

# 加速光致衰退測試於工業上的應用

## Accelerated Light-Induced Degradation Test for Industrial Applications

林佳玫、Marcus Gläser、Dominik Lausch

Chia-Mei Lin, Marcus Gläser, Dominik Lausch

光致衰退 (light-induced degradation, LID) 是一種廣泛存在於工業用 (單及多晶) 矽太陽能電池片上，經由照光或是施加正向電壓後，進而導致電池片效能衰退的現象。衰退的現象源自於複合中心 (缺陷) 的生成，有效監控 LID 的程度對工業界來說是必要的。然而，目前針對電池片做 LID 測試的標準程序尚未建立，此外，傳統 LID 測試的衰退源—光的硬體保養並不容易。為此，我們訂定以發展出一台可以提供可靠，快速的工業用 LID 測試機台做為目標。本文即針對機台研發的過程及其在工業上的應用作介紹。

Light-induced degradation (LID) is a well-known problem of industrial silicon solar cells and can lead to severe electrical performance loss through the formation of recombination-active defects during the excess carrier injection by illumination or forward biasing. Thereby an effective LID inspection for industry is essential. Unfortunately, a standard LID test procedure based on the solar cell level is currently missing. Moreover, the maintenance of the traditional degradation source - light is challenging. In order to solve these concerns, our goal of this work is to develop a reliable and rapid LID test procedure upon a customer friendly LID test machine. This article introduces the development process of the machine and its industrial applications.

### 一、前言

由硼—氧誘發於單晶矽太陽能電池片的 LID (light-induced degradation, LID) 效應是最被廣為討論也最為人所知的 LID 機制之一<sup>(1, 2)</sup>，因為在單晶晶柱成長的過程中，氧原子的存在是無法避免的，而硼則是 p-type 太陽能電池片的摻雜元素，因此，由硼與氧所誘發的 LID 幾乎是不可避免的。由於 LID 可能導致高達 10% (相對) 的電池片效率損失，所以有效及規律性的 LID 監控是必要的。2006 年 Axel Herguth 針對硼—氧 LID 現象首

度提出 three-state model (三相模型，A 相：退火-annealed state；B 相：衰退-degraded state；C 相：再生-regenerated state)<sup>(3)</sup>，其指出已產生光衰退的電池片 (B 相) 可以經由高溫及持續照光再度回復到光衰退前 (C 相) 的狀態。不同相之間的轉換速度與照光強度以及溫度有正向的相關。由於硼氧化合物的形成及分解存在於三相間，因此三相間的反應可以透過動力模型 (kinetic model) 來描述。Arrhenius equation (公式 1) 即常被用來探討溫度對三相間的反應速率的影響<sup>(4)</sup>：

$$\nu = \nu_{ch} \exp\left(-\frac{E_A}{K_B T}\right) \quad (1)$$

$\nu$  為不同相之間的化合物 (缺陷) 轉換率,  $\nu_{ch}$  為指數前因子 (pre-exponential factor), 與多數載子的密度有強相關 (當我們假設活化能與溫度與時間無關),  $E_A$  為活化能,  $K_B$  為波茲曼常數而  $T$  為溫度。經由此公式可以得知, 溫度對於三相間的轉換速率影響甚大。而照光會增加多數載子的密度, 導致費米能階偏移, 改變氫原子的 charge state<sup>(5)</sup>, 也因此影響再生反應的速率 (B 相 → C 相)。

除了單晶矽電池片的硼-氧 LID 之外, 近來多晶矽電池片的 LID 現象也被驗證與載子注入以及高溫有直接關係, 即所謂的 LeTID (light and elevated temperature induced degradation)<sup>(6)</sup>。綜合上述, 我們可以得知溫度與載子注入密度是研究 LID 的兩大重要因子, 且必須被精確的控制。然而實際上這並不容易達成, 其原因敘述如下:

1. 使用傳統 LID 衰退源-光源時, 必須面臨光源逐漸衰退老化的問題, 且如何保持光源的光譜精確度以及確保照射在電池片上的光源有良好的均勻度更是挑戰。
2. 溫度的變異必須嚴格控管在  $\pm 0.5$  K, 因為常用的 LID 監測電性參數  $-V_{oc}$  與溫度有強相關 (1 K = 2.2 mV)。當溫度變異過大, 不僅不同批次間的測試結果不能比對, 單一樣品的測試結果也可能不夠精確。

除了兩大因子的控管不易, 目前普遍利用模組來測試 LID 的方法既耗時又昂貴。為了排除上述所提及的顧慮, 此研究的主軸即為訂定一套可靠且快速的 LID 測試方法, 並生產出一台適合工業上使用的量測機台。

## 二、加速 LID 測試機台的研發

為了制定一套加速測試的方法, 並生產一台適合工業上使用的機台, 我們定義下列三個課題, 並利用一系列的實驗來驗證。

### 1. 如何注入載子?

載子的密度對於 LID 效應有極大的影響, 而利用透過照光 (light-induced degradation, LID, 所謂的光衰) 或是施加正向偏壓的方式 (current-induced degradation, CID, 所謂的電衰), 都是已知的載子注入方式。當多數載子的濃度增加時, 會導致費米能階 (Fermi level) 的偏移, 而誘發一連串的化學反應 (衰退以及再生的反應)。由於本研究團隊先前已驗證出 LID 及 CID 對於光衰退程度具有一致性的影響<sup>(5)</sup>, 且使用 CID 載子可以被精確以及重複性的注入, 同時 CID 測試系統的保養工作相較於 LID 系統較容易。因此, 在本研究中我們將使用施加正向偏壓的方式 (CID) 來注入載子。

### 2. 如何選定合適的電性參數來監測 LID 效應?

開路電壓 (open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) 是目前最被廣泛使用來作為監控 LID 的電性參數, 這是由於因 LID 而造成載子在太陽能電池內的生命週期 (carrier lifetime) 的變化, 會影響飽和電流 (saturation current,  $J_o$ ), 進而影響  $V_{oc}$ , 如同公式 2 所示。

$$V_{oc} = \frac{nK_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_o} + 1\right) \quad (2)$$

然而, 硼-氧缺陷的存在也會導致光生載子密度 (photo-generated current density) 損失, 進而影響電池片的效能。為了選定合適的電性參數, 我們進行了 LID 測試於一單晶矽電池片, 實驗條件為 140 °C 與一個太陽光強度的照度 (1 sun illumination)。測試期間, 電池將會數度由加熱平台取下, 並利用太陽光模擬器 (sun simulator) 來進行電性量測 (I-V measurement), 量測條件為一般工業用標準 (STC: 25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup>)。進行 LID 測試前, 電池片會先經退火 (annealing) 處理過 (200 °C, 30 分鐘), 目的是將已存在電池片中的硼氧化物去活化, 亦即 three-state model 中使 B 相回復至 A 相的反應。實驗結果如圖 1 所示,  $V_{oc}$  以及  $J_{sc}$  皆能夠反映 LID, 並且遵守 three-state model。起初, 兩電性數值皆

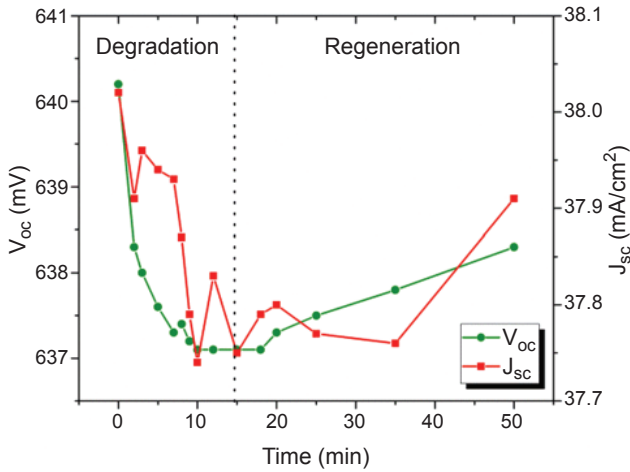


圖 1. LID 測試下  $V_{oc}$  及  $J_{sc}$  的量測結果 (LID 測試條件為  $140^{\circ}\text{C}$  及 1 sun 照度)。

逐漸下降，經過照光時間約為 15 分鐘後，LID 達到最大衰退程度並於後續高溫及照光處理後逐步進行再生反應，電性數值往上增加。雖然兩電性參數皆可以明確反映 LID 效應，但是  $J_{sc}$  曲線所顯示的波動現象值得注意。為了釐清波動性的原因，我們進行了連續性的測試，亦即我們重複量測單一電池片的  $V_{oc}$  及  $J_{sc}$  十次 (測試條件為 STC)，電池片於每次量測後需自量測平台上取下，接著再放上量測平台進行下一次的測試。實驗結果 (見圖 2) 顯示  $J_{sc}$  的確相較於  $V_{oc}$  有較大的量測變異，量測變異的計算方法如公式 3 所示。

$$\text{variation}[\%] = \frac{V_{oc}(N=X) - V_{oc}(N=1)}{V_{oc}(N=1)} \times 100 \quad (3)$$

根據此結果，我們推測  $J_{sc}$  的高量測波動性，應該是來自於  $J_{sc}$  對量測金屬平台的靈敏度比  $V_{oc}$  高，亦或是由太陽光模擬器光源本身的波動性造成的。因此，具有較高的電性量測穩定度的  $V_{oc}$  最終被選定為 LID 測試的監控參數。

### 3. 如何提升 $V_{oc}$ 量測的靈敏度？

$V_{oc}$  是與溫度強相關的電性參數，由 LID 導致的  $V_{oc}$  衰退程度 (LID-induced  $\Delta V_{oc}$ ) 與 LID 的實驗溫度成反比<sup>(3)</sup>。為了避免在加速測試時 (使用高的

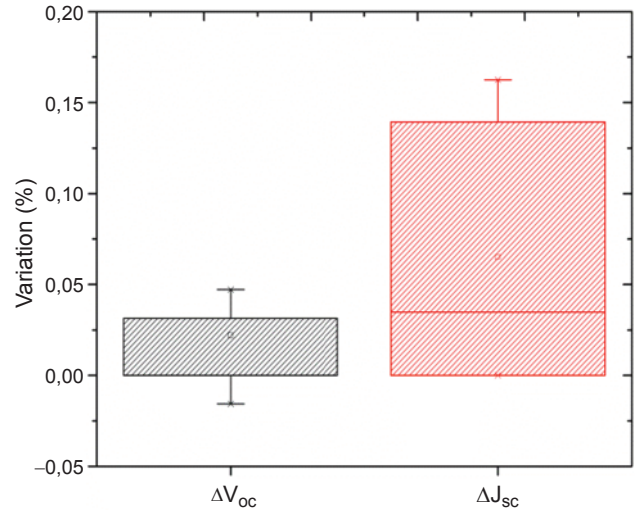


圖 2.  $V_{oc}$  及  $J_{sc}$  量測變異性的比較。

實驗溫度)，會因為 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  程度太小而有資料失真的問題產生，使用恰當的  $V_{oc}$  量測條件以提升 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  的靈敏度是有其必要性。實驗的作法為於 LID 測試的過程中，使用不同的光強度來即時量測  $V_{oc}$  值 (1、0.5 以及 0.1 個太陽光強度)。LID-induced  $\Delta V_{oc}$  的計算方法如公式 4 所示。

$$\Delta V_{oc}(t=x)[\%] = \frac{V_{oc}(t=x) - V_{oc}(t=0)}{V_{oc}(t=0)} \times 100 \quad (4)$$

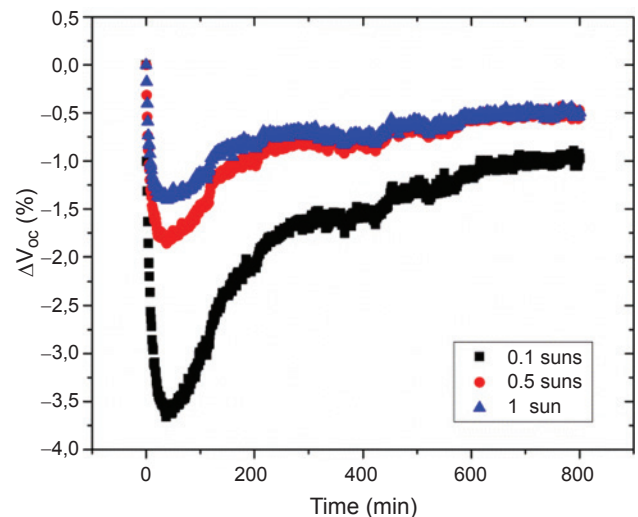


圖 3. 比較使用不同光源強度來量測電池片於 LID 過程中  $V_{oc}$  的變化。



圖 4. LID Scope 外觀圖<sup>(7)</sup>。

圖 3 顯示一單晶電池片於 LID 測試條件為 100 °C、0.1、0.5 以及 1 sun 光照度之下的  $V_{oc}$  量測結果。明顯可以觀察到的是，隨著量測  $V_{oc}$  的光強度增強，LID-induced  $\Delta V_{oc}$  則隨之變小。這是由於在低量測光照度時，注入電池片內的自由載子數目

相較於高量測光照度時少，因此當自由載子與固定量的缺陷 (硼氧化合物) 產生結合 (recombination) 後，低照度的量測條件仍存在較多的缺陷量，也因此電池片的 carrier lifetime 較短，LID-induced  $\Delta V_{oc}$  較大。自由載子與缺陷相互作用的現象，也可以由 Shockley-Read-Hall 複合理論來解釋。根據此實驗結果，我們設定量測  $V_{oc}$  的光強度為 0.1 suns。

### 三、LID Scope 於工業上的應用

#### 1. LID Scope 簡介

圖 4<sup>(7)</sup> 為本機構 (Fraunhofer CSP) 與 Laytec AG 共同研究且合作生產出的工業用 LID 加速測試機台。機台採用 CID 方式，並提供高至 160 °C 的實驗溫度以進行加速測試。此外，它具備以下特色：產操作簡易、即時  $V_{oc}$  量測、體積小、高精確性及高重複性。

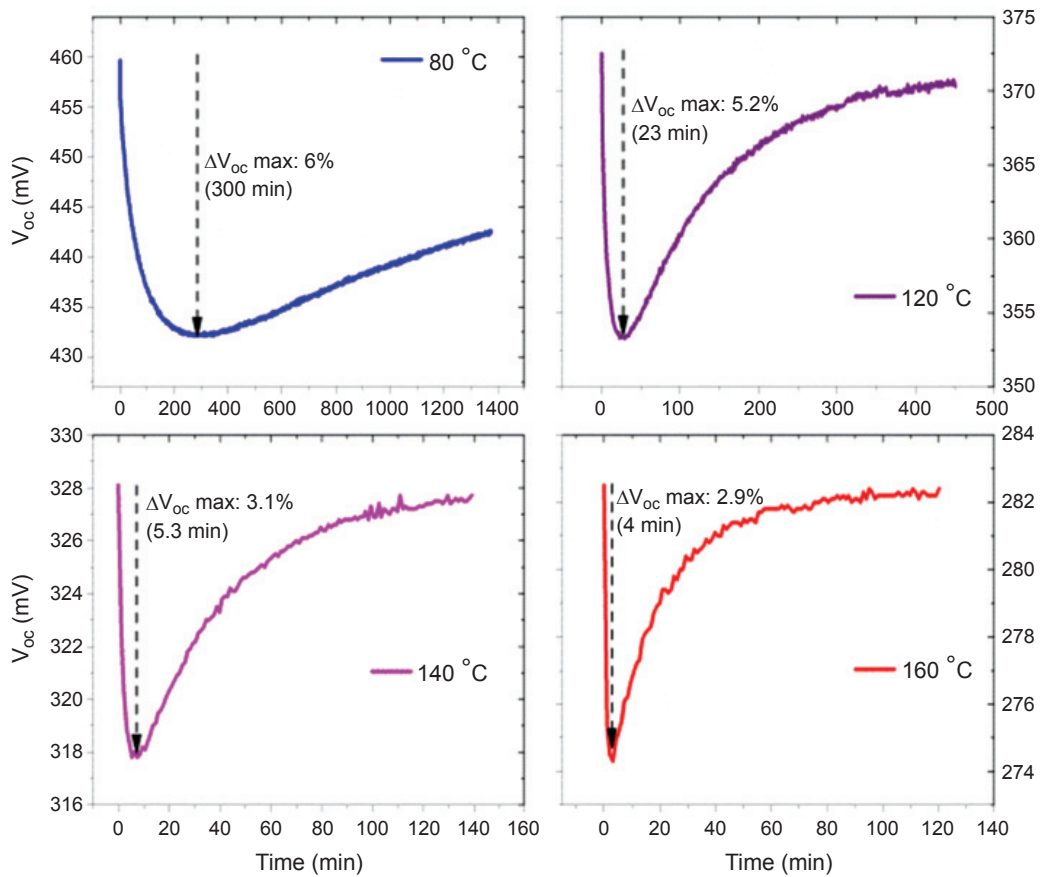


圖 5. 使用不同實驗溫度 (80 °C、120 °C、140 °C 及 160 °C) 之下的 LID 測試結果。

## 2. 溫度對於 LID 的影響

如同前言所提到的，溫度對於 LID 反應速度有極大的影響，因此本章節即利用 LID Scope 來探討溫度對於 LID 衰退程度以及測試時間的影響。圖 5 顯示不同樣品於不同實驗溫度 (80 °C、120 °C、140 °C 及 160 °C) 以及 4.7 安培 (相當於是 1 sun 照度) 之下的即時  $V_{oc}$  量測結果。明顯所見的是，不同的實驗溫度之下的  $V_{oc}$  的水位皆不相同，且  $V_{oc}$  與溫度成反比關係，這是因為  $V_{oc}$  是溫度相關的電性參數且被即時量測。而提升溫度時，不僅測試時間被縮短，LID-induced  $\Delta V_{oc}$  的最大值也相較於低溫時小，這可利用衰退與再生反應速度增快以及兩者速度變化的比例與溫度有關來做解釋 (在高溫時，再生反應對於溫度的效應，會比衰退反應更加明顯)<sup>(3)</sup>。利用 160 °C 做測試相較於 80 °C 做測試可以節省高達 98% 的測試時間。不過要特別注意的是，高溫測試時所顯示的 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  較小，因此必須藉由經驗數據 (empirical data) 來回推低溫測試亦或是常溫測試時的 LID-induced  $\Delta V_{oc}$ 。由於 LID Scope 確實提供了一個迅速、自

動化及精確的 LID 測試流程，所以適合工業上使用。

## 3. 不同材料以及電池結構的 LID 測試

LID 存在於單及多晶矽太陽能電池，且其所造成的衰退程度與電池片的結構有關。此章節將討論不同材料以及電池結構對 LID 的影響。圖 6 上圖顯示的為單晶矽但具有不同結構 (Al-BSF, PERC) 電池片的 LID 結果，下圖顯示為多晶矽 PERC 電池片的結果。相對於 Al-BSF (全鋁背電場電池) 而言，PERC 電池片的背面結構多了鈍化層 (例如氧化鋁或是氮化矽)，同時在鈍化層上開孔，以讓鋁漿在這些局部開孔的區域形成 BSF 層。可觀察到的是，這些樣品雖然有類似的 LID 現象 (衰退-再生的反應)，但時間跨度卻差異甚大。單晶電池片可於約莫 5 分鐘即達到最大的衰退程度，但多晶的電池片需要超過 100 分鐘才可得最大衰退值。比起單晶矽片只需要約 2 小時即可完成整個 LID 測試流程，多晶矽片需要至少 30 個小時以上。不似於單晶矽電池片，LID 大致上可由硼氧化合

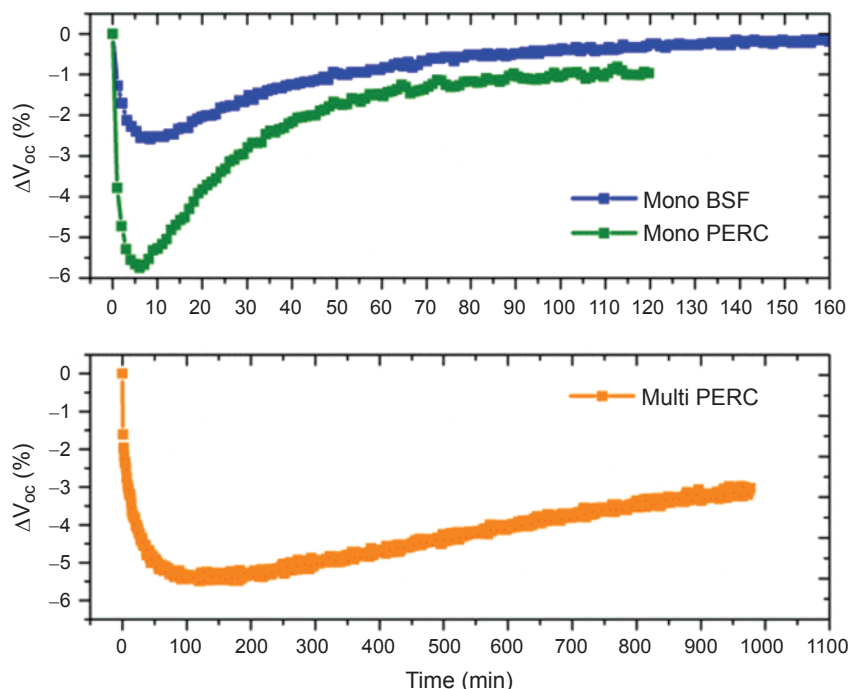


圖 6. 使用不同電池材料 (單晶材料 (上圖) 和多晶材料 (下圖)) 以及不同電池結構時的 LID 測試結果。(實驗溫度為 140 °C 以及 1 sun 照度)。

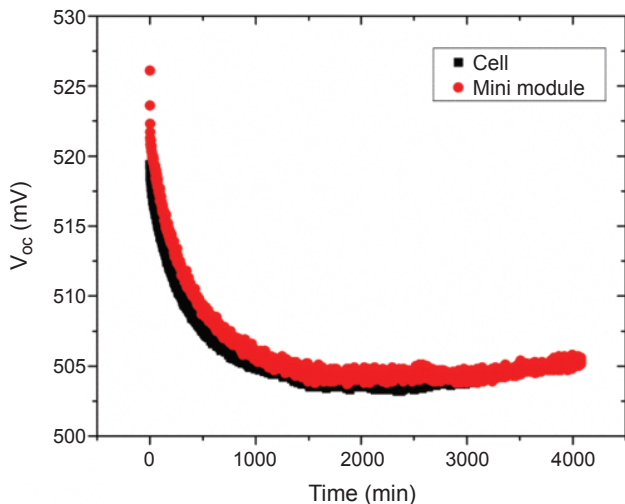


圖 7. 電池片與迷你太陽能模組的 LID 測試結果比較。(實驗溫度為 45 °C 以及 1 sun 照度)

物來解釋，多晶矽電池片的 LID 發生機制是更為複雜，並且無法單純由硼氧化物或是鐵-硼對 (iron-boron pair) 來解釋。近來 Sponge LID<sup>(8)</sup> 以及 LeTID<sup>(6)</sup> 是兩種最被廣泛討論以及探討的多晶矽電池片的 LID 現象。雖然 LeTID 可以藉由高溫以及載子注入 (照光或施加正向偏壓) 產生再生反應，但其反應時間則十分冗長 (圖 6 下圖) 且確切的衰退機制仍未知。

圖 6 上圖顯示 PERC 相較於 Al-BSF 有較大的衰退程度，這是因為高效率的電池結構 (如 PERC) 的電池效率與電池塊材的生命週期 (bulk lifetime) 強相關。PERC 電池結構的目的是透過減少電池表面再結合 (recombination) 以提升電池效率，但因為 LID 而降低了電池塊材中自由載子的擴散長度 (diffusion length)，使其未能順利到達電池表面，進而被收集，反而導致 PERC 比起 Al-BSF 有較大的衰退程度。由於 LID Scope 能適用於所有電池材料以及結構，因此適合做為工業上使用。

#### 4. 迷你太陽能模組 (mini module) 的 LID 測試

利用迷你太陽能模組來做 LID 測試是一般工業上常用的手法。其測試流程是先製作迷你太陽能模組，然後利用照光的方式來進行 LID 測試。雖然 LID Scope 的量測目標物為太陽能電池片，且強

調因無需模組製作，而達到省時及省錢的效益。但經過測試後，結果顯示 LID Scope 亦可提供使用者迷你太陽能模組等級的 LID 測試。圖 7 中顯示的兩條曲線，分別是電池片以及迷你太陽能模組於 LID 實驗條件為實驗溫度 45 °C 和電流 9.8 A (相當於是 1 sun) 時所即時量測的  $V_{oc}$  結果。由於 LID 的衰退程度會受到許多因素的影響，例如電池片內的硼和氧濃度以及電池片的生產製程：(1) 擴散製程 (POCl<sub>3</sub> diffusion) (2) 退火製程 (metallization co-firing)，為了精確評估後續實驗結果，我們選定了兩片鄰近的電池片 (neighboring cell)，並將其中一片封裝成迷你太陽能模組來與另一片電池片做比較。結果顯示兩樣品有幾乎一樣的變化趨勢，唯一不同的是  $V_{oc}$  起始值並不相同。我們推測這應該是與電池片本身接受到的溫度不同有關，亦即迷你太陽能模組內的電池片接受到相對於另一電池片有較低的溫度，因為兩個樣品皆在相同機台設定溫度下被量測，也因此迷你太陽能模組有較高的  $V_{oc}$  起始值。

#### 5. 估算由 LID 造成的效率損失 (LID-induced $\Delta E_{ta}$ )

雖然  $V_{oc}$  被選定做為 LID 的監控參數，但  $V_{oc}$  並無法直接做為工業之間比對的參數或是被直

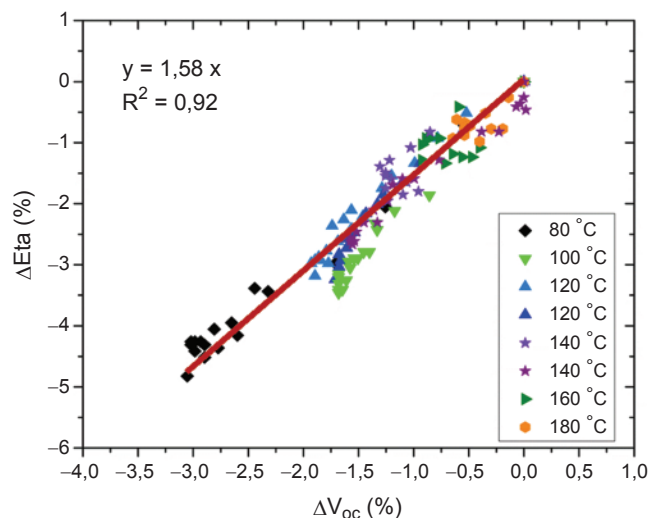


圖 8. LID-induced  $\Delta V_{oc}$  與 LID-induced  $\Delta E_{ta}$  的關係圖。 $V_{oc}$  與  $E_{ta}$  由 LID Scope 以及太陽光模擬器量測。

接用來計算效率損失。因此我們嘗試的找出LID-induced  $\Delta\eta$  與 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  的關係，如圖 8 所示。LID-induced  $\Delta\eta$  與 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  各別是根據太陽光模擬器 以及 LID Scope 的測試結果計算而得，亦即圖中的每一點代表單一樣品的結果，於 LID 測試之前，每單一個樣品會先經由太陽光模擬器測試過，以取得起始效率值，待 LID 測試結束後，所有的樣品會再經由太陽光模擬器測試而取得另一次效率值，兩次結果換算後即可以取得 LID-induced  $\Delta\eta$ 。而 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  則可於量測後直接由 LID Scope 上讀取。明顯可見的是 LID-induced  $\Delta\eta$  與 LID-induced  $\Delta V_{oc}$  呈現線性關係。換句話說，只要將此線性關係置入於機台的軟體程式，那麼 LID-induced  $\Delta\eta$  的數值即可在 LID 測試完成後一併取得。根據此經驗數據 (empirical data)，透過 LID Scope 量測來估算 LID-induced  $\Delta\eta$  確實是可行的。

#### 四、結論

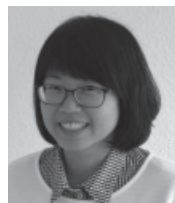
在此研究中透過了一系列的測試，我們建立了一套快速且可靠的 LID 測試方法，並且與 Laytec AG 共同生產出適合工業上使用的 LID 量測機台-LID Scope。此套方法具備了下列的優點：

1. 透過高溫測試 (160 °C)，測試時間可以被節省高至 98%。
2. 所有的電池片材料以及電池結構皆可被測試。
3. 可以測試迷你太陽能模組等級的 LID 損失。
4. LID 造成的效率損失可以被估算。
5. 節省成本 (不須額外製作太陽能模組)。
6. 即時的產線品質控管。
7. 操作簡易。
8. 因為有效的品質監控，而贏得更多客戶的信任。

目前產業技術標準 (SEMI standard) 正在籌備中，預計在未來的幾個月內正式公告，屆時將可提供使用者 (工業和 客戶) 間更佳良好的溝通。

#### 參考文獻

1. S. W. Glunz et al., *Solar Energy Material & Solar Cells*, **65**, 219 (2001).
2. K. Bothe und J. Schmidt, *Journal of applied physics*, **99**, 013701 (2006).
3. A. Herguth et al., "A new approach to prevent the negative impact of the metastable defect in boron-doped Cz silicon solar cells", *IEEE*, 7-12 May (2006).
4. A. Herguth and G. Hahn, *Journal of Applied Physics*, **108**, 114509 (2010).
5. M. Glaser and D. Lausch, *Energy Procedia*, **77**, 592 (2015).
6. F. Kersten et al, "A new light induced volume degradation effect of mc-Si solar cells and modules", *31th EUPVSEC*, September (2015).
7. <http://www.laytec.de/lidscope/>
8. K. Petter et al. 2013, "Light induced degradation of solar cells made from high performance multi wafers", *29th EUPVSEC*, September (2015).



林佳玫小姐為德國 Freiberg 大學，太陽能及半導體科技研究所碩士，現為德國 Fraunhofer CSP (center for silicon photovoltaics) 研究機構的研究人員。

Chia-Mei Lin received her Master in photovoltaics and semiconductor technology from the University of Freiberg. She is currently a researcher at Fraunhofer CSP.



Marcus Gläser 先生現為 Fraunhofer CSP 研究機構專攻博士學位。

Marcus Gläser received a bachelor degree in solar technology (photovoltaics) at the "Anhalt University of Applied Sciences" in 2011. After his master degree in sustainable energy systems at the Otto-von-Guericke University in Magdeburg, he started as a PhD student with Fraunhofer CSP in September 2014 working on the carrier induced hydrogen passivation of bulk defects in crystalline silicon solar cells.



Dominik Lausch 先生為德國 Halle 大學物理博士，現在身為 Fraunhofer CSP 研究機構中的研究組長，小組研究方向為表面鈍化及沉積，電漿蝕刻以及針對太陽能領域相關的創新機

台的研發。

Dominik Lausch received the diploma degree (A) in physics from the University of Leipzig, Germany, in 2009. During his studies, he was with the company Q-Cells SE on various subjects, including his diploma thesis about pre-breakdown effects. In 2012, he received the Ph.D. degree in natural science from the University of Halle (Saale), Germany, in cooperation with the Fraunhofer

Center for Silicon Photovoltaics CSP and Q-Cells SE. His dissertation explored the subject of the influence of recombination active defects which received the FAHL Award in 2011 and the PVSEC student Award for Outstanding scientific research in 2012. He is now team leader at Fraunhofer CSP dealing with plasma texturing, passivation and innovative tool development for PV.