的單獨影響，而不是光伏效應造成螢光峰值的變化，必須驗證光伏效應是否影響螢光光譜。

圖 7.為(a)磷化銦鎵、(b)砷化銦鎵、(c)鍺子電池層反應不同偏壓下之光激螢光光譜圖，分別為 0、1、2.5V 情形下，發現各子電池在不同偏壓下螢光峰值位置並沒有改變，可以知道外加氬燈量測出來螢光峰值紅位移不是因為光伏效應所造成，而是熱對太陽能電池的影響。



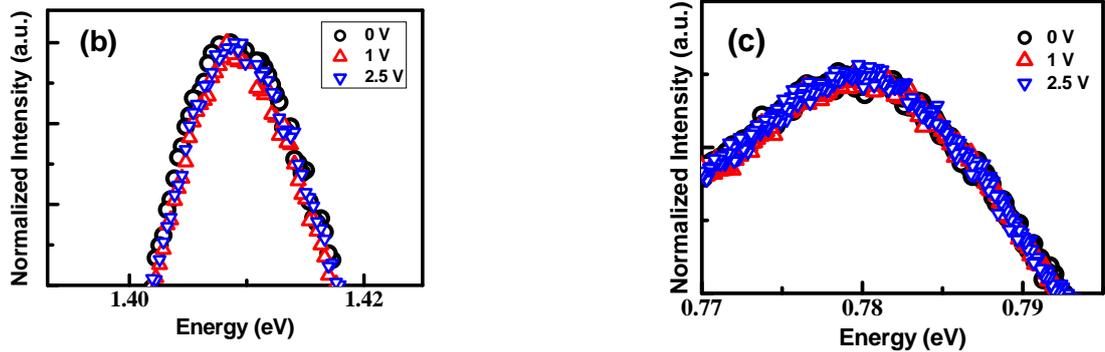


圖 7.室溫下外加偏壓之光激螢光光譜

(a) 磷化銦鎵、(b) 砷化銦鎵、(c) 鍺

太陽能電池 PN 接面照光後，光電子-電洞對分離，電子從價電帶要遷到導電帶，在鬆弛的過程中，電子會往低能量穩定態釋放能量，藉由與晶格振盪將能量以熱的形式傳給聲子，電子數目會以 Boltzmann-Maxwell distribution 分佈，此特性會使載子溫度(T_C)高於晶格溫度(T_L)。有別於上述方法量測出之接面溫度，我們再次利用載子溫度進行驗證，由螢光光譜高能量斜率可得知公式(3)，光激螢光光譜強度會與一個指數型態成正比。

$$I(\hbar\omega) \sim \exp(-\hbar\omega/kT_C) \quad \text{公式(3)}$$

其中 $I(\hbar\omega)$ 為 PL 高能量部分強度， $\hbar\omega$ 為入射光能量， T_C 為載子溫度。圖 8. 為磷化銦鎵作用層室溫光激螢光光譜，紅色線為沒有照射氙燈，黑色線為照射氙燈功率 1W，可以看出外加燈源後，高能量部分斜率有明顯改變，利用線性關係擬合，左下內插圖為磷化

銦鎵子電池層的 T_L 與 T_C 關係，載子溫度高於晶格溫度，紅色線為擬合之線性關係，右上內插圖為室溫下不同照光功率對應出的載子溫度，隨照氙燈功率增加，載子溫度成線性的增加，與理論吻合，將此載子溫度帶回擬合的線性關係中，可得出太陽能電池之接面溫度。圖 9. 為磷化銦鎵作用層利用載子溫度計算得到的接面溫度，得到的結果與利用螢光峰值位置得出的接面溫度相同。

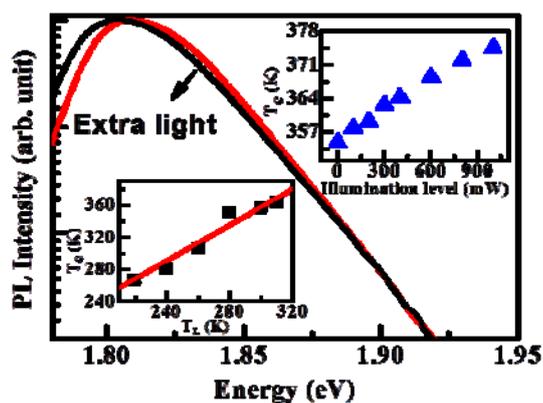


圖 8. 室溫下磷化銦鎵作用層之光激螢光光譜，左下內插圖為晶格溫度與載子溫度之關係，右上內插圖為不同照光功率之載子溫度

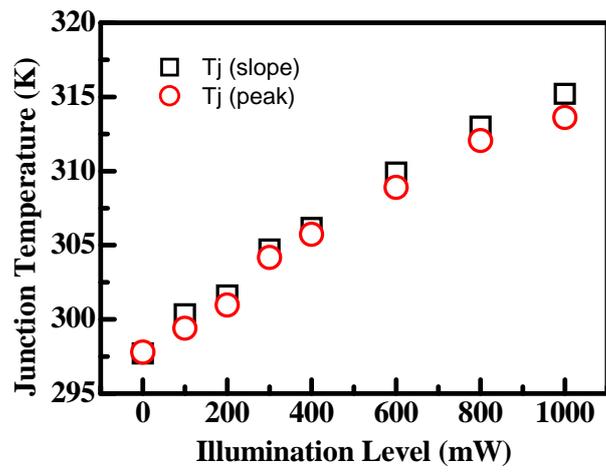


圖 9.磷化銦鎵作用層隨照光功率之接面溫度

二、結論

我們團隊有別於電性量測法只能量測到單一元件作用區的界面溫度，成功利用不同波長的雷射光源當作探測光源，分別成功量測到 III-V 族三層太陽能電池 (InGaP/InGaAs/Ge) 中各子電池層的界面溫度；我們再利用光子產生的電子電洞對載子溫度進行驗證，得到的結果與最初利用螢光峰值位置得出的界面溫度，具有相同的數據，再次成功驗證我們利用不同波長的雷射光源當作探測光源的量測法。

三界面 InGaP/GaAs/Ge 的太陽能電池，經過不同熱退火溫度的處理後，有部分提升光學的特性，這是因為磷空缺的缺陷，被減少或消除的關係，使得室溫觀察光激螢光的光強度變強，且載子的生命期也變長。另外，在低溫下的局域化效應變大，這是由於位能波動在 InGaP 作用層合金排列狀態變得更無序的關係。不論室溫或低溫的光學特性，都說明快速熱退火處理有助於提升三界面 InGaP/GaAs/Ge 太陽能電池的特性。

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創新一新技術，利用光激螢光光譜的量測方式，研究單層太陽能電池的界面溫度；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界面溫度，相關的成果文獻已經成功發

表在期刊[9]中。此量測技術的優點在於為一個非破壞性量測的實驗，除了可適用於單純磊晶完而沒有電阻的晶粒之外的樣品，對於已經完成製程的樣品，也可經由此實驗內容進行個子電池層的接面溫度量測，未來也更希望可以實際運用在已完成高聚光模組的多層太陽能電池元件成品接面溫度檢測，利用此技術可監測各子電池層的損壞情況。

肆、參考文獻

- [1] Ya-Ju Lee, Chia-Jung Lee, and Chih-Hao Chen, *J.J. Appl. Phys.* **50**, 042618(2011).
- [2] Ya-Ju Lee, Chia-Jung Lee, and Chih-Hao Chen, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. **46**, 1450 (2010).
- [3] D. H. Lee, H. K. Lee, J. S. Yu, S. J. Bae, J. H. Choi, D. H. Kim, I. C. Ju, K. M. Song, J. M. Kim and C. S. Shin, *Semicond. Sci. Technol.* **26**, 055014(2011).
- [4] J. Senawiratne, A. Chatterjee, T. Detchprohm, W. Zhao, Y. Li, M. Zhu, Y. Xia, X. Li, J. Plawsky, C. Wetzel, *Thin Solid Films* **518**, 1732 (2010).
- [5] M. Y. Feteha and G. M. Eldallal: *Renewable Energy* **28**, 1097 (2003).
- [6] D. Meneses-Rodríguez, P. P. Horley, J. González-Hernández, Y. V. Vorobiev, and P. N. Gorley: *Sol. Energy* **78**, 243 (2005).
- [7] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **90**, 57 (2006).

[8] M.D. Yanga, W.C. Liao, G.W. Shu, Y.K. Liu , J.L. Shen,_, C.H. Wu,
W.C. Chou, Y.C. Lee, Solid State Communications 150 (2010)
1217_1220

[9] Gia-Wei Shu, Chiun-Hsiang Tung, Shr-Chang Tung, Po-Chen Su,
Ji-Lin Shen, Min-De Yang, Chih-Hung Wu, Wu-Ching Chou, and
Cheng-Hao Ko, Japanese Journal of Applied Physics 50 092302 (2011)