

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

奈米銀結構於薄膜太陽電池應用光電特性研究

**Study of optical and electrical properties of silver nanostructure for  
thin-film solar cell**

計畫編號：1012001INER021

受委託機關(構)：逢甲大學

計畫主持人：羅仕守 博士

聯絡電話：04-24517250 轉 5041

E-mail address：sslo@fcu.edu.tw

核研所聯絡人員：詹德均 博士

報告日期： 101 年 12 月 1 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
一、緣起.....	3
二、目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	6
一、文獻蒐整.....	6
二、理論依據：.....	6
(一)光捕捉技術:.....	6
(二)表面電漿效應：.....	7
三、奈米銀結構開發製作.....	8
(一)、電化學法:.....	9
(二)、薄膜熱處理法.....	9
參、主要發現與結論.....	10
一、主要發現:.....	10
(一)、奈米銀結構外貌.....	10
(a)電化學法.....	10
(b)薄膜熱處理法.....	12
(二)、物理特性分析.....	13
(三)、奈米銀結構含量分析.....	14
(四)、穿透光譜.....	14
(五)、反射霧度.....	17
(六)、電性分析.....	18
二、結論.....	21
肆、參考文獻.....	22

## 中文摘要:

本研究藉由電化學與薄膜熱處理方法製備不同形貌奈米銀結構，以結構、光學與電學等特性評估所製得的奈米銀結構是否適用於薄膜太陽電池背反射層。研究發現，在奈米銀結構上方覆蓋不同厚度 AZO 薄膜(100nm 與 200 nm)，以薄膜熱處理方法所製得的奈米銀結構在穿透光譜上呈現出長波長(>700 nm)處穿透值較 AZO 薄膜製鍍於 ITO 基板上之值要大，而採用電化學法製得的奈米銀結構其穿透光譜隨電化學處理時間變長而降低，但其平均穿透率仍可達 60%以上，經由量測反射霧度顯示，將 AZO 薄膜製鍍於以電化學法經 10 秒鐘製得的奈米銀結構上方，在可見光波段其反射霧度可達 50%，顯示具有良好的光捕捉效果；

以電性量測分析顯示，在 ITO 基板上方製備奈米銀結構可降低 AZO 薄膜覆蓋在 ITO 基板上方的電阻值，並不因奈米銀結構提升 ITO 薄膜的電阻，從本計畫的研究結果得知，不同奈米銀結構對薄膜太陽電池在背反射層的確切影響應待整體太陽電池元件製作後量測後，才能更進一步的評估。

**Abstract:**

In this study, the silver nanostructures were fabricated by electrical-chemical and annealing process. To evaluate the performance of silver nanostructures with various morphologies in a thin-film solar cell was performed. The transmittance of AZO thin-film deposited on various silver nanostructures were investigated. When the silver nanostructure was fabricated by annealing process, the transmittance value of the as-fabricated device is higher than that of the bare ITO at wavelength exceeds 700 nm. In addition, when the deposition time of chemical deposition process increased, the transmittance value of the device is lower. The reflective haze of the device is larger than that of the AZO deposited on ITO substrate. It is suitable to use as a light-trapping device for solar cell.

When the as-fabricated device was performed I-V measurement, the resistance of the device is larger than that of the AZO thin-film deposited on ITO substrate. Therefore, we believe the best method to evaluate the performance of the silver nanostructure for a thin-film solar cell should be processed under a solar cell device.

## 壹、計畫緣起與目的

為執行本研究計畫，發展關鍵性技術，並使相關參與人員順利瞭解本計畫目的，有關本計畫研究緣起與目的分述如后：

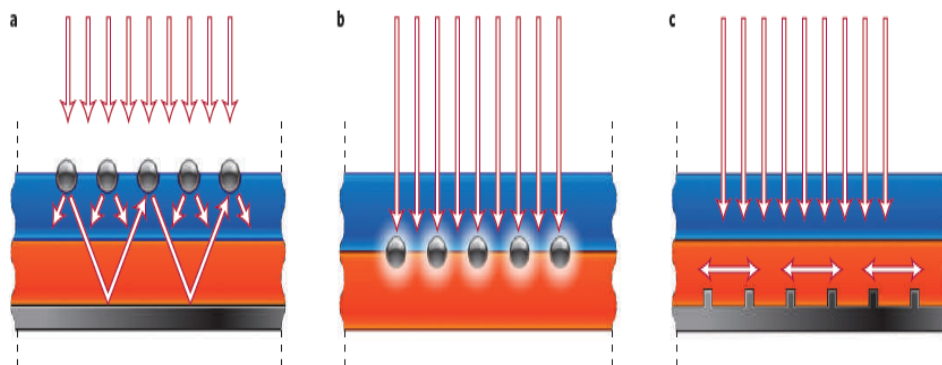
### 一、緣起:

由於石油等能源日益枯竭，在永續與環保的考量下，太陽能為一個值得期待與發展的方向，但由於目前較高效率矽晶圓之效率有限，且價格昂貴，致使目前太陽能發電的每度電成本仍高於火力、核能等發電成本，因此太陽能電池的發展前景雖看好，但仍然受限於成本價格。為降低發電成本，工程技術上的發展上目前則朝向更低材料需求的薄膜太陽電池技術發展，以有效降低太陽電池發電成本。

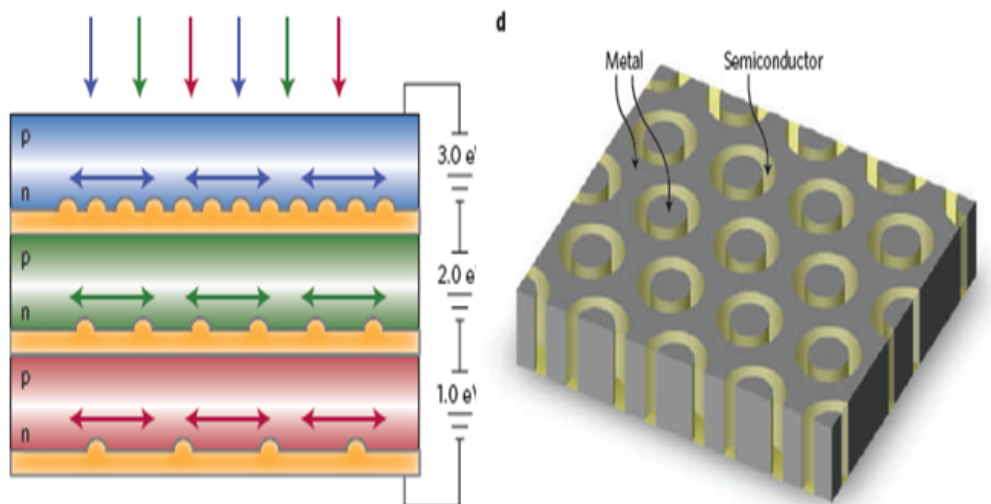
由於薄膜太陽電池，對較低光學吸收係數材料而言，始終無法達到有效的光吸收與太陽能轉換，有鑑於此，科學家便在太陽電池元件上想出了一種所謂光補捉(Light-trapping)結構[1-4]，利用光的散射特性使進入薄膜太陽電池但未被吸收的光，仍能有效的侷限於太陽電池內部，藉由提升在在電池內部的光程差，有效改善光轉換效率，因此工程上分別出現各種光侷限設計結構，如：Claus 等人提出的次微米光柵於背反射面增加光侷限效果，得到將進五倍之值[5]，但由於微奈米光柵製作不易，所以大面積生產有其困難。而後工程與科學界又出現各種新的替代方案，都可使薄膜太陽電池效率有效提升，這些縐摺結構一般均為介電材料，當轉換成貴重金屬等材料，製作之結構則有著新的風貌。

近年來隨著奈米科技的研究，奈米結構介穩態材料(Meta-material)在光學上展現了表面電漿子(surface plasmon)侷域性

與光學特殊性，所謂表面電漿效應係金屬與介電物質表面波所形成的電磁場特殊侷域化的波。研究已發現隨著奈米銀結構的不一樣 [6]，這個表面電漿共振的波長將隨之改變。對太陽電池而言，太陽光譜含蓋不同波長，因此這個不同結構的奈米銀經由特殊的設計與製造具有應用太陽電池的機會中，藉以強化太陽電池吸收與電極的侷域化使其效率能有所改變，如 2008 年,Dr. Carsten 發表有關以銀的奈米結構奈米結構可以使非晶矽薄膜太陽電池的吸收所增強 [7]，2010 年則有 Quyang et. al. 利用不規則的奈米銀使用多晶矽太陽電池的效率使短路電流藉由不規則銀增加 29% [8]。2009 年 F. J. Beck et al 則透過放熱的方式製作奈米銀的結構，使太陽電池的光捕捉效應得以變可調的 [9]，在 2010 年 Harry 等人在 Nature Materials 期刊上發表一篇 “Plasmonic for improved photovoltaic devices” 提出一些對於 Plasmon 這個物理現象前瞻的想法 [10]，如圖一~圖二，雖然這些研究在小尺寸或特殊製程上都呈現了很好的特性，但在大尺寸太陽電池的製池開發上與未來品產商品化，則是另一番挑戰。



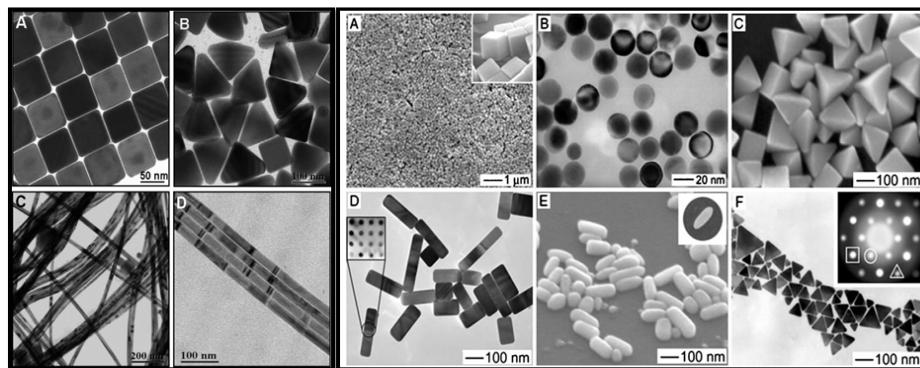
圖一、表面電漿子太陽電池概念 [10]



圖二、表面電漿子太陽電池概念[10]

二、目的：

為擴大應用表面電漿子結構於太陽電池上，使大尺寸太陽電池能藉由表面電漿子效應，有效改善太陽電池轉換效率，鑑於眾多奈米銀結構已被開發，如圖三，因此本研究計畫以克服既有奈米銀結構製程為優先考量，期待藉由計畫得執行，得以建立異於國際採用的通用製程，提升自身能量，應用於太陽電池元件設計。因此本計畫將同時評估所開發的奈米銀結構製作於薄膜太陽電池背反射層上，進一步以光學與電學角度，分析奈米銀結構的應用可行性，期望能將此研究結果廣範應用於各種薄膜太陽電池元件上。



圖三、不同結構奈米銀

## 貳、研究方法與過程

執行本研究計畫方法主要以採取實作驗證與數據歸納，在研究過程中將包含一般研究上所用的學術文獻收集、分析、實驗規劃、研究數據歸納與結案報告撰寫等。

### 一、文獻蒐整

鑑於本研究計畫題材新穎且國際競爭者眾，因此執行本研究計畫文獻蒐整格外顯得重要，借由文獻資料得以關注競爭者現在進度，並適時修正計畫進度與解決計畫停瓶頸之參考，主要分三個方向進行：

- (一)、有關太陽電池最新光捕捉技術[11-12]
- (二)、有關奈米銀結構開發與製作[13-14]
- (三)、有關奈米銀結構應用[15-16]
- (四)、有關表面電漿子效應對光電材料效應影響[17-18]。
- (五)、表面電漿子應用於太陽電池相關研究[19-20]

### 二、理論依據：

#### (一)、光捕捉技術：

所謂光捕捉技術『light-trapping』，即為靠光在介面的反射，將進入薄膜太陽電池未反射的光，使其在太陽電池的背反射層，因為表面的縐摺產生光的散射，使散射的光在反回太陽電池表面因為角度超過臨界角，無法跑出太陽電池外，造成未被吸收的光，多次的往返電池內部，有效提升光程差，使光被有效吸收，提升太陽電池的轉換效率。一般均在薄膜太陽電池的背反射層表面中，製作特殊的光學結構或粗糙面，達到光捕捉效果。

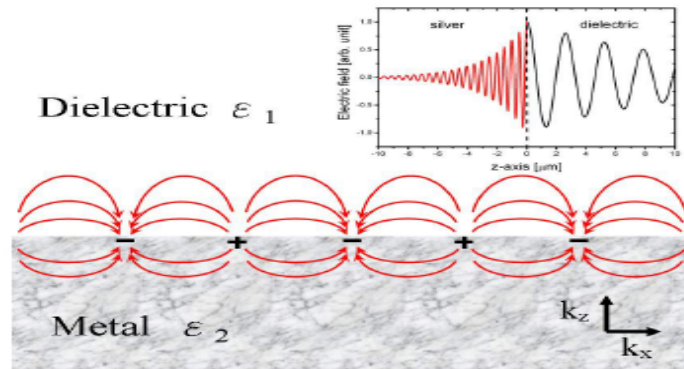


## (二)、表面電漿效應：

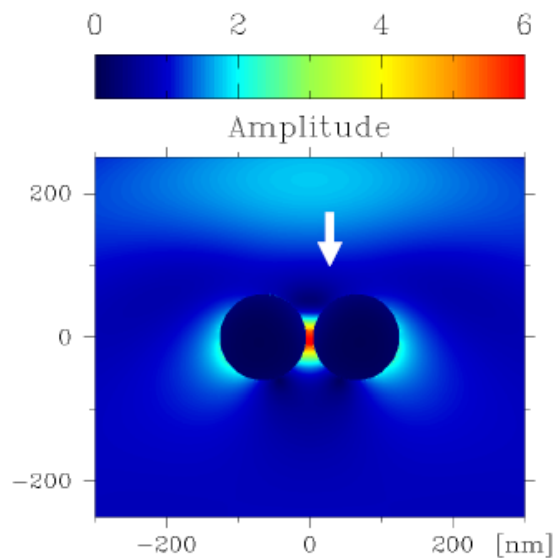
金屬與介質界面的消散波(Evanescence wave)模態，即為表面電漿子，如圖三。這個消散波與自由空間的波傳遞相比較，因表面電漿子擁有較高的能階密度，故發光半導體中載子和表面電漿子模態耦合之效率可以遠高於載子本身的自發性放光效率。依其特性，表面電漿子主要可區分為兩大類：侷域表面電漿子(localized surface plasmon, 簡稱 LSP)與表面電漿電磁耦合子(surface plasma polariton, 簡稱 SPP)及。LSP 則存在於金屬和介電質的奈米結構界面中，其共振頻率受奈米結構之影響且能量侷限於某一特定區域，和光子可直接進行能量轉換。SPP 則主要存在於金屬和介電質的平板界面中，其能量會隨界面傳播；因其動量和光子的不匹配，當 SPP 和光子進行能量轉換時，需額外的動量補償，此動量補償可由界面的粗糙結構或光柵提供。利用表面電漿子提升半導體發光效率機制如下：在發光半導體中的載子可在半導體內進行放光性結合(radiative recombination)或非放光性結合(non-radiative recombination)。同時，部分能量可耦合至表面電漿子模態。表面電漿子可藉由表面粗糙或光柵結構將部分能量以光子的形態散射出來，其餘的部分則以熱能的形態損耗在金屬中。若表面電漿子放光和非放光的比例大於載子在半導體中放光和非放光的比例，則可提升整體的發光效率；反之，發光效率將降低。

因此為了達到金屬奈米結構間的表面電漿子侷限效應，可以透過調整不同金屬奈米尺寸與形狀達到定波長的表面電漿效應，如圖四。借以調整太陽電池內部的電子與電洞的流動與光

子間的作用，而改變轉換效率。



圖三、電荷密度在金屬表面上發生集體式電偶極振盪電場分量的示意圖。



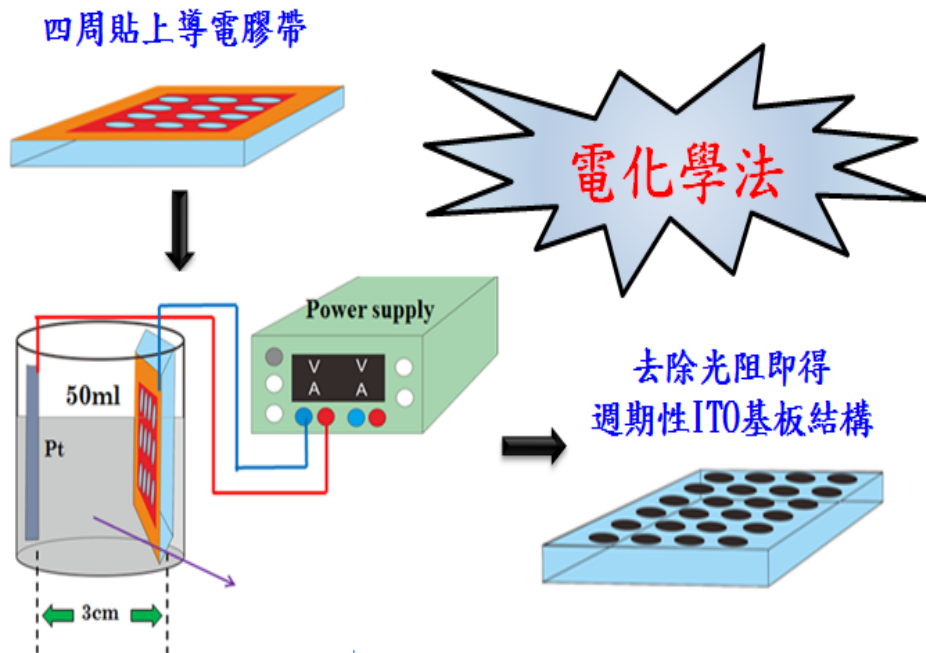
圖四、相同大小奈米銀柱平行光照產生的電場侷域化。

### 三、奈米銀結構開發製作：

為開發新型奈米銀結構應用於薄膜太陽電池，本研究計畫中我們以兩種製程對奈米銀結構進行開發，比較兩種結構的優劣點，做為後續研究的主要對象：

(一)、電化學法製備奈米銀結構：

由於一般奈米結構的製程可分為上到下(Top-down)與(Bottom-up)兩種，透過電化學法可得到奈米銀的結構，透過架設電化學設備，如圖五，將銀源、中間劑與去離子水調配出適量的濃度，施加電壓與電流，隨著不同時間，可以獲得不同結構的奈米銀結構。此方法製備之奈米銀結構具有簡便、迅速、大尺吋等特性，並可有效調控其獨特外型之優點。



圖五、電化學法製備奈米銀製程示意圖

(二)、薄膜熱處理製程製備奈米銀結構：鑑於奈米尺度下的物理特性改變，本方法係將不同厚度銀薄膜鍍製於基板上方，在真空腔體中，以不同高溫，使銀薄膜熔化，再經由降溫過程，使融熔的銀得以借由凝固，形成奈米銀結構，其缺點為製程參數不易控制，且不易於特定區域中形成特定結構。。

### 參、主要發現與結論

為比較不同製程製備奈米銀結構對太陽電池效率的影響，本研究針對不同製程所得奈米銀結構外形與應用特性進行評估分析，其結果為：

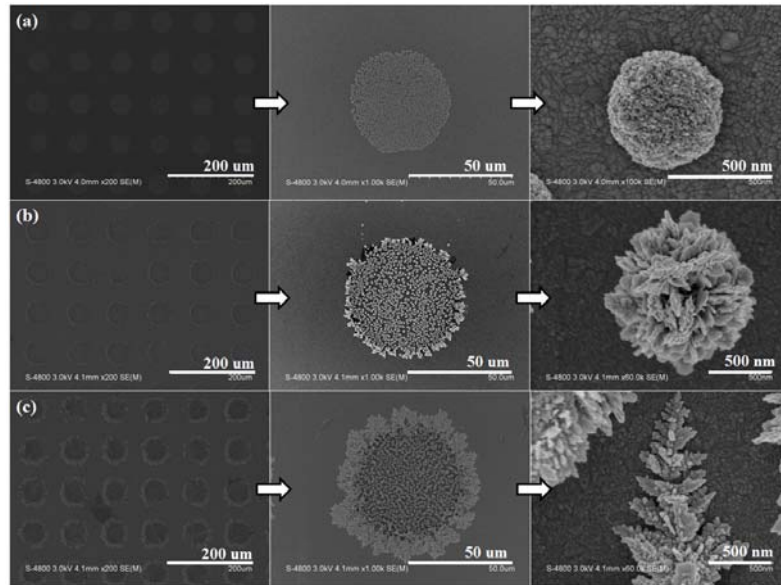
#### 一、主要發現：

有關執行本研究計畫的主要發現分述如后：

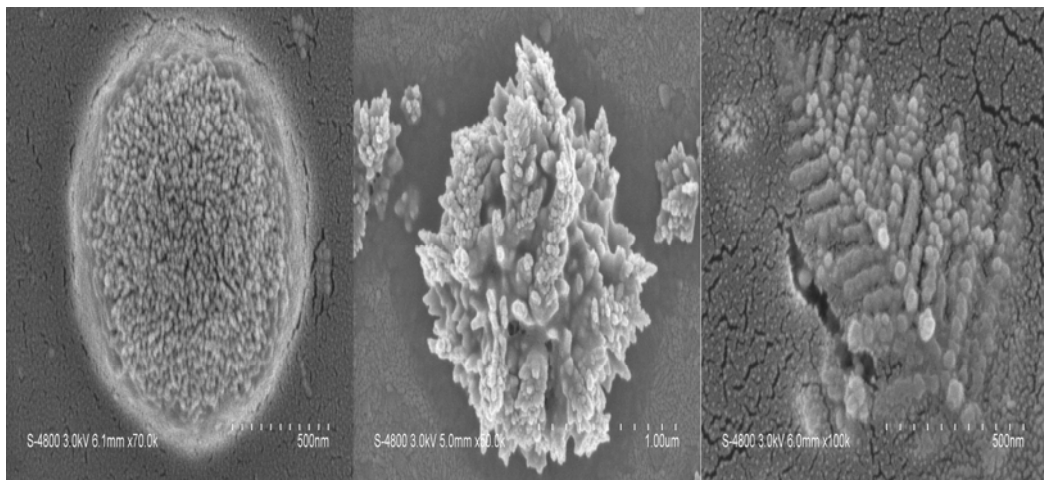
##### (一)、奈米銀結構外貌：

##### (a)、電化學法

電化學法製備奈米銀係依據凝聚擴散受限模型(Diffusion Limited Aggregation DLA)模型[19]在特殊條件下，以特定參數與圖樣的設計，研究發現經過 5 秒中的電化學反應，便可在 ITO 導電基板上方製得半球狀(semi-sphere)奈米銀結構、反應 10 秒鐘，奈米銀結構轉變為灌木(bush)狀；反應 20 秒鐘，可於 ITO 基板上方形成致密的奈米銀樹，由結果顯示，奈米銀外形依反應時間改變而變化，並具備快速製備的特性。如圖三、圖四。



圖三、電化學法經不同時間製備的奈米銀結構(5 秒球狀,10 秒灌木狀,20 秒樹枝狀)[20]

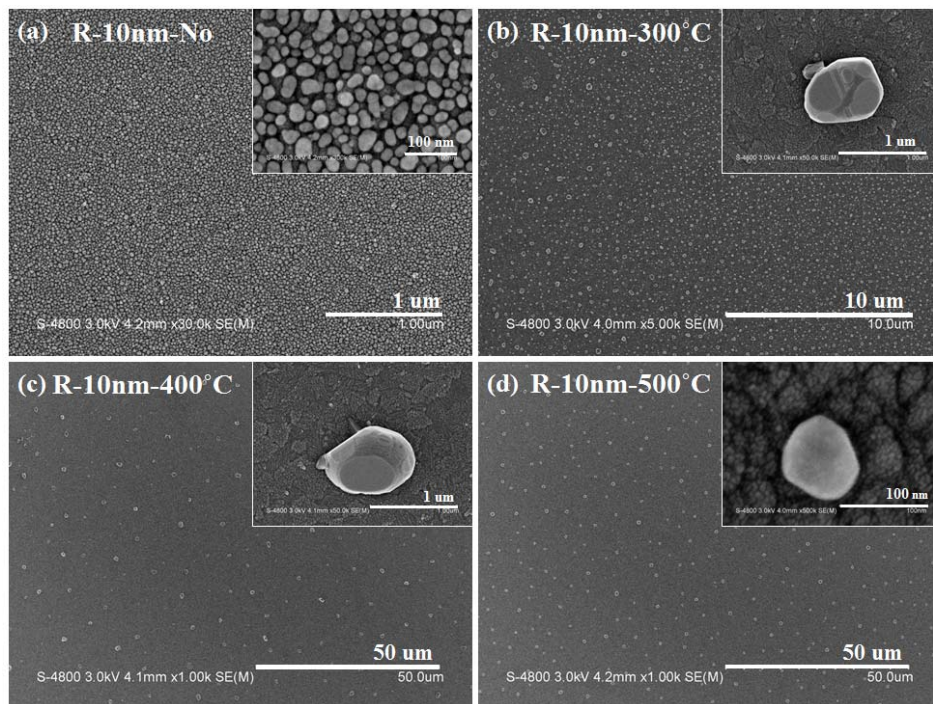


圖四、電化學法經不同時間製備的奈米銀結構(5 秒球狀,10 秒灌木狀,20 秒樹枝狀)[20]

由 SEM 圖知，若在圖樣中製備奈米銀結構，可在圖樣外圍形成具有樹枝狀的結構，並可將奈米銀均勻製備於圖案中，因此本團隊所開發之奈米銀具有可設計性，並具有大尺吋製作與重複性。

(b)、薄膜熱處理法

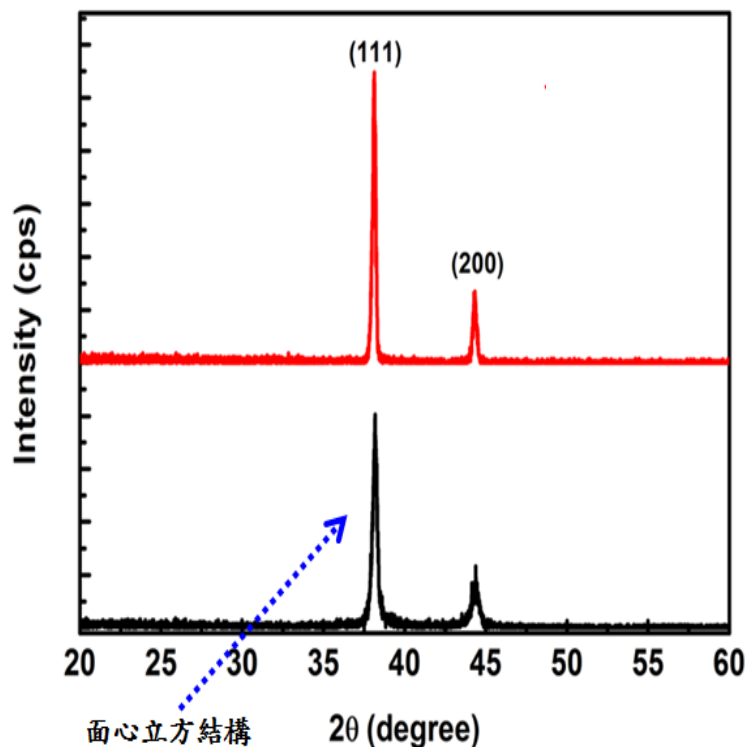
熱處理製備奈米銀係於 ITO 基板上蒸鍍不同厚度奈米銀 (10nm 與 50nm)，並以 350 °C 的高溫，在低氧氣條件下，加熱 1 小時，冷卻後，可於 ITO 基板上方自然形成不同間距與顆粒狀的奈米銀結構，如圖五所示。由於熔融態的奈米銀無法精確控制在 ITO 導電基板上方位置，因此每次所製得的奈米銀結構無法精確控制與不具重複性，且銀薄膜製鍍需要真空設備，此為其缺點。



圖五、厚度 10 nm 的銀薄膜經不同溫度處理(未加熱, 300, 400, 500)SEM 圖[20]

(二)、物理特性分析：

為了進一步確認以電化學法與熱處理法產生的奈米結構特性，針對產生的樣品進行物性分析。圖六為不同奈米銀結構的 X 光繞射圖。由圖中顯示在 38 度角以及 44 度角有兩明顯峰值訊號，透過 Joint Committee on powder Diffraction Standards (JCPDS) No.04-0783 比對峰值，得知  $38^\circ$  角以及  $44^\circ$  角分別代表銀的(111)方向訊號及(200)方向訊號，其結構為面心立方結構(Face-centered Cubic, FCC)，由此不僅證明奈米銀的結構的晶格，同時對於以表面電漿子太陽電池設計的概念，以奈米銀結構的基本要件也已達成。



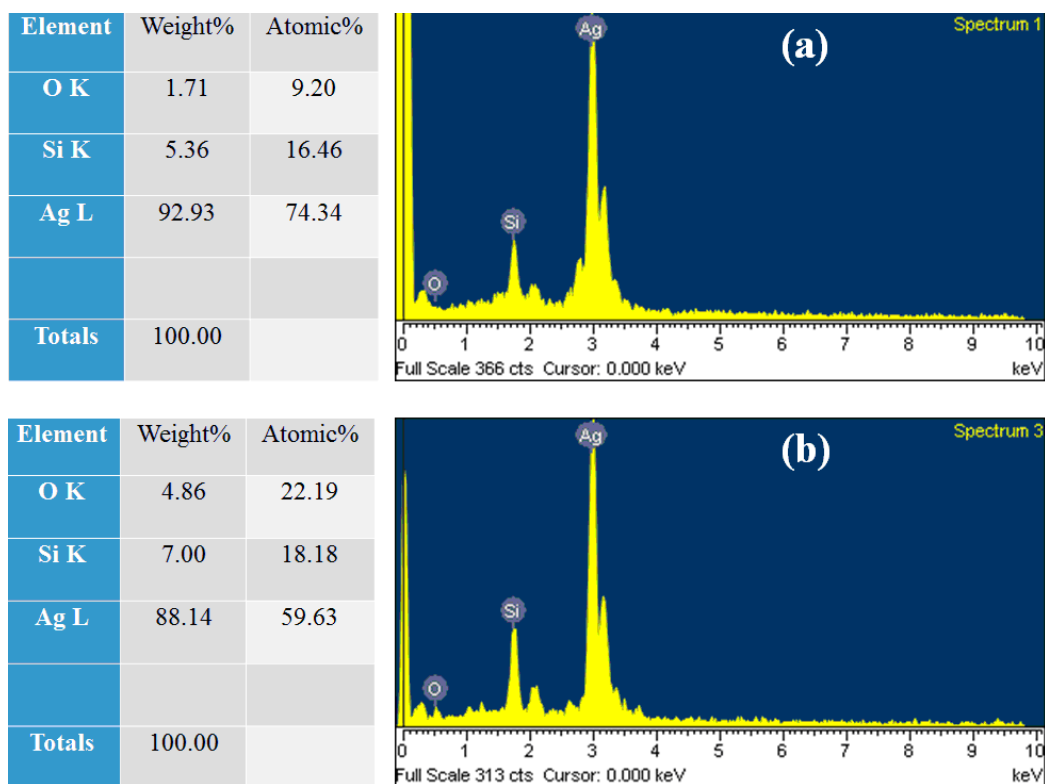
圖六、不同奈米銀結構 XRD 圖,電化學法(紅);薄膜熱處理法

### (三)、奈米銀結構含量分析

以 XRD 雖然得到其結晶的繞射圖案，顯示具有銀的結晶，但為進一步確認銀結構中的含量，我們以 EDS 能量放射光譜進行物質鑑定，圖七為不同製程下的 EDS 能量散射光譜圖，顯示結構含量中確為銀，提供以銀金屬的表面電漿的效應。

### (四)、穿透光譜:

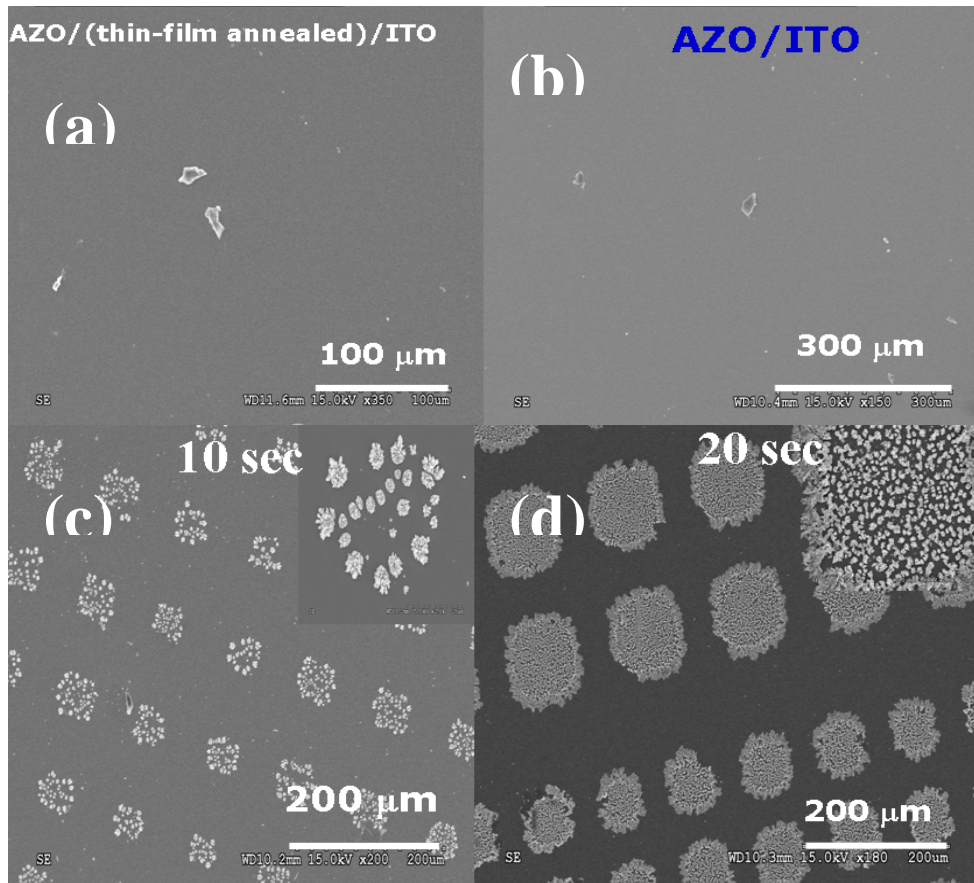
為評估奈米銀結構在太陽電池背反射層上的應用，將不同製程獲得的奈米銀結構搭配週期性特殊圖樣設計，控制圖樣的間距，大面積均勻的將奈米銀結構製備於 ITO 基板上方，再於基板上方以 sputter 製鍍濃度 2%，厚度分別為 100 nm 與 200 nm 的 AZO 薄膜，形成一個 AZO/(Ag nanostructure)/ITO 元件結構，以電子顯微鏡觀察，圖八為元件的 SEM 俯視圖。



圖七、不同奈米銀結構 EDS 圖. (a)電化學法;(b)薄膜熱處理法

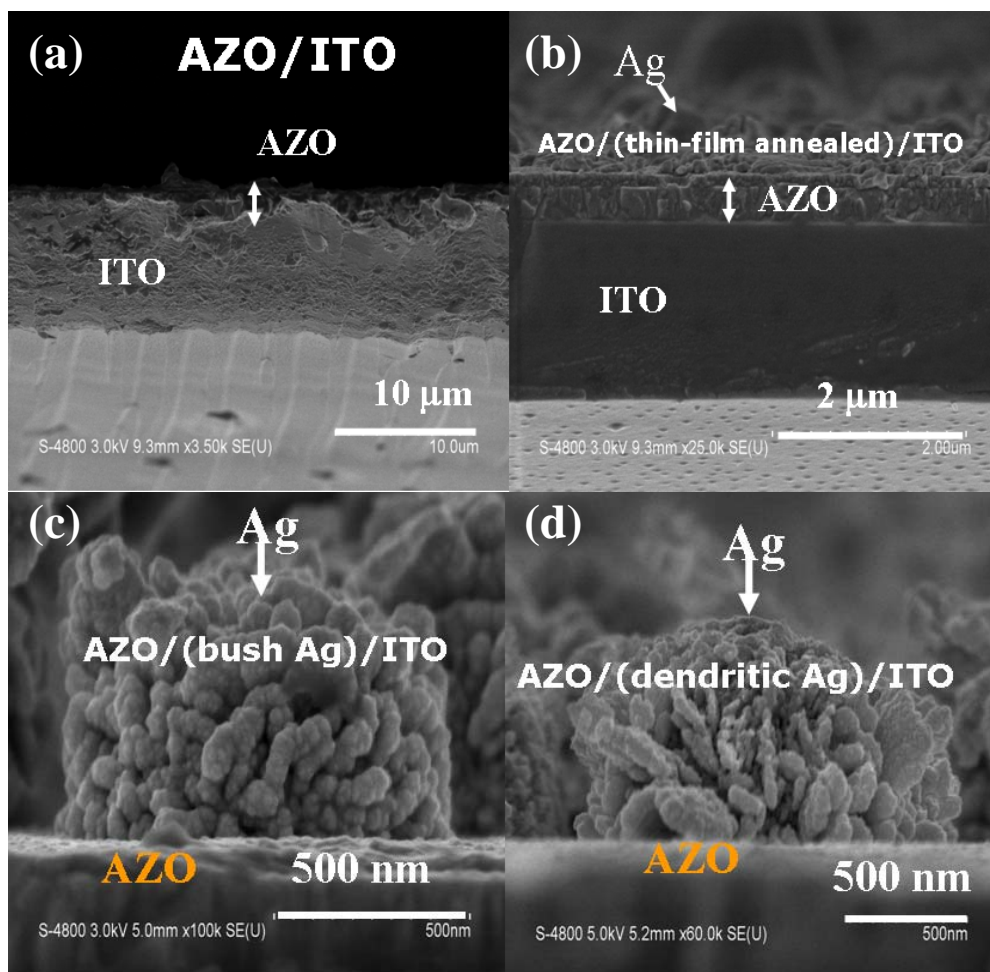


由圖八(c)與六(d)知，經過 sputter 機台以高溫 200 °C 在腔體中製鍍 AZO 薄膜，並不因為奈米銀的低熔點特性，改變銀的形貌，同時以電化學法製備的的奈米銀形貌具有大面積與均勻的特性，可見這個開發所得製程可以試用於大尺吋。由圖八(a)與八(b)得知，由於銀薄膜厚度為 10nm 與 50nm，因此經高溫熱處理放熱冷卻之後所得到的奈米銀結構，在 AZO 薄膜下方並不明顯，可以考慮增加銀的厚度或改變熱處理溫度達到，同時這個製程也具有大面積製作的特性。



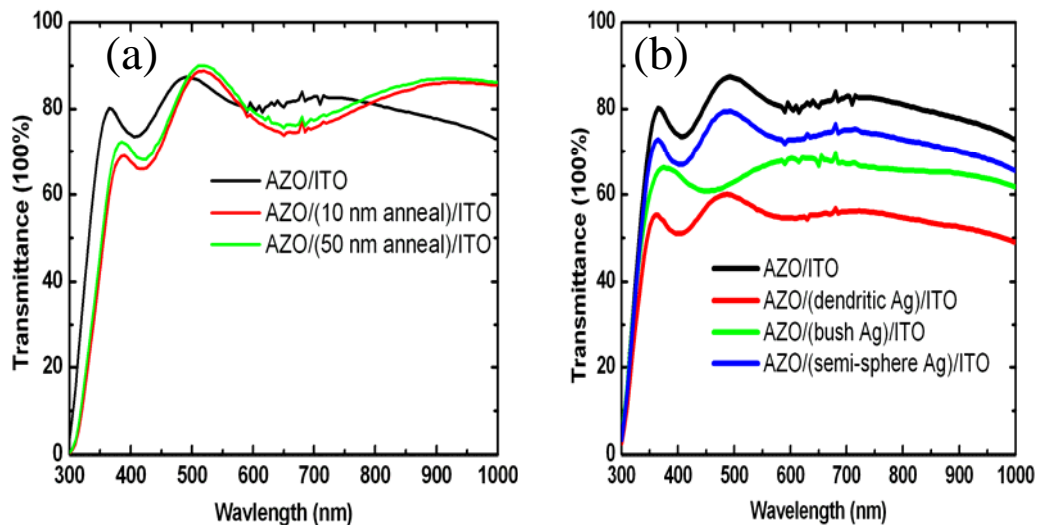
圖八、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀結構 SEM 俯視圖(a)為 AZO 覆蓋於以熱處理法製備的奈米銀基板(b)AZO 覆蓋於 ITO 基版上方 (c)AZO 覆蓋於灌木狀奈米銀結構上方 (d)AZO 薄膜覆蓋於樹狀結構奈米銀基板

圖九為以 AZO 薄膜覆蓋於奈米銀結構的側示圖，由圖中可以明顯得知，以電化學法製備的奈米銀結構其表面確實具有粗糙的皺摺結構，且奈米銀之間距非常小，具有產生表面電漿子侷域的特性。



圖九、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀結構 SEM 側視圖(a)為 AZO 覆蓋於以熱處理法製備的奈米銀基板(b)AZO 覆蓋於 ITO 基板上方(c)AZO 覆蓋於灌木狀奈米銀結構上方 (d)AZO 覆概於樹狀結構奈米銀基板

將不同製程制作的奈米銀樣品，以 UV-VIS 光譜儀量測其穿透光譜，可以得知元件對可見光波段的穿透性質。圖十(a)可知，以熱處理製備的奈米銀結構，其穿透光譜與 AZO/ITO 的值差不多，此乃因為以熱處理法製備的奈米銀結構，由於銀薄膜較薄，故其銀顆粒尺寸較小，穿透光譜中可看到由於薄膜的干涉效應，顯現出穿透值隨波長的變化。圖十(b)所示為 AZO 覆蓋於電化學法製備的奈米銀結構，當電化學製備的時間增加，其穿透率降低，此乃由於隨著電化學反應，使奈米銀結構更緻密的堆疊於 ITO 基板上方，造成其穿透率降低，而其可見光的平均穿透率仍可達 50%，為一半穿透的結構。

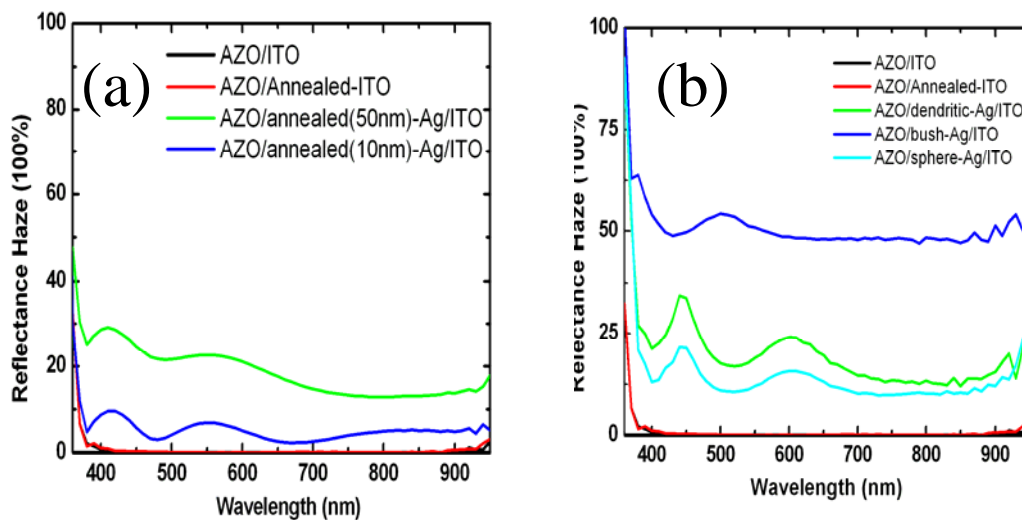


圖十、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀結構穿透光譜圖 (a)為 AZO 薄膜覆蓋於以熱處理法製備的奈米銀基板；(b)AZO 薄膜覆蓋於以電化學法製備的奈米銀基板

#### (五)、反射霧度:

對於低吸收係數材質所製備的薄膜太陽電池，無法被元件吸收層

厚度所吸收的光，常以光捕捉結構設計，增加電池的轉換效率，有關光捕捉結構的評量，工程上以霧度做為標準，而霧度又可分為穿透霧度與反射霧度，對太陽電池中背反射層的評估，則採用反射霧度為考量，以結構的反射散射值與反射的比值定為反射霧度，由圖十一所示，將 AZO 薄膜鍍製於奈米銀結構基板上方，在 ITO 基板上方的 AZO 薄膜其霧度低於 5%，此乃由於膜層平整，而以電化學法與薄膜熱處理法所製備的奈米銀其反射霧度均可達 25%，其中又以電化學法 10 秒鐘製程製備的灌木狀奈米銀結構效果最為明顯，在波長 350~900nm，其平均反射霧度可獲得有效提升，到達 50%。如此具大的反射霧度值，最主要係由於奈米銀強烈的表面散射效應所造成。

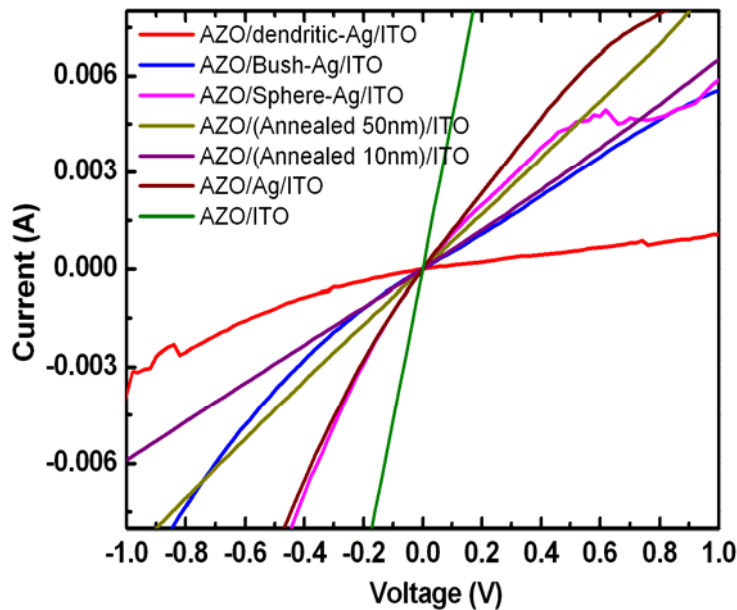


圖十一、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀結構霧度光譜 (a)為 AZO 薄膜覆蓋於以熱處理法製備的奈米銀基板; (b)AZO 薄膜覆蓋於以電化學法製備的奈米銀基板

#### (六)、電性分析

由於太陽電池為一個電性元件，以奈米銀結構應用於背反射層應

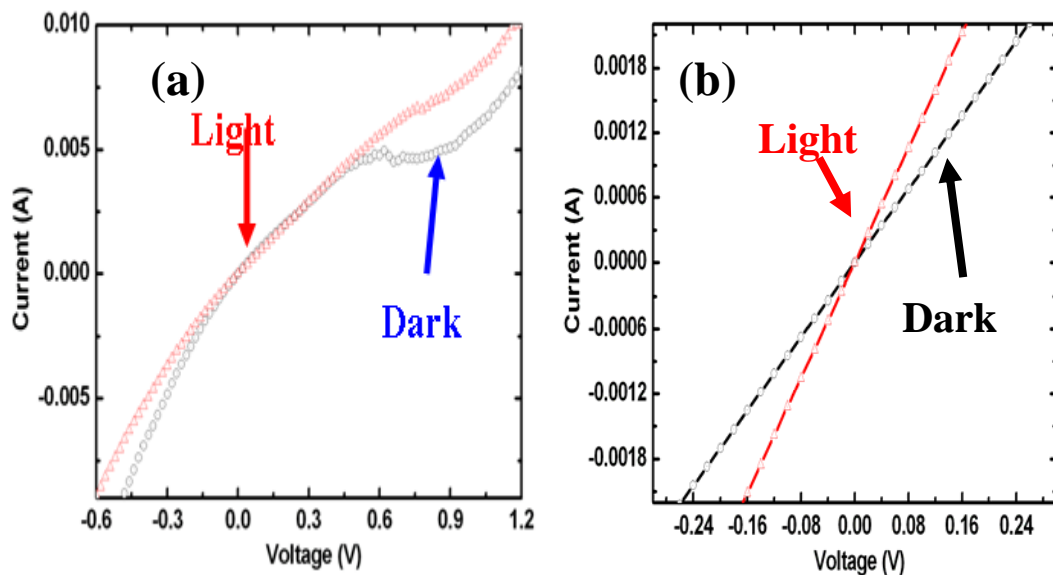
評估其在背反射層結構下之電學特性，鑑於 AZO 為一常用透明導電層，因此在評估上，以 AZO 覆蓋於不同奈米銀結構上方，進行 I-V 特性量測，可以得知其電阻的變化。圖十二為 AZO 薄膜覆蓋於不同奈米銀結構基板的 I-V 關係圖。由 I-V 關係知，當 AZO 薄膜覆蓋於不同奈米銀結構上方，其電阻值均較 AZO 薄膜覆蓋於 ITO 基板上方為高，此量測結果點符合導體的基本電學特性。同時由圖十二得知，將 AZO 薄膜覆蓋在以薄膜熱化學法製備的奈米銀基板上方，其 I-V 特性量測結果顯示為線性，顯示這個奈米銀結構對結構電性的影響只影響其電阻值大小，而以 AZO 薄膜覆蓋於以電化學法經 5 秒與 10 秒的製程，I-V 特性卻顯現高度的非線性，這個非線性關係促使電流在背反射層內的傳導無法以線性的角度解釋。



圖十二、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀結構 I-V 關係圖

由於 AZO 為一個 n-type 半導體材料，其能隙為 3.3 (eV)，因此

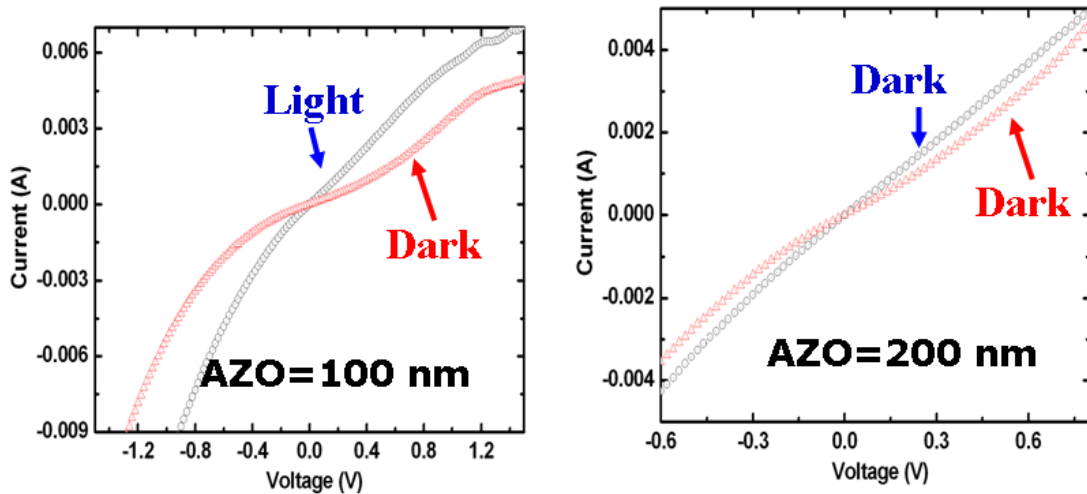
為進一步評量這個 I-V 曲線的非線性特性，進一步將產生非線性電流的量測結果進一步以光照，探討他在太陽光照下的反應。圖十三為 AZO 薄膜覆蓋於半球狀奈米銀結構上方在光照與不受光照射下的 I-V 圖，從圖中明顯看出在順向偏壓下，元件不受光照射下其電壓超過 0.6 (V)時，產生電流下降，當電壓超過 0.9(V)時，其電流增加，而在光照射下，由於 AZO 受光激發產生光生載子或因可見光與奈米銀結構間的表面電漿子效應，造成電子與表面電漿子的耦合效應，使這個 I-V 特性可以變為類似線性關係，這個奇特 I-V 非線性特性的改變效果，此乃由於光生載子在結構內由於奈米銀的結構促使電流特性強烈的改變，促使我們進一步對元件整合時探討。



圖十二、AZO 薄膜覆蓋不同奈米銀 I-V 特性 (a)為 AZO 薄膜覆蓋於 semi-sphere 奈米銀基板; (b)AZO 薄膜覆蓋於 ITO 基板

圖十三為不同厚度 AZO 薄膜(100nm 與 200 nm)製鍍於灌木狀奈米銀上方的 I-V 特性曲線，從 I-V 特性曲線看出在 100 nm 厚度 AZO

薄膜中仍具有明顯非線性特性，當 AZO 薄膜的厚度增加，其非現性關係減弱，這是由於較厚的 AZO 薄膜可以提供電子在其內部傳導運動，較不受奈米銀結構的影響，因此其 I-V 曲線回復至類線性關係，同時在照光條件下，AZO 薄膜可受光導電，提升其導電率。



圖十三、不同厚度 AZO 薄膜覆蓋不同灌木狀奈米銀 I-V 特性

## 二、結論:

本研究結果顯示以電化學法製備的奈米銀結構具有簡單、可圖樣設計、外形多變、大尺寸製作、奈米圖樣均一特性，將 AZO 薄膜覆蓋於其上方，可以得到高反射霧度並具有明顯的非線性電學特性，對太陽電池背反射層具有應用的潛力，有賴進一步整合於太陽電池中以評估其最後效能。

## 肆、參考文獻

- 1.R. Brendel, "Optical design of crystalline thin-film layer silicon solar cell on glasses," In Proc. 13<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Con. Pp. 436-441 (1995)
- 2.D. Thorp, D. Campbakk and S. R. Wenham, "Absorption enhancement in conformally textured thin-film silicon solar cell," Proc. 25<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf. pp. 705-707 (1996)
- 3.D. Thorp, P. Cambell and S.R. Wenham, Conformal films for light-trapping in thin silicon solar cell, Progress in Photovoltaic Vol. 4. pp.205-208 (1996)
- 4.R. B. Bergmann, R. Bredel, M. Wolf, P. Lolgen, J. H. Wener, J. Krinkr and H. P. Strunk, "Crystalline silicon films by Chemical Vapor deposition on glass for thin-film solar cell, Proc. 25<sup>th</sup>, IEEE Photovoltaic Specialist Conf. pp.365-367
- 5.Claus, H. and Rudolf H. Morf, "Submicrometer grating for solar energy application," Appl. Opt. Vol. 34. pp.2476-2482
- 6.
- 7.Carsten Rockstuhl, Stephan Fahr, and Falk Lederer, "Absorption enhancement in solar cells by localized Plasmon polaritons," J. Appl. Phys. 104, 123102
- 8.Zi, Quyang, Supriya Pillai, Fiona Beck, Oliver Kunz, Sergey Varlamov, Kylie R. Catchpole, Patrick Campbell, and Martin A. Green, "Effective Light trapping in polycrystalline silicon thin-film solar cells by means of rear localized surface plasmons, Appl. Phys. Lett. 96,261109 (2010)
9. F. J. Beck, A. Polman, and K. R. Catchpole, "Tunable light trapping for solar cells using localized surface Plasmon," J. Appl. Phys. 105,114310, (2009)
- 10.Harry, A. Atwater, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," Nature materials, 9, 209, (2010)
- 11.Erik Garnett and Peidong Yang, "Light trapping in silicon nanowires solar cell," Nano Lett. 10, 1082 (2010)
12. Jia Zhu, Ching-Mei Hsu, Zongfu Yu, Shanhui Fan and Yi Cui "Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and



- Self-Cleaning,” *Nano Lett.* 10, 1979 (2010).
13. Jixiang, Feng, Hongjun You, Peng Kong, Yan Yi, Xiaoping Song, and Bingjun Ding, “Dendritic Silver Nanostructure Growth and Evolution in Replacement Reaction,” *Crystal Growth & Design*, 7, 864 (2007)
  14. Godan Wei, Ce-Wen Nam, Yaun Deng, and Yuan Hua Lin, “Self-organized synthesis of silver Chainlike and Dendritic Nanostructure via a solvothermal method.” *Chem, Mater*, 15, 4436, (2003)
  15. T Arai, P K R Kumar, C. Rockstuhl, A. Awazu and J. Tominaga, “An optical biosensor based on localized surface Plasmon resonance of silver nanostructure films, *J. optics. A: Pure and Applied Optics*, 8, 699 (2007)
  16. Li Shang, Hongjun Chen, and Shaojun Dong, “Electrochemical Preparation of Silver Nanostructure on the Planar Surface for Application in Metal-Enhanced Fluorescence,” *J. Phys. Chem. C*. 111, 10780 (2007)
  17. Stephan Link, and Mostafa A. EL-Sayed, “Spectral Properties and Relaxation Dynamics of Surface Plasmon Electronic Oscillations in Gold and Silver Nanorods and Nanodots,” *J. Phys. Chem. B*. 103, 8410, (1999)
  18. Lin He, Michael D. Musick, Sheila R. Nicewarner, Frank G. Salinas, Stephen J. Benkovic, Michael J. Natan, and Christine D. Keating, *J. Am. Chem. Soc.* 122, 9071 (2000)
  19. S. Pillai, K. R. Catchpole, T. Truke, “Surface Plasmon enhanced silicon solar cell,” *J. Appl. Phys.* 101, 093105 (2007)
  20. Tanabe, Katsuki, Atwater, Harry A. “Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cells,” 93 121904 (2008)
  21. Pual, Meakin, “Formation of fractal clusters and networks by irreversible diffusion-limited aggregation, *Phys. Rev. Lett.* 51, 1119-1112 (1983)
  22. 徐偉修, “以不同製程製備奈米銀結構探討” 逢甲大學光電所碩士論文, 2012年, 7月30日