

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

聚光型太陽電池模組轉換效率衰退機制研究
**Investigation of Degradation Mechanism
on Concentration Solar Receivers**

計畫編號：1022001INER020

受委託機關(構)：國立清華大學材料科學與工程學系

計畫主持人：黃倉秀 教授

聯絡電話：03-5742632

E-mail address：tsh@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：簡克任

報告日期：102 年 11 月 29 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	5
一、加速衰退實驗方法	5
二、實驗樣品製備與實驗步驟	6
參、主要發現與結論	10
一、實驗結果分析	10
二、結論	19
肆、參考文獻	21

中文摘要

本研究主要利用步階式加速老化試驗研究 GaInP/GaInAs/Ge 聚光型多接面太陽電池接收器特性衰退機制，實驗條件為依序在 90，110，130 以及 150 °C 恆溫箱內，分別進行 25，30，30 以及 50 小時之測試。為加速出現衰退現象，太陽能接收器沒有保護膠。透過照光與不照光之電壓-電流測量，數據分析配合電致發光顯微結構分析結果顯示，特性衰退主要因為太陽電池元件週圍復合電流增加，以致開路電壓下降，使得光電轉換效率下降。

關鍵字: 聚光太陽能電池、可靠度

Abstract

Gradual degradation in the dark and light I-V characteristics of the solar cells were observed after the step stress accelerated degradation tests (SSADT) were conducted on these devices. The degradation mechanism of GaInP/GaInAs/Ge triple junction concentrator solar receivers can be attributed to the recombination current in the depletion region at the chip perimeter of solar cells. Recombination current at the chip perimeter resulting in the decrease of open-circuit voltage, is suggested to be the important reason for the degradation of conversion efficiency for those devices.

Keyword: CPV, Reliability

壹、計畫緣起與目的

聚光型光伏(Concentrating Photovoltaic, 以下簡稱 CPV)技術始於 1970 年代, 在聚光條件下, 太陽電池轉換效率可超過 30%, 早在 1989 年就被提出, 然而聚光型太陽能系統卻一直無法滲透至太陽能發電市場。主要是因為缺乏值得信賴或有價值之運轉數據與經驗可驗證系統的可靠度與性能, 再者是由於建置成本過高。唯 2005 年以來 CPV 技術在太陽能發電有關的國際性會議或展覽會已經引起高度的注意, III-V 族聚光型太陽電池轉換效率亦快速提升, 建置容量也大幅成長。

近年來眾多的研究團隊努力提昇 III-V 族多接面太陽電池之效率, 目前國際最佳紀錄之多接面太陽能電池最佳能量轉換效率為 43.5%^[1]。除了追求太陽能電池高效率的提昇, 元件的可靠性也非常重要。目前已有研究砷化鎵太陽能電池可靠度^[2-10]與 GaInP/GaInAs/Ge 三接面太陽能電池^[11~15]的相關文獻發表。

太陽電池接收器是聚光型太陽電池重要組件之一, 其特性之良窳, 將直接影響模組之效能。然而, 到目前為止與 GaInP /GaInAs /Ge 三接面太陽電池可靠性有關的研究仍然很少見。因此, 本研究將透過加速老化試驗之方法, 期能在較短的時間之內, 觀察到能量轉換效率衰退之現象, 並藉由各種量測設備進行特性測試, 分析實驗數據以瞭解特性衰退之機制, 作為未來模組設計之參考依據, 提昇發電系統之可靠度, 為台灣之能源產業貢獻力量, 並藉由計畫執行過程, 培育相關人才。

本研究將利用步進式應力加速老化試驗 (Step Stress

Accelerated Degradation Tests, SSADT) 研究 GaInP/GaInAs/ Ge 的聚光型太陽電池接收器的衰退機制。適用於聚光型太陽電池模組之 IEC 62108 品質標準並沒有特別強調太陽電池之封裝型態，唯為了在較短時間之內找到失效機制，本研究中所使用的太陽能接收器不塗佈保護光學膠。

貳、研究方法與過程

一、加速衰退試驗方法

在正常超作情形之下，不易觀察到太陽電池特性衰退之現象，因此必須加速太陽電池老化速度，以縮短試驗時間。加速衰退試驗(Accelerated Degradation Test；ADT)主要有兩種方法：固定應力(Constant Stress)加速衰退試驗(CSADT)和逐步應力(Step Stress)加速衰退試驗(SSADT)。

CSADT 已被廣泛應用於電子產品，在 CSADT 實驗中，應力維持不變，操作較簡便但需要大量的電池試片及較多的恆溫櫃，且測試時間較長。對於新開發之產品或是可靠度較佳之產品，為縮短試驗時間及節省試片的數量，均採用 SSADT 方法。本研究採用 SSADT 方法，希望使用較少數量樣品，並在較短時間內得到試驗結果。圖 1 是典型 CSADT 與 SSADT 測試方法示意圖，圖 1 是 CSADT 測試方法，假如需要 3 種不同溫度之測試條件，每一種需要 10 個樣品，總共需要 3 個恆溫爐與 30 個樣品。但是使用 SSADT 測試方法，如圖 2 所示，則只需要 1 個恆溫爐與 10 個樣品，因此可以大幅節省實驗設備費用與樣品製作經費。

一般而言，LED 元件的使用壽命大致定義為，當光輸出為初始值 70%時即為失效，然而 III-V 族太陽電池失效並無特別規定；因此，我們定義電池效率衰減為初始值 90%即為失效^[16,17]。依據過往經驗，溫度、濕度以及電流是造成電池特性衰退之主要原因。有關實驗樣品製備與實驗步驟將在下一章節詳細說明。

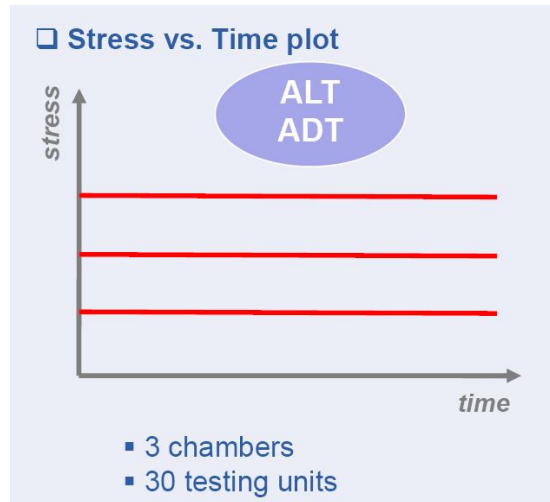


圖 1 CSADT 測試方法溫度分布與所需樣品/恆溫櫃數目

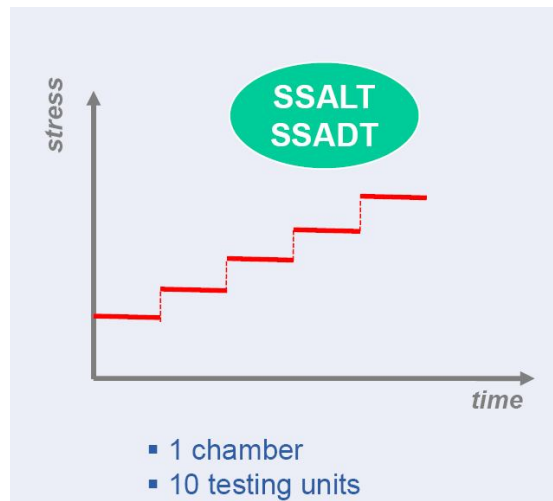


圖 2 SSADT 測試方法溫度分布與所需樣品/恆溫櫃數目

二、實驗樣品製備與實驗步驟

實驗過程主要是針對未塗佈光學膠的 InGaP/InGaAs/Ge 多接面太陽電池接收器進行逐步應力加速衰退試驗(SSADT)，探討其衰退成因。圖 3 與圖 4 分別是太陽電池結構與封裝之後太陽電池接收器之示意圖，表 1 列出太陽電池接收器各組件材料與尺寸。太陽電

池接收器總數量為 28 個，一起放進可程式化烤箱，實驗第一個階段：溫度 90°C，時間 25 小時，第二個階段：溫度 110°C，時間 30 小時，第三個階段：溫度 130°C，時間 30 小時，第四個階段：時間 150°C，溫度 50 小時，測試條件如圖 5 所示。在每一階段結束之後，使用太陽能模擬器分析照光與不照光之 I-V 特性，並利用電致激光(electro-luminescenc，EL)影像分析瞭解引發 I-V 特性變化之位置。

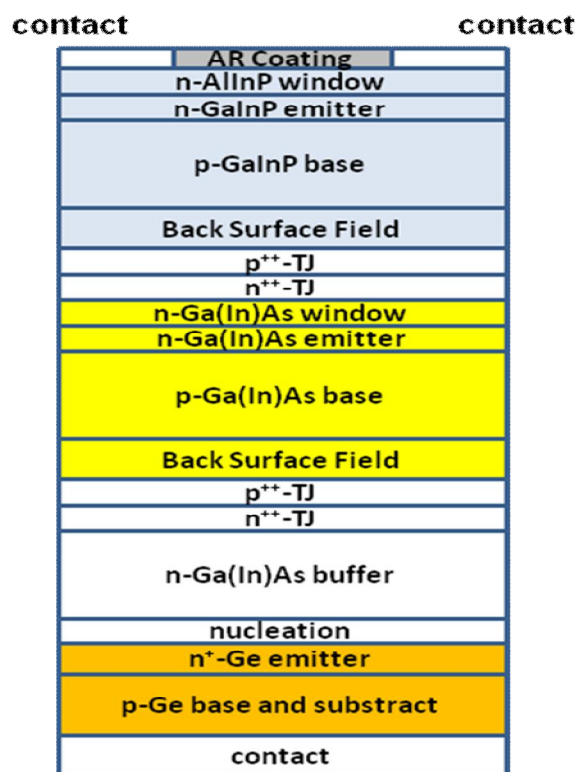


圖 3、III-V 族聚光型太陽電池結構示意圖

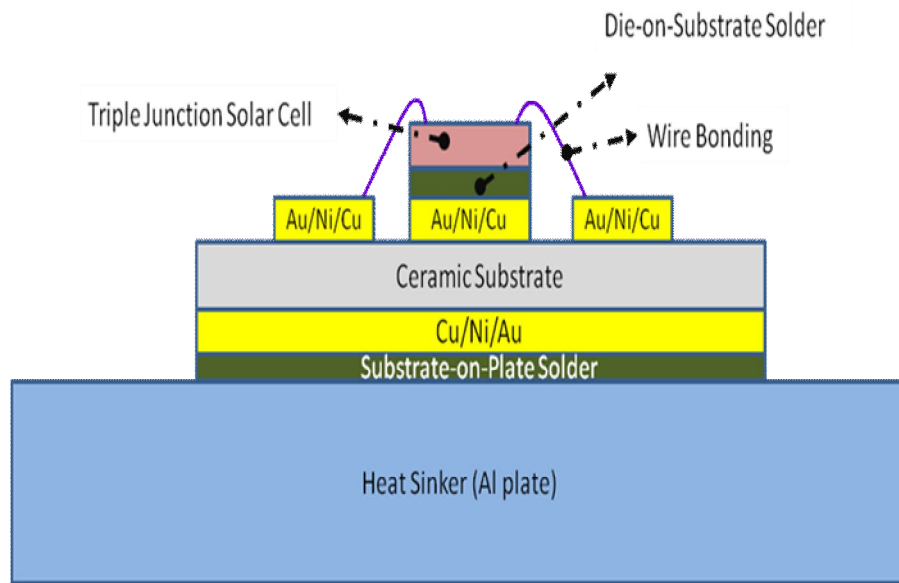


圖 4、太陽電池接收器結構示意圖

表 1、聚光型太陽電池接收器組件材料與尺寸

Type of materials	Size(mm)	Thickness (μm)
Solar cell	5.5 x 5.5(active area)	160
Solar cell	6.7x5.5(physical area)	160
Printed substrate-ceramic	25x15	25
Multilayer metal trace(Au/Ni/Cu)	—	17.6
Solder paste 1 & 2	—	80
Heat sink(Al plate)	120x120	300

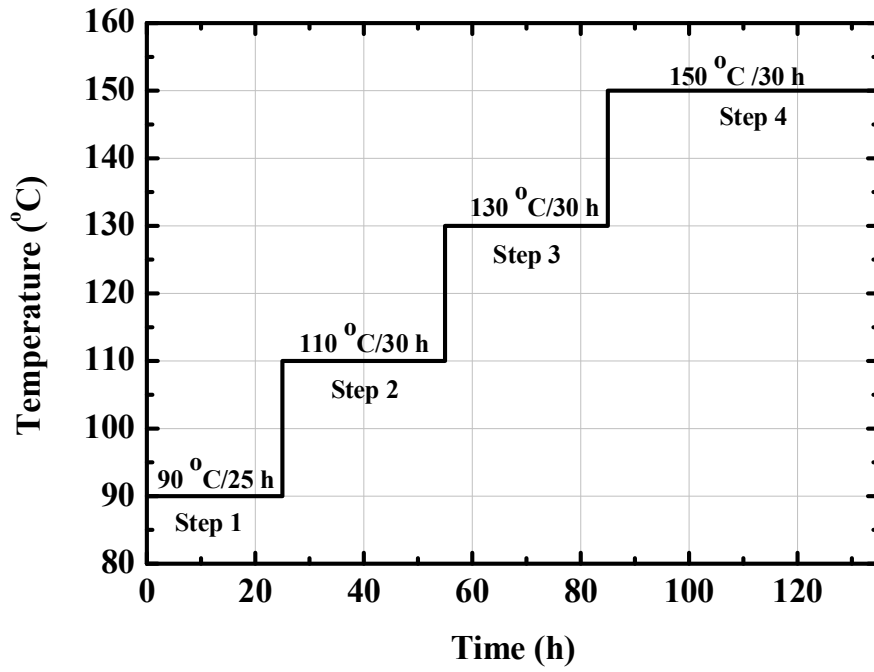


圖 5、SSADT 測試溫度與時間關係圖

參、主要發現與結論

一、實驗結果分析

表 2 是經過所有的測試程序之後，列出每一個階段通過測試與失效之樣品數。經過第一階段之後有 2 個樣品失效，之後的第二、三、四階段，分別有 3、1、2 個樣品失效。為方便分析實驗結果，分別選取一件失效(能量轉換效率 $< 10\%$)與一件通過測試(能量轉換效率 $> 10\%$)之太陽電池接收器進行討論。

表 2、每一測試階段通過測試與失效之樣品數目

Temperature steps	Failure numbers	Pass numbers
90°C	2	26
110°C	3	23
130°C	1	22
150°C	2	20

表 3 是開路電壓(open circuit voltage)與填充因子(fill factor)之數據，在此表中沒有特別列出短路電流，原因是即使是失效的電池，短路電流也均無明顯變化。通過測試之電池，開路電壓幾乎

沒有變化，填充因子則有很小之變化，約在2%之內。至於失效樣品之開路電壓與填充因子則是隨著測試溫度升高與測試時間增加逐漸降低，一開始特性衰減較快，之後則趨於緩和。表4則是針對所有通過測試樣品與所有失效樣品，計算每一階段其輸出功率之平均值，在第一階段與第四階段通過測試樣品之輸出功率不降反升，詳細原因有待釐清，也許源自於量測誤差。

表3、通過測試與失效樣品之開路電壓與填充因子之變化量

Result	Temperature	$\frac{\Delta V_{OC}}{V_{OC}(\text{initial})}$	$\Delta FF/FF(\text{initial})$
PASS	90°C	0.00%	-1.23%
	110°C	0.00%	-1.60%
	130°C	0.01%	-1.78%
	150°C	0.00%	-1.49%
Failed cell	90°C	-2.01%	-10.20%
	110°C	-4.01%	-23.00%
	130°C	-7.00%	-32.80%
	150°C	-17.00%	-33.20%

表 4、通過測試與失效樣品輸出功率之變化量

Passed cell(average)				
Temperature	90°C	110°C	130°C	150°C
$\Delta Pm / Pm_{(initial)}$	1.45%	-0.236%	-0.317%	0.027%
Failed cell (average)				
Temperature	90°C	110°C	130°C	150°C
$\Delta Pm / Pm_{(initial)}$	-7.07%	-23.36%	-28.71%	-36.12%

圖6與圖7分別為通過測試之電池，在每一階段之後，照光與無照光之電壓-電流曲線圖。惟不管照光與否，每一測試階段之電壓-電流曲線都沒有明顯之變化。

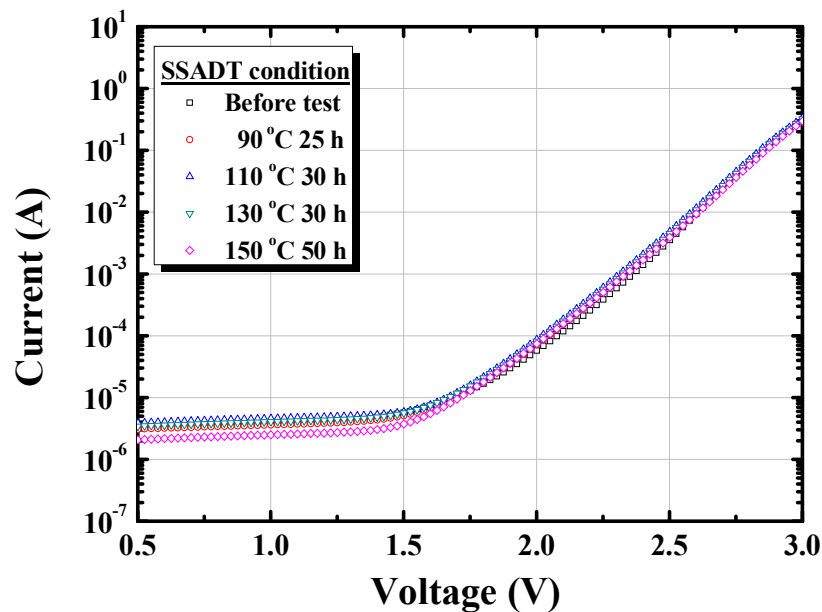


圖 6、通過測試之每一階段不照光之電壓-電流曲線圖

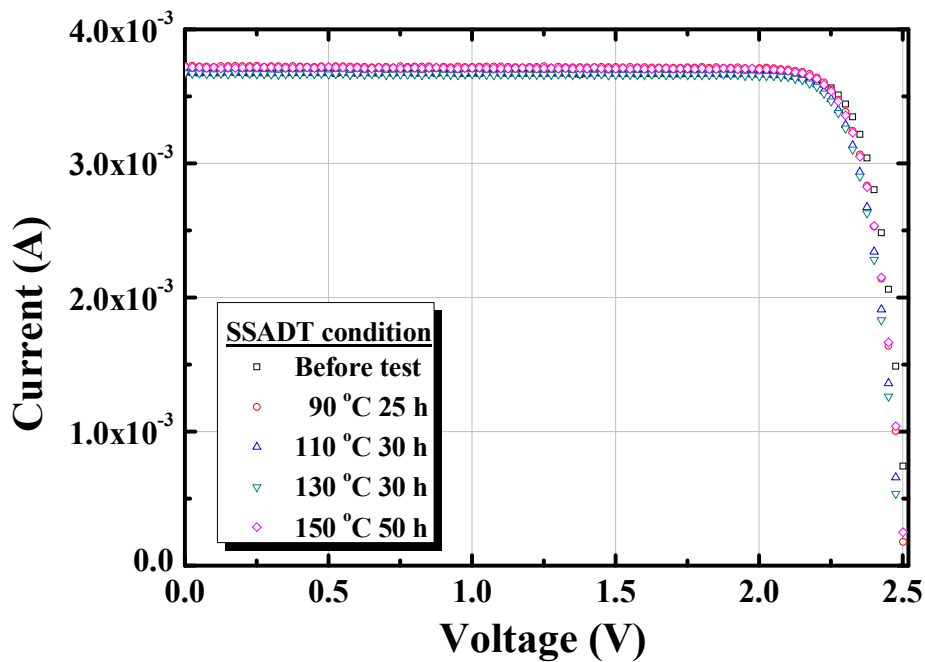


圖7、通過測試之每一階段照光電壓-電流曲線圖

圖 8 為經過一連串老化實驗之後，失效電池的每一階段之暗電流－電壓曲線。暗電流-電壓由 擴散電流($I_{diffusion}$)、復合電流($I_{recombination}$) 和並聯電阻(shunt resistance)效應組成(串聯電阻效應在此處忽略)。劃一條 $I=I_{SC}$ 的線，該線與暗電流－電壓曲線之交叉點即為開路電壓。由下列方程式

$$n = \frac{V_2 - V_1}{V_T \times \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$$

可以計算出在此交點之理想因子。若斜率越大，表式理想因子越小。圖中顯示隨著老化實驗的進行，斜率逐漸變小，代表理想因子越大，此元件越趨近復合電流支配的情況^[13,18]。

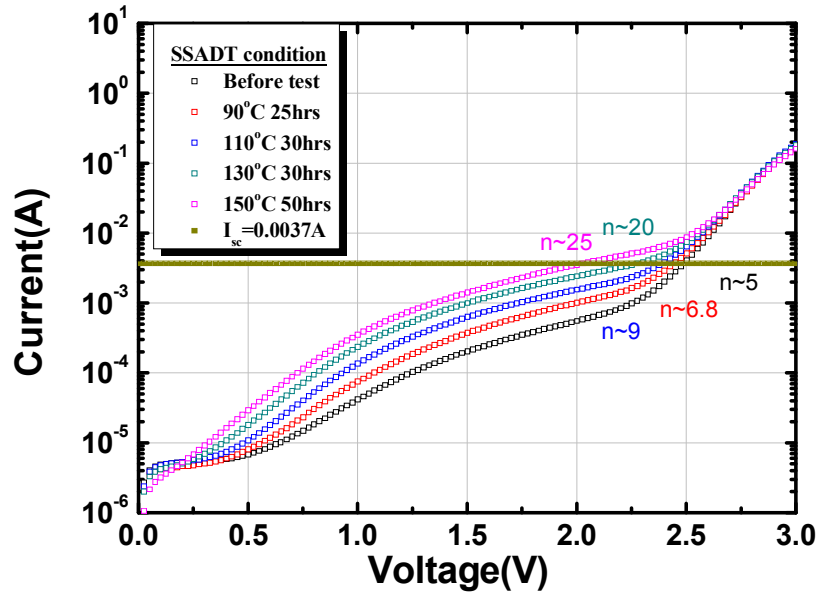


圖 8、每一階段老化實驗不照光電流－電壓曲線

太陽電池接收器之暗電流可以由方程式(1)表示之，方程式(2)

~ (5)則是說明方程式(1)二個分項代表之意義。

$$I_{dark}(V) = I_{diff}(V) + I_{scr}(V) \quad (1)$$

$$I_{diff} = I_{01} (e^{qV / k_B T} - 1) \quad (2)$$

$$I_{01} = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_d L_n} + \frac{D_p}{N_d L_p} \right) \quad (3)$$

$$I_{scr} = I_{02} (e^{qV / 2k_B T} - 1) \quad (4)$$

$$I_{02} = \frac{qn_i(W_n + W_p)}{\sqrt{\tau_n \tau_p}} \quad (5)$$

方程式(1)之中， $I_{diff}(V)$ 定義為為 PN 接面中性區(neutral region)之擴散電流(diffusion current)，而 $I_{scr}(V)$ 則定義為 PN 接面匱乏區(depletion region)再生-複合電流(generation- recombination current)。

為更清楚說明，用圖 9 來解釋暗電流行為。由於暗電流-電壓曲線由 $I_{diffusion}$ 、 $I_{recombination}$ 和並聯(shunt resistance)電阻效應組成(串聯電阻效應在此處忽略)[19,20]。從圖 9 可看到擴散電流會影響大電壓的電流；復合電流會影響小電壓的電流，但是從圖中，只有影響到中間電壓的部分，這是由於還有並聯電阻的效應，並聯電阻也會影響小電壓的電流，而由圖可以看出來，在電壓為 0~1 V 的範圍，並聯電阻的電流比復合的電流大很多，即使復合電流增加十倍，在此範圍內的電流不會有變化。

圖 10 是一連串老化實驗之後，每一階段之照光電流-電壓曲線。隨著老化實驗的進行，短路電流沒有明顯變化，惟開路電壓逐漸下降，進而造成太陽能電池的效率下降。

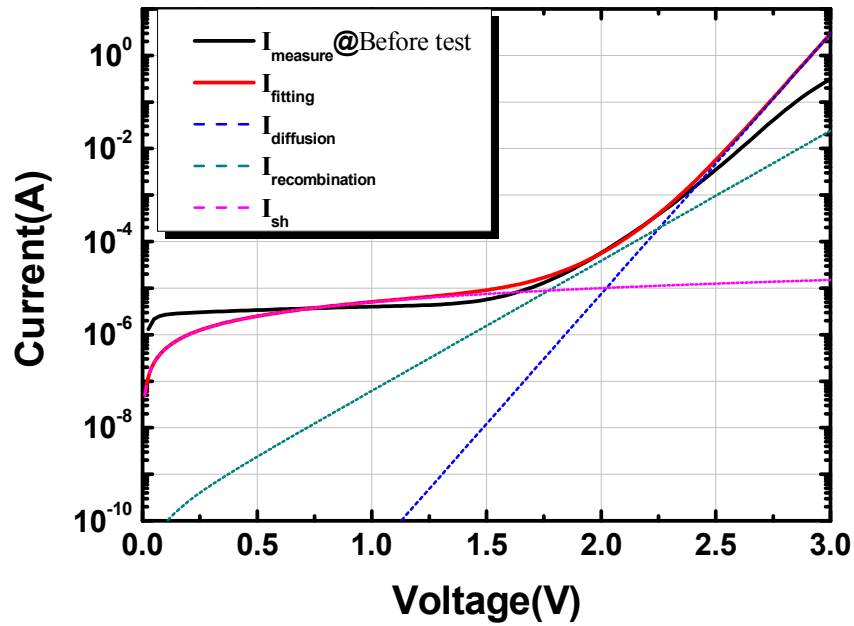


圖 9、解釋暗電流受到復合電流、擴散電流與並聯阻抗效應之影響

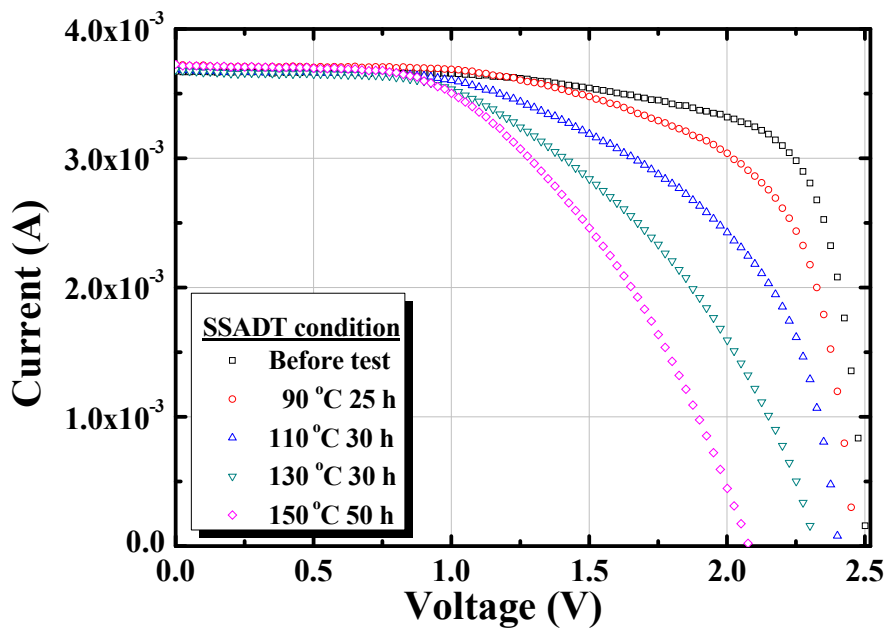
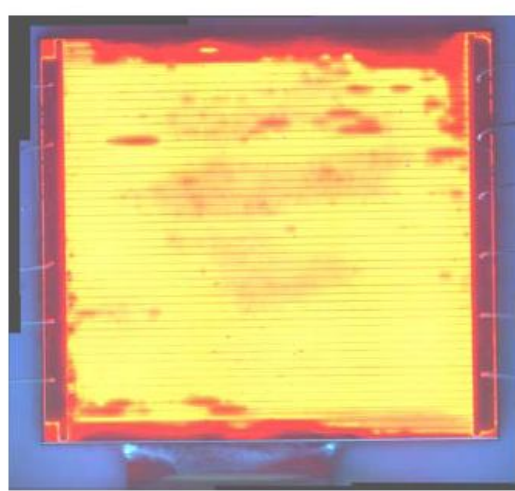


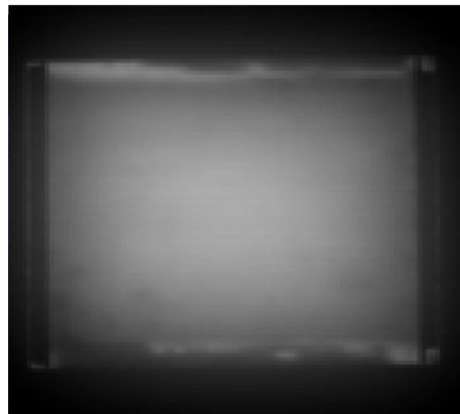
圖 10、每一階段老化實驗之照光電流－電壓曲線

圖 11 是電激光譜(EL)檢測結果，可見光影像是 InGaP 上層子

電池，紅外光影像是 InGaAs 中間子電池，底層的 Ge 電池受限於設備，無法觀測到。由 EL 測試結果，不管是 InGaP 子電池，抑或 InGaAs 子電池，都可以發現元件邊緣周圍有很明顯的暗區，顯示在元件周圍可能有缺陷產生，導致暗電流增加，使得開路電壓下降，效率降低。圖 12 說明 InGaP/InGaAs/Ge 三接面太陽電池復合流可能路徑示意圖。

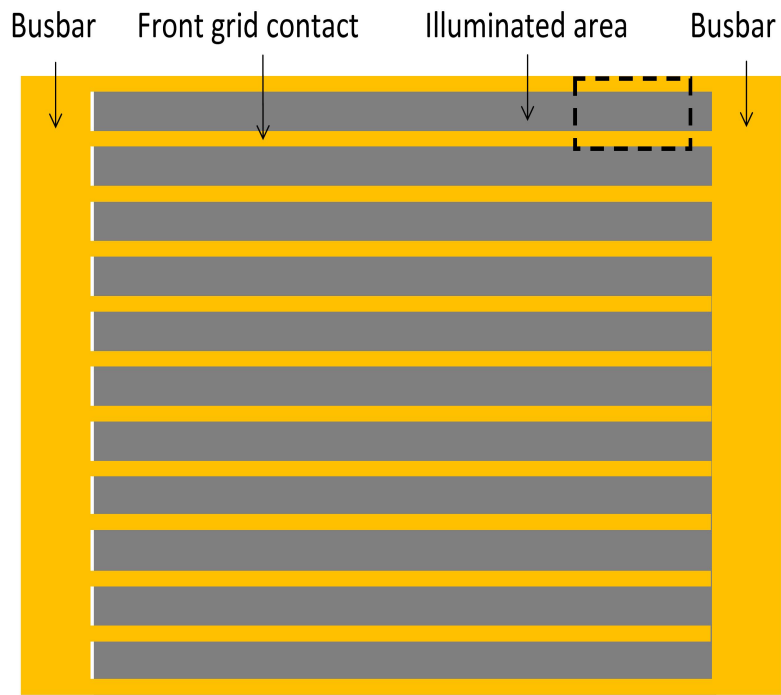


(a)

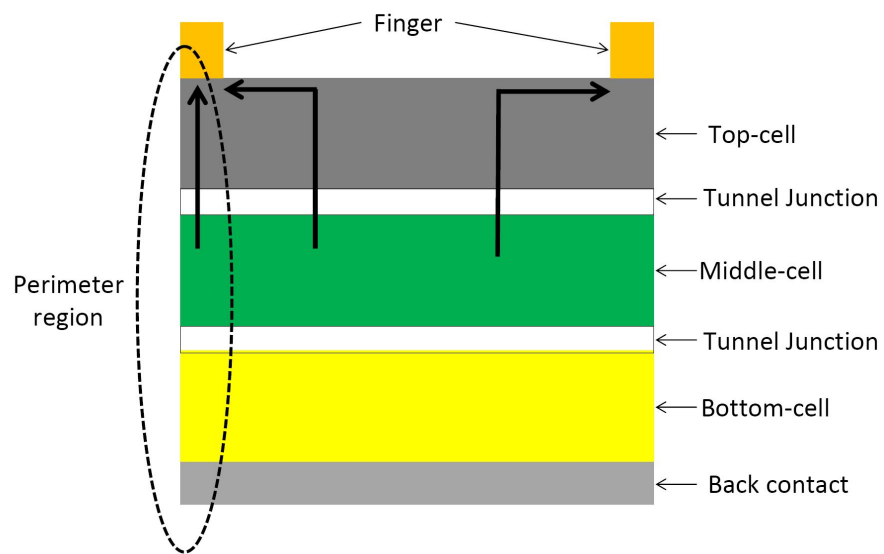


(b)

圖 11、太陽電池元件 EL 檢測照片(a)可見光;(b)紅外光



(a)



(b)

圖 12-(a) InGaP/InGaAs/Ge 三接面太陽電池正面電極示意圖與
(b) 太陽電池元件周圍復合電流可能路徑示意圖

二、結論

利用 SSADT 方法研究 GaInP/GaInAs/Ge 三接面聚光型太陽能接收器承受溫度應力情形之下的衰退機，清楚地觀察到隨著熱處理溫度的升高，太陽電池的開路電壓(V_{oc})會逐漸下降，然而填充因子(FF)與暗電流之變化程度卻遠較開路電壓明顯甚多。由前面之探討，這些 III-V 族多接面太陽電池接收器特性衰退機制，可歸納為太陽能電池元件周圍因為復合電流產生，導致開路電壓下降與填充因子降低，進而使得轉換效率下降。

由 EL 影像可以發現太陽電池晶片周圍有暗區出現，可能因為缺陷產生，導致復合電流增加。根據無照光之 I-V 特性分析， I_{dark} 隨著熱處理溫度上升而增加。使用可靠度軟體計算活化能，只有 0.16 eV，比其他報告更低，由於實驗樣品-太陽電池接收器沒有披覆光學保護矽膠，容易受到環境變化影響。

實驗過程使用之太陽電池接收器樣品，由於較多早夭樣品出現，使得在進行可靠度軟體模擬使用壽命時，容易產生誤差。未來實驗樣品將先進行篩選，避免有過多早夭樣品出現。此外，根據矽晶太陽電池模組戶外長期運轉之經驗，濕氣與紫外光等因素也是造成性能衰退之重要原因，而聚光型太陽電池模組除接收器之外，尚包含光學組件，其中壓克力聚光透鏡性能受溫度、溼度以及紫外光之影

響更甚於太陽電池接收器，因此今後的工作，將進一步進行濕氣與紫外光等其他應力之可靠性研究，更貼近聚光型太陽電池模組實際的工作環境，提供未來設計與材料選用之參考依據。

肆、参考文献

- [1] J. H. Ermer, R. K. Jones, P. Hebert, P. Pien, R. R. King, D. Bhusari, R. Brandt, O. Al-Taher, C. Fetzer, G. S. Kinsey, and N. Karam: Proc. IEEE J. Photovoltaic **2** (2012) 209.
- [2] F. Dimroth, W. Guter, J. Schöne, E. Welser, M. Steiner, E. Oliva, A. Wekkeli, G. Siefert, S. P. Philipps, and A. W. Bett : Proc. 34 th IEEE PVSC, 2009, p. 1038.
- [3] W. Guter, J. Schöne, S. P. Philipps, M. Steiner, G. Siefert, A. Wekkeli, E. Welser, E. Oliva, A. W. Bett, and F. Dimroth: Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 223504/1.
- [4] G. S. Kinsey, P. Pien, P. Hebert, and R. A. Sherif : Sol. Energy Mater.-Sol. Cells **93** (2009) 950.
- [5] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A. W. Bett, and W. Warta: Prog. Photovoltaics: Res. Appl. **10** (2002) 243.
- [6] M. Vázquez, C. Algora, I. Rey-Stolle, and J. R. González: Prog. Photovoltaics: Res. Appl. **15** (2007) 477.
- [7] I. Rey-Stolle and C. Algora: Proc. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2001, p. 2223.
- [8] C. Algora : Microelectron. Reliab. **50** (2010) 1193.
- [9] J. R. González, M. Vázquez, N. Núñez, C. Algora, and P. Espinet: AIP Conf. Proc., 2010, p. 221.
- [10] J.R. Gonzalez, C. Algora, I. Rey-Stolle, R. Alvarez, M. Vazquez, N. Nunez, F. Montalvo, J. Barbero, E. Cordero, E. Galiana, and V. Diaz: Proc. IEEE 4th World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, 2006, p. 702.
- [11] N. Núñez, J. R. González, M. Vázquez, C. Algora, and I. Rey-Stolle: Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications, 2009, p. 1949.
- [12] I. Rey-Stolle and C. Algora: Prog. Photovoltaics: Res. Appl. **11** (2003) 249.
- [13] P. Espinet, C. Algora, J. R. González, N. Núñez, and M. Vázquez :

- Microelectron. Reliab. **50** (2010) 1875.
- [14] J. R. González, M. Vázquez, N. Núñez, C. Algora, I. Rey-Stolle, and B.Galiana: Microelectron. Reliab. **49** (2009) 673.
- [15] N. Núñez, M. Vázquez, J. R. González, C. Algora, P. Espinet: Microelectron. Reliab. **50** (2010) 1880.
- [16] Eric Richman and Mia Paget : DOE SSL Market Introduction Workshop, 2009, .
- [17] Gerald B. Stringfellow, M. George Craford, Robert K. Willardson, Eicke R. Weber : High Brightness Light Emitting Diodes, Volume 48 (Semiconductors & Semimetals), 1997.
- [18] R. Hussein, D. Borchert, G. Grabosch, and W.R. Fahrner : Sol. Energy Mater. Sol. Cells **69** (2001) 123.
- [19] Jenny Nelson: The Physics of Solar Cells (Imperial College Press, London, 2002).
- [20] K.C. Reinhardt, C.S. Mayberry, B.P. Lewis, and T.L. Kreifels: Photovoltaic Specialists Conf., 2000, p. 1118.