

銅銦鎵硒薄膜太陽能電池光電特性量測技術

The Measurements of the Electro-Optical Characterization for Cu(In,Ga)Se₂ Thin-Film Solar Cells

施文傑、吳彥輝

Wen-Chieh Shih, Yan-Huei Wu

太陽能電池是一種光伏特效應的元件，利用吸收太陽光產生電能的機制來提供電力，因此光電特性分析是太陽能電池性能優劣的關鍵，本文將討論銅銦鎵硒薄膜太陽能電池的電性和光學特性量測。首先，介紹三種電容－電壓的量測方式，包括傳統式、導納頻譜和激勵電容剖面法，此外，討論銅銦鎵硒導電二次相的分析方法。光學特性量測為光致螢光光譜和時間解析光致螢光法，此兩種方法可以快速分析薄膜品質和成分，也可以作為製程中線上的檢測工具。

Solar cell is the photovoltaic device which can generate electrical power by absorbing sunlight. The analysis of electro-optical characterization is the key issue related to the performance of solar cells. In this article, we will introduce the electrical and optical measurements of Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells. At first, we demonstrate three capacitance-voltage (C-V) techniques, including general C-V method, admittance spectroscopy, drive-level capacitance profiling. The conductive secondary phase in CIGS film will be discussed. The optical measurements are photoluminescence spectrum and time-resolved photoluminescence which can be analyzed for the quality and the composition of thin-film. These two optical techniques can provide the harmless and untouchable in-line measurement for the fabrication.

一、前言

近十年來全球太陽電池產量每年以平均 30% 的成長速度快速發長，單晶矽和多晶矽太陽電池在這產品的增加下扮演著吃重的角色，約佔 80% 以上太陽電池產品，尤其結晶矽太陽電池和低成本薄膜太陽電池受到更多的青睞。然而矽為一間接能隙半導體，對太陽光的吸光係數不佳且具有

嚴重的光衰退性質（「斯德伯勒－隆斯基 (Staebler-Wronski)」效應⁽¹⁾），因此在製作太陽能電池時，對矽原料的需求量極大。隨著全球對太陽光電的需求增加，也導致矽材的價格飛漲，為降低成本與有效地運用原物料，各方開始投入薄膜太陽能技術的開發。相較於其他薄膜型太陽能電池，CIGS 具有相當良好的熱穩定性、不具毒性物質，以及成本低的

優勢，因此也使得 CIGS 薄膜太陽能電池在市場上逐漸嶄露頭角。

早在 1970 年代初期，美國貝爾實驗室便開始對硒化銅銻 (CuInSe₂, CIS) 之性質展開研究。之後在 1980 年代初期，美國波音公司使用蒸鍍法製備世界上第一個硒化銅銻 (CuInSe₂, CIS) 之太陽能電池，經過不斷的製程改良，其光電轉換效率可達 12%，在當時便被公認為最有潛力之材料。直到 1990 年代後期，美國再生能源研究室 (NREL) 在 CIS 中摻雜鎵 (Ga) 元素，也就是現在大家所熟知的 CIGS，其光電轉換效率更是大幅提昇，並早在 2001 年便已逼近 20% 大關。目前 CIGS 太陽電池最高效率為 20.3%，為德國 Centre for Solar Energy and Hydrogen Research (ZSW) 在 2010 年 11 月時所發表⁽²⁾，這表示 CIGS 太陽能電池效率已達到商用運轉程度。

二、技術背景

在太陽能電池當中，藉由 *n* 型半導體和 *p* 型半導體形成 *p-n* 接面，形成空間電荷區 (space-charge region)，亦稱為空乏區 (depletion region)，並建立內建電場 (built-in voltage)。當光入射至 *p-n* 接面時，理想狀態下，大部分的光能量將被吸收，並在空間電荷區產生大量電子電洞對。由於內建電場的關係，電子電洞產生後會快速的各自往相反方向移動，形成光電流，因此探知電池內部自由載子在空間上的分布及其濃度，對於了解電池基本物理性質、電池接面 (interface) 品質的良窳，以及提供製程改進方向上，具有相當重要的指標性意義。傳統矽基太陽能當中，自由載子濃度分布主要取決於離子佈植的劑量 (dose)、佈植能量 (energy) 與其熱擴散之溫度、時間。量測的手法則是藉由傳統接面電容－電壓 (conventional junction capacitance-voltage) 的曲線⁽³⁾，求得電池內部載子濃度的空間上分布、正確的載子濃度以及內建電場大小。

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = \frac{\varepsilon}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon P}{2(\phi + V)}} \quad (1)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(\phi + V)}{qP}} \quad (2)$$

$$P(W) = -\frac{2}{q\varepsilon A^2} \left[\frac{d\left(\frac{1}{C_j^2}\right)}{dV} \right]^{-1} \quad (3)$$

在上式當中，*P* 代表電洞濃度， ϕ 代表內建電場大小，*W* 代表空間電荷區的寬度， ε 代表介電常數。

然而在 CIGS 太陽能電池發展的過程當中，與矽基最不同的地方在於 CIGS 薄膜中，自由載子主要的貢獻來自於材料本身的缺陷以及導電的二次相⁽⁴⁻⁵⁾，因此僅利用傳統接面電容－電壓的量測手法，無法成功地定量解析出介面缺陷 (interface state)、自由載子 (free carrier) 與塊材缺陷 (bulk trap)。有鑑於此，全世界許多專家學者莫不以能定量的解析出 CIGS 太陽能電池介面缺陷、自由載子以及塊材缺陷，開發鑑定導電二次相的手法為聖杯。

三、CIGS 太陽電池尖端電容－電壓分析

1. 傳統接面電容－電壓法

圖 1 為傳統接面電容－電壓 (conventional junction capacitance-voltage) 量測。圖 1(a) 為 CIGS 太陽能電池在直流偏壓為 -1 至 $+0.7$ V、交流振幅及頻率為 100 mV 及 50 KHz 下，電容對電壓曲線。圖 1(b) 為利用方程式 (1) 至 (3) 求得空間電荷區寬度對載子濃度分布曲線。

由圖 1(a) 可以觀察到在沒有外加偏壓下 (亦即 0 V) 時，其電容值為 5.7 nF。換算其載子濃度及空間電荷寬度為約為 $4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 及 $0.8 \mu\text{m}$ 。相較於美國 NREL 所發展 19.9% 之元件的特性－電容值 5.5 nF，載子濃度及空間電荷區寬度為 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 及 $0.3 \mu\text{m}$ 略大了一些⁽⁶⁾。此外，由圖 1(a) 還可以觀察到，其內建電場僅為 0.3 V，這顯示元件過早進入順向偏壓區。圖 1(b) 為 CIGS 太陽能電池空

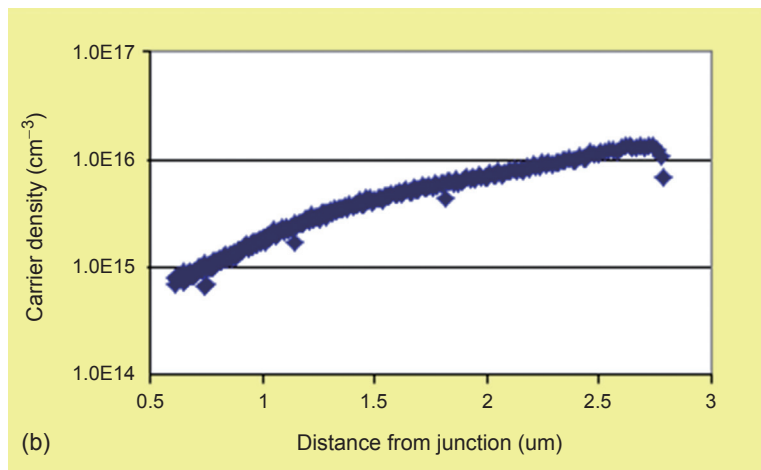
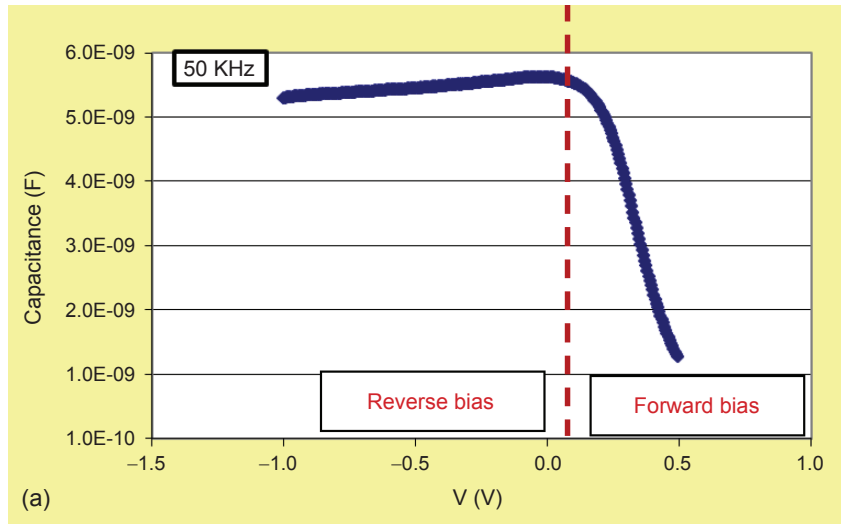


圖 1.
 (a) CIGS 太陽能電池在直流偏壓為 -1 至 +0.7 V，交流振幅及頻率為 100 mV 及 50 KHz 下，電容對電壓曲線；(b) CIGS 太陽能電池空間電荷區寬度對載子濃度分布曲線。

間電荷區寬度對載子濃度空間分布曲線。由圖 1(b) 可以清楚地看到，載子濃度在空間上的分布相當寬廣，這也顯示在 CIGS 膜內載子濃度分布不是均勻的分布，因而導致元件過早進入順向區。

2. 導納頻譜法

為了定量求得介面態位 (interface state)，因此僅利用微小交流振幅來探得介面態位的導納頻譜法 (admittance spectroscopy, AS) 便油然而生。不同於傳統接面電容－電壓法，使用直流偏壓配合微小交流振幅的量測手法，導納頻譜法僅利用微小的交流振幅，在不同的背景溫度下，藉由微小電容量的改變，定量求得介面態位的數量。圖 2 為導納頻譜法示意圖，其中 EDS 為缺陷 (defect) 之能量分布； E_e 為缺陷能量深度 ($E_F - E_e$)； ω 為外加交流訊號

頻率； ν 為缺陷特徵熱發射頻率 (attempt-to-escape frequency)。在太陽能電池空間電荷區以及 CIGS 膜內中性區當中，在沒有外加電場下及特定溫度環境下，費米能階將被拉至能帶中某一位置，此時僅利用一微小交流訊號 (~100 mV) 在費米能階附近上下擺幅。如果在這一個能量深度之內存在 defect，電容訊號將產生變化。藉由這個變化，我們可以得到此一能量深度之介面態位數量。

圖 3(a) 為導納頻譜法電容－頻率曲線。將圖 3(a) 中電容值對頻率作偏微分後，可以得到圖 3(b)。將圖 3(b) 當中每一波峰對應之角頻率作 Arrhenius 座標，即可得到 CIGS 薄膜之特徵熱發射頻率 (ν_0)，如圖 4 所示^(7, 8, 9)。然而，導納頻譜法雖然提供了一個快速量測多數載子的方法，對於介面態位的偵測也具相當高的靈敏性，但如果膜內中

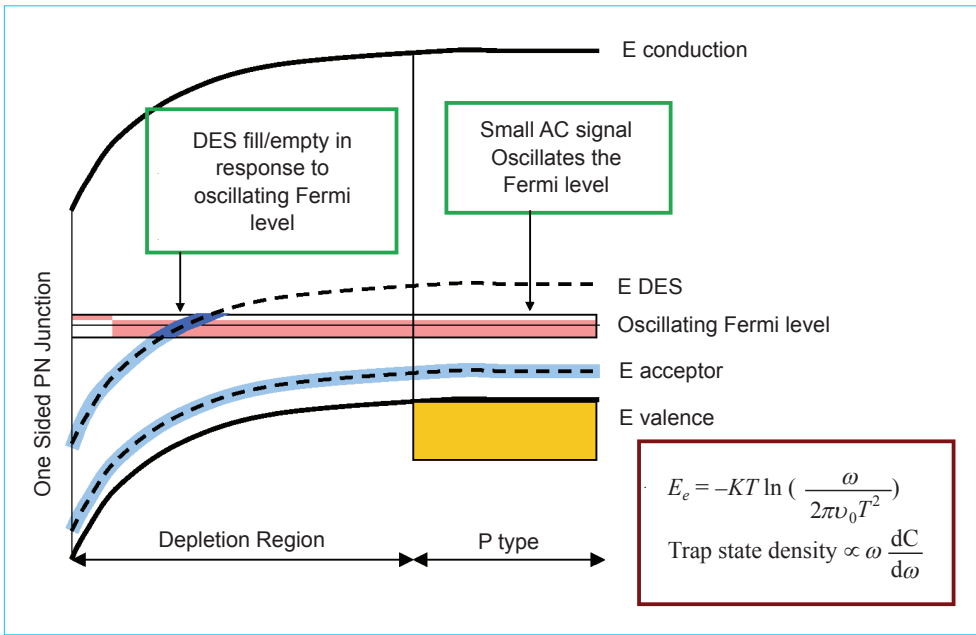
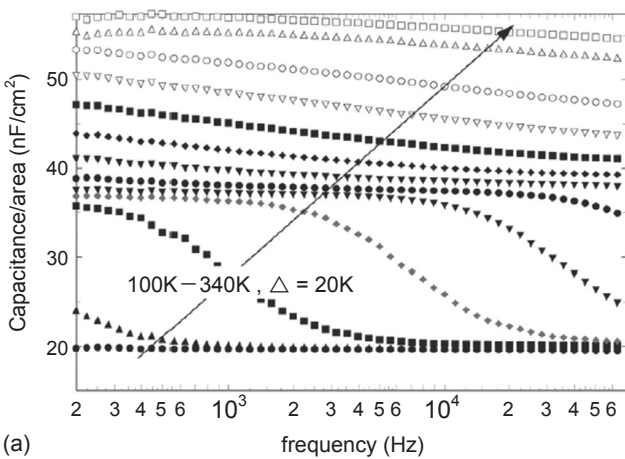
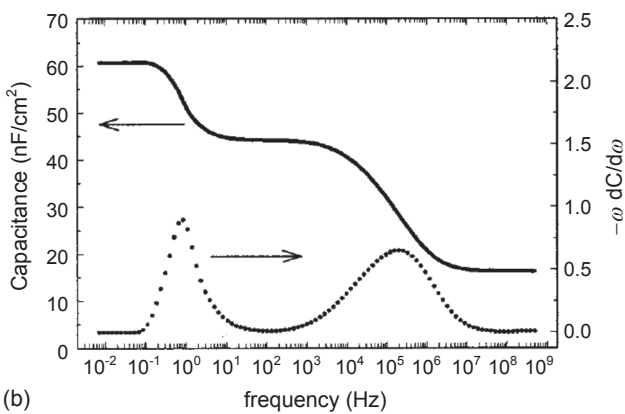


圖 2. 導納頻譜法示意圖。



(a)



(b)

圖 3. (a) 導納頻譜法電容—頻率曲線⁽⁷⁻⁸⁾ ($V_{dc} = 0$ V, $V_{ac} = 100$ mV, $f = 500 - 250$ kHz), (b) 導納頻譜法 $dC/d\omega$ -頻率曲線⁽⁷⁻⁸⁾。

性區的塊材缺陷過多，將使量測上出現許多雜訊，增加分析上的困難。

3. 激勵電容剖面法

由於傳統界面電容—電壓量測容易受到介面態位的干擾，因而使得量測結果產生相當程度的誤差；導納頻譜法容易受到塊材缺陷的影響，因而增加量測上的誤差與分析上的困難。激勵電容剖面 (drive-level capacitance profiling, DLCP) 法是一個可以同時避開介面態位與塊材缺陷干擾的尖端電

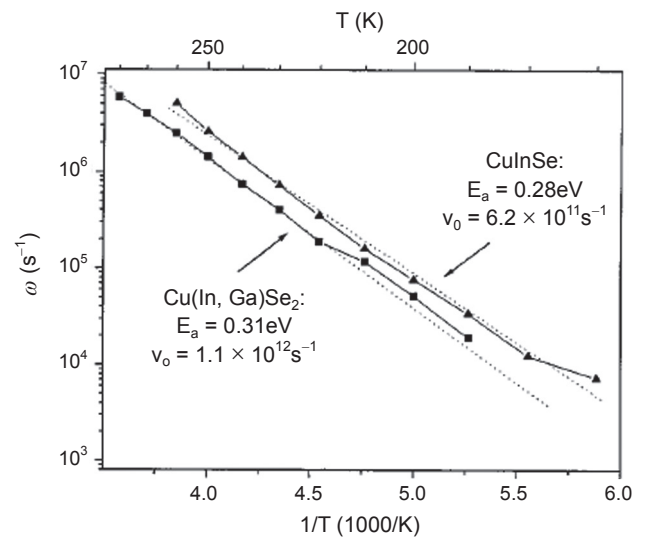


圖 4. 導納頻譜法⁽⁹⁾。

容－電壓量測方法。Heath 博士是第一位將 DLCP 應用於 CIGS 太陽能電池並詳細講述其物理機制的人⁽⁹⁾。DLCP 量測的方法相較於傳統界面電容－電壓量測最大的不同，在於傳統界面電容－電壓量測藉由直流偏壓配合微小交流偏壓，量測空間電荷區二側邊緣電荷的變化，藉由電荷的變化，得知空間載子的分布，亦即電荷變化與電壓變化為線性關係 ($dQ = CdV$)；DLCP 量測時，除了必須先利用 AS 法求得特徵熱發射頻率 (ν_0) 用以確定 DLCP 量測時在某一個特定的溫度、頻率下偵測之能量深度外，還要注意的是 DLCP 會使用較大的交流振幅，使得電荷的變化與電壓變化之間不再是線性關係 (如方程式 4)，以及為了將費米能階固定於能帶中，偏壓總合必須為定值 ($V = V_{dc} + V_{ac} = \text{constant}$)。

$$\frac{dQ}{dV} = C_0 + C_1 dV + C_2 (dV)^2 + \dots \quad (4)$$

因此，藉由 DLCP 量得之載子濃度可以寫成下式：

$$N_{DL} \equiv -\frac{C_0^3}{2q\epsilon A^2 C_1} = \frac{|\rho_e|}{q} = p + \int_{E_F^0}^{E_V + E_e} g(E, x) dE \quad (5)$$

上式中， N_{DL} 表示載子濃度； P 代表自由載子濃度； C_0 及 C_1 分別代表量測結果利用多項式展開後一、二階的結果，如圖 5 所示。

由 AS 可以知道，增加量測頻率與降低量測溫度，可以使得 $E_e = E_F - E_V$ 愈小，使得方程式 (5)

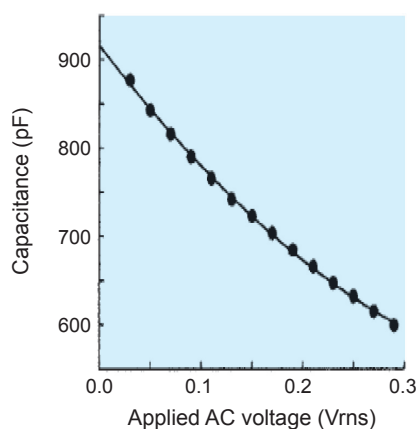


圖 5. DLCP 量測結果⁽⁸⁾。

表 1. 不同 CIGS 元件內自由載子、介面態位與塊材缺陷的比較⁽¹⁰⁾。

Sample	Free carriers (cm ⁻³)	Defect density (cm ⁻³)	Interface state response (relative units)
A	2.75×10^{15}	5.87×10^{14}	3.82×10^{15}
B	6.09×10^{15}	2.76×10^{15}	2.84×10^{14}
C	4.45×10^{14}	1.31×10^{16}	1.25×10^{16}
D	2.26×10^{13}	1.63×10^{16}	1.46×10^{16}
E	1.04×10^{14}	3.22×10^{16}	2.15×10^{16}
F	2.80×10^{15}	1.50×10^{15}	5.77×10^{15}

當中 N_{DL} 愈接近自由載子濃度 P ，如圖 6 所示。因此藉由 DLCP 的量測，可以輕易地將 CIGS 膜內自由載子與塊材缺陷以及元件介面態位分開，如表 1 所示⁽¹⁰⁾。

四、CIGS 導電二次相分析

從許多文獻當中不難發現，造成 CIGS 效率低落的主要原因之一即為導電的銅碲及碲碲二次相。目前在文獻當中，尚找不出一個有效鑑定二次相的方法，其原因在於銅碲相與碲碲相化學組成比相當複雜，且偏析於晶粒邊界 (grain boundary) 中的量不多，以致於即使利用高解析 X 光繞射光譜儀 (X-ray diffraction spectrometer) 以及拉曼光譜儀 (Raman spectrometer) 也相當難以判斷。表 2 與表 3 為筆者收集文獻上銅碲及碲碲二次相相關物理特性。由表 1 與 2 可知，不論銅碲相其化學組成皆

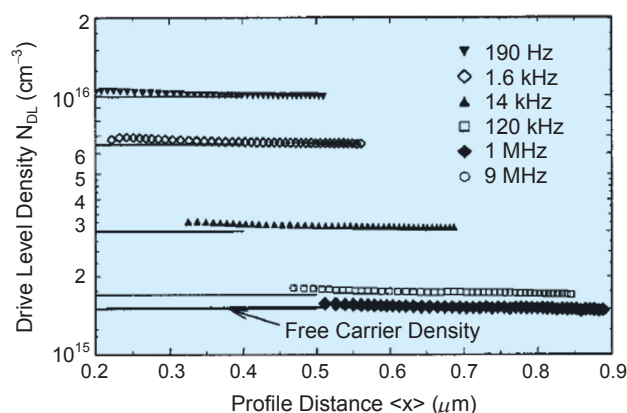


圖 6. 在不同頻率下載子濃度的空間分布情形⁽⁸⁾。

表 2. 銅硒二次相各項物理特性。

	Type	E_g (eV)		Structure	Resistivity (ohm-cm)	XRD
aCuSe2				low-p marcasite / high-p pyrite		
CuSe	p	Direction	2	hexagonal	$1.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$	JCPDS 34-171
			2.1–2.16			
Cu ₃ Se ₂			umangite 2.37	tetragonal		
			2.8			
Cu _{2-x} Se _x	p	Direction	1.2	cubic	$2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ($1.2 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$)	JCPDS 6-680
			2			
		2.2				
	Indirection	1.4				
Cu ₂ Se	p		1.2 (T = 298K)	tetragonal	$0.1 - 2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	
			1–1.1			
Cu ₇ Se ₄	p		1.24–1.47			

表 3. 銅硒二次相各項物理特性。

	Type	E_g (eV)		Structure	σ (conductivity) ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Ramam	XRD
InSe	n	E_g Indirect	1.305 (T = 5K)/1.29	hexagonal/ rhombohedral	$\sigma = 2.2 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (T = 298K)	172, 195, 222 cm^{-1}	(004)
			1.172 (T = 300K)				
In ₆ Se ₇	Fermi glass type/ n	E_g direct	1.42	monoclinic	$\sigma_{\text{max}} = 2.24 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (1/T = 0)		
			0.64 (T = 300K)				
			0.86				
		E_g Indirect	0.34 (T = 300K)				
α In ₂ Se ₃	n		1.35/1.36/1.22	hexagonal/ trigonal	$\sigma = 100 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$		
					$\rho = 10^3 - 10^5$	104, 27 cm^{-1}	(004) (006) JCPDS data (34-1279)
β In ₂ Se ₃	n		1.55	hexagonal/ trigonal	$\sigma = 1 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$		(006) (0015) JCPDS data (40-1407)
γ In ₂ Se ₃	n	負光導電率	1.9 (1.84)	hexagonal	$\rho = 9 \times 10^2 - 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$	86, 152 cm^{-1}	(300) (006)
δ In ₂ Se ₃	n		δ 相沒有光活性， 似乎是說 δ 的 E_g 根本無法量測	hexagonal			(102) (002)
κ In ₂ Se ₃	n		1.75	hexagonal	$\rho = 10^2 - 10^3$		(005) (00X) X: odd
In ₄ Se ₃	n	E_g direct	0.64/0.65		$\sigma = 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (T = 300K)		
				orthorhombic	$\rho = 0.2 - 0.027 \Omega \cdot \text{cm}$		(002) (330) ~450 °C

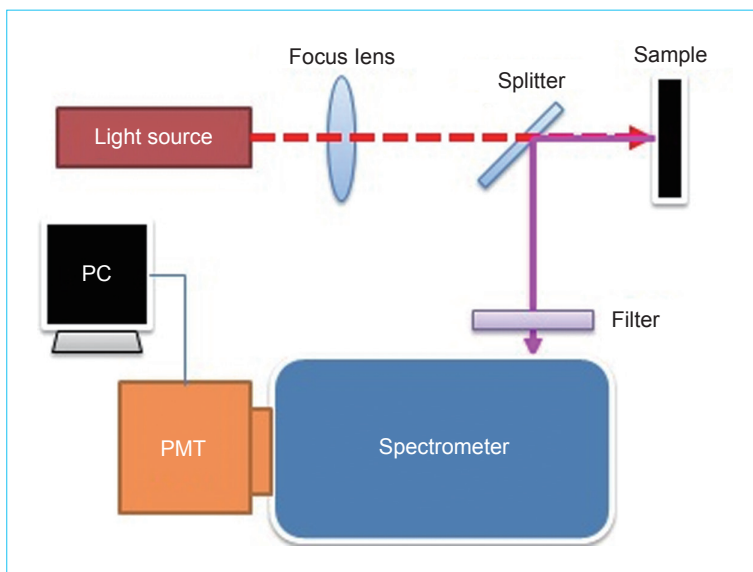


圖 7. 光致螢光量測系統示意圖。

為一相當導電之 p 型半導體；相對於銅硒相，銻硒相皆為一 n 型半導體，但是值得注意的是，銻硒相的電導率變化相當地大，可以說從導電到不導電都有，這一點也增加了分析上的困難。

目前也有相關文獻利用導電式原子力顯微鏡 (conductive atomic force microscopy, CAFM)，除了檢視薄膜的表面型貌之外，在外加偏壓為負一伏特的情形下，可以掃描出玻璃／鉬／CIGS 的試片，其結果能夠看出所有導電的相幾乎全部偏析於晶界邊緣，這種二次相的現象進而造成效率低落。

五、CIGS 光致螢光光譜缺陷分析

光致螢光 (photoluminescence, PL) 光譜分析是用來檢測半導體材料發光 (輻射) 的特性，也就是利用入射光來產生電子電洞對，藉由電子電洞對在材料中輻射復合的機制，來研究材料中雜質的種類及其能階狀態，同時也可以估算出其組成成分。由於 PL 系統是非接觸式以及非破壞式的量測方法，因此也非常適合業界生產流程中的檢測，圖 7 為 PL 測量系統的基本架構。

由於一般 CIGS 的能帶落在 1.08–1.65 eV 左右，因此光倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 的檢測範圍也大都在近紅外光區 (NIR)。圖中光源的部分除了常見的雷射外，其他也有應用氙燈或 LED

燈當作激發光源。由於 CIGS 本身的消光係數 (k) 會隨著不同的入射光波長而有所變化，利用橢圓儀可以測得 CIGS 的折射係數和消光係數⁽¹¹⁾，再根據消光係數與吸收係數 (α) 的關係式 $\alpha = 4\pi k/\lambda$ ，可以計算不同波長的光在介質中吸收的情況，最後入射光的穿透深度 (L) 就可利用 Beer-Lambert 公式算得

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot L) \quad (6)$$

相關數值如表 4 所示，由此可知不同波長的雷射可以檢測 CIGS 薄膜的深度範圍也就不同。

PL 光譜與能帶以及雜質能階是密切相關的，如圖 8 所示為 CuInSe₂ 的能帶圖⁽¹²⁾，而其能隙約為 1.03 eV，文獻中顯示 CuInSe₂ 輻射 PL 光譜，雖然材料成分相近，但是可以看得出來在雜質能階上的差異卻是非常明顯的，因此藉由 PL 光譜可以了解

表 4. 常用的雷射光源及其在 CIGS 的穿透深度。

Laser	Diode Laser	Argon	He-Cd	He-Cd
λ (nm)	635	514	442	325
E_g (eV)	1.95	2.41	2.81	3.81
k	0.43	0.62	1.00	1.02
α (cm ⁻¹)	8.5e4	1.5e5	2.8e5	3.9e5
L (nm)	118	66	35	25

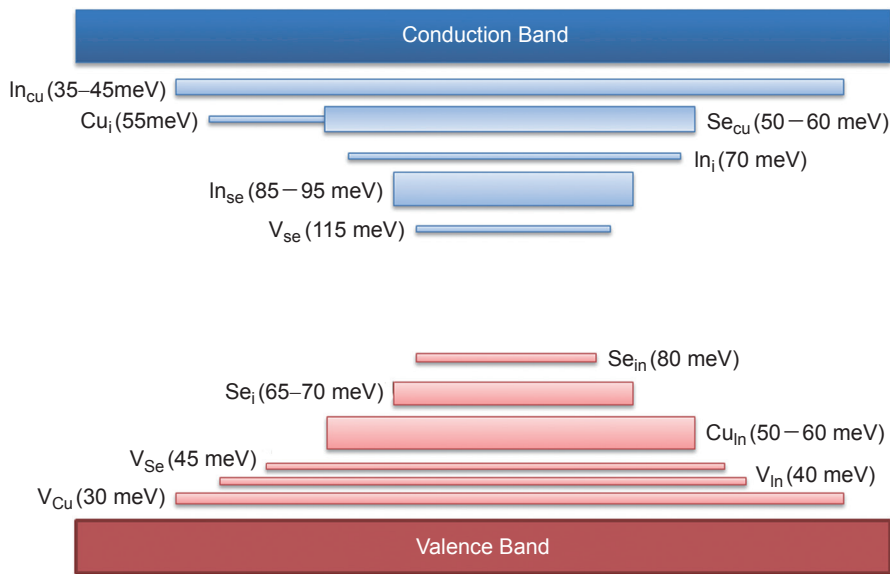


圖 8. CuInSe₂ 的能帶圖。

材料雜質的種類和分布。圖 9 則為效率 7% 左右的 CIGS 晶片 PL 頻譜，由圖可以發現頻譜在低能態有肩部的訊號，也就具有較深的雜質分布，這部分容易形成電子電洞對的復合中心，若是可以在製程上減少這些雜質，發光效率也將會跟著改善。

六、CIGS 時間解析光致螢光分析少數載子生命週期

時間解析光致螢光 (time-resolved photoluminescence, TRPL) 分析技術主要應用於量測 CIGS 膜內少數載子的生命週期，對於太陽能電池而言，少數載子的生命週期也就代表電池效率高低的一個重要參數。目前國外諸如德國著名研究機構 ZSW 以及 NREL 等在近幾年均全力發展此一量測技術，以探得 CIGS 少數載子的生命週期，了解其對太陽能電池元件的影響。再加上此技術也屬於非破壞性量測，且量測時不限於試片僅鍍製 CIGS/Mo/SLG 或是已製備成 CIGS 元件，因此也是用以當作線上檢測 CIGS 薄膜品質的絕佳技術。以 CIGS 而言，當少數載子的生命週期愈長，電池效率也就愈大⁽¹³⁾。因此藉由分析螢光的生命週期，可了解 CIGS 材料成分純度、雜質所造成的復合中心情況以及其元件效率的資訊。圖 10 為測量系統的架構圖，因為 CIGS 的螢光生命週期大約在幾個

奈秒到數百個奈秒，因此量測原理是利用超快雷射的短脈衝激發樣品，產生極少量的螢光光子，藉由 TCSPC (time-correlated single photon counting) 介面多通道處理技術來計算脈衝光源和螢光光子間的延遲時間，累積足夠的光子訊號，就可以描繪出螢光的衰減曲線，最後再利用衰減曲線計算出少數載子的生命週期。

由於 CIGS 生命週期是幾個奈秒到數百個奈秒，因此在脈衝雷射的重複頻率 (repetition rate) 選擇上，至少要低於 2 MHz，才可以滿足足夠的衰減時間，若是頻率太高，將會使螢光衰減未完全，而造成測量上的錯誤。此外，在雷射功率上也須考

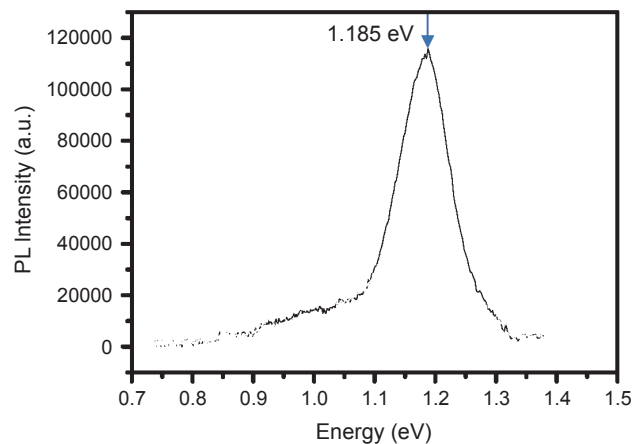


圖 9. CIGS 的 PL 頻譜。

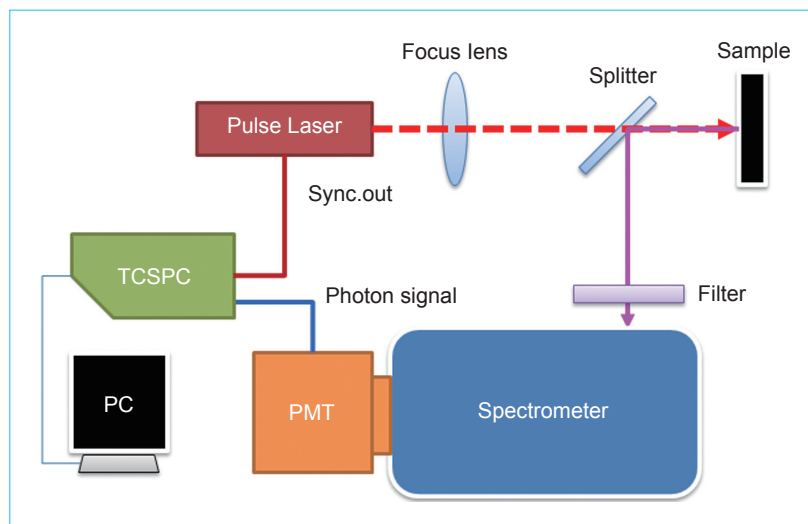


圖 10. 時間解析光致螢光測量系統。

慮符合 1 Sun 的功率密度。圖 11 則是不同效率的時間解析光致螢光衰減曲線，可以明顯地看出來生命週期愈長，電子電洞對再復合的機率較低，太陽能電池的效率就愈高。

七、結論

文中我們針對 CIGS 薄膜太陽能電池的量測，分別介紹不同的光電特性檢測。首先，電容－電壓特性量測在傳統的檢測方面，可以分析 CIGS 薄膜的載子濃度以及空間電荷寬度；其次，導納頻譜則是藉由提供外加不同頻率的微小電容量變化，來對介面態位做定量分析；而激勵電容剖面 (DLCP) 法則是一個可以同時避開介面態位與塊材缺陷干擾的尖端電容－電壓量測方法。此外，對於 CIGS 中所產生的導電二次相做相關檢測的整理，由於二次相的存在較為複雜，一般 X 光繞射和拉曼光譜儀都不容易找到，而導電式原子力顯微鏡則提供了導電二次相檢測的不錯選擇。

最後，則是利用材料的光致螢光特性來分析 CIGS 材料的缺陷以及少數載子的生命週期，藉由缺陷分析可以得知材料的純度和品質，而少數載子的生命週期則是太陽能電池效率的重要指標。光致螢光以非接觸式和非破壞式的檢測，將可以提供給業界作為生產線上品質控管的重要依據。

誌謝

在此特別感謝國科會對於本計畫之相關經費的支持 (計畫編號：NSC 98-3114-E-007-002-CC2、NSC 100-3113-E-007-009-CC2)。

參考文獻

1. D. L. Staebler and C. R. Wronski, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 292 (1977).
2. http://www.zsw-bw.de/fileadmin/ZSW_files/Infoportal/Presseinformationen/docs/pi11-2010-e_ZSW-Weltrekord-DS-CIGS.pdf
3. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., Taiwan: John Wiley & Son, Chap. 2 (1983).

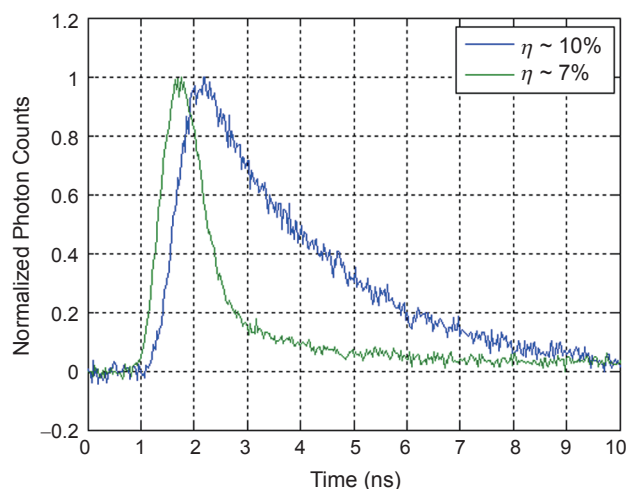


圖 11. 時間解析光致螢光衰減曲線，不同效率的比較。

4. S. B. Zhang, Su-Huai Wei, and Alex Zunger, *Phys. Review B*, **57**, 9642 (1998).
5. S. Niki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 1630 (1999).
6. I. Repins, *NREL Annual Report* (2009).
7. J. T. Heath, J. D. Cohen, and W. N. Shafarman, *Thin Solid Films*, **431**, 426 (2003).
8. J. T. Heath and J. D. Cohen, *J. Appl. Phys.*, **95**, 1000 (2004).
9. T. Walter, R. Herberholz, C. Müller, and H. W. Schock, *J. Appl. Phys.*, **80**, 4411 (1996).
10. I. Repins, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **14**, 25 (2006).
11. M. I. Alonso *et al.*, *Appl. Phys. A*, **74**, 659 (2002).
12. F. A. Abou-Elfotouh *et al.*, *Solar Cells*, **30**, 151 (1991).
13. S. Shirakata and T. Nakada, *Thin Solid Films*, **515**, 6151 (2007).



施文傑先生為國立清華大學電子工程博士，現任國立清華大學材料科學工程學系博士後研究員。

Wen-Chieh Shih received his Ph.D. in electronic engineering from National Tsing Hua University. He is currently a postdoctoral research associate in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.



吳彥輝先生為國立中山大學光電工程博士，現任國立清華大學材料科學工程學系博士後研究員。

Yan-Huei Wu received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently a postdoctoral research associate in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.