

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

週期奈米銀樹狀結構應用於薄膜太陽電池背反射層研究

**Study of application for dendritic silver with periodic structure as a
back-reflector in thin-film solar cells**

計畫編號：1022001INER016

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：102 年 12 月 31 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、源起.....	3
二、目的.....	6
貳、研究方法與過程.....	6
一、文獻蒐整.....	7
二、理論.....	7
(一)表面電漿子.....	7
(二)、雷射干涉曝光法.....	8
三、製程.....	9
(一)、雷射曝光法製作週期性結構.....	9
(二)、週期性奈米銀結構電化學製程.....	10
參、主要發現與結論.....	11
一、主要發現.....	11
(一)、奈米銀外形控制.....	11
(二)、不同間距週期陣列設計.....	12
(三)、週期性奈米銀陣列.....	14
(四)、光學特性量測.....	14
(五)、薄膜太陽電池元件特性.....	18
二、結論.....	20
肆、參考文獻、.....	22

中文摘要

本研究藉由電化學法製作奈米銀樹結構與雷射干涉曝光法，使奈米銀樹狀結構得以具有不同間距週期性的圖樣，配合不同厚度透明導電層 AZO，完成一個薄膜太陽電池的背反射層，以光學特性分析背反射層的特性，並將所製作之結構整合於非晶矽薄膜太陽電池中，研究若透明導電層 AZO 厚度不夠，奈米銀樹結構無法應用於薄膜太陽電池，由於奈米銀樹顆粒較大所致，當 AZO 厚度為 100 nm 時，週期間距為 600 nm，灌木狀奈米銀樹形成之週期結構，在波長 400 nm~900nm，可以得到一個具有較佳的反射霧度。將這個結構應用於非晶矽薄膜太陽電池背反射層中，量測它的 I-V 特性曲線發現，整體電池轉換效率達 $\eta=3.7\%$ ，F.F=54%，比沒有採用這個結構設計的非晶矽薄膜太陽電池效率有效增加 7%。

關鍵字：奈米結構、背反射層、薄膜太陽電池

Abstract

In this study, the dendritic nanostructure with various periods pattern was fabricated via electrochemical process and laser lithography exposure process. A back-reflector of thin-film solar cell can be formed when the AZO with various thicknesses were integrated with the as-fabricated silver structure. The haze ratio of as-fabricated structure is better at the wavelength 400~900 nm when the morphology of Ag formed a bush-type. Finally, the as-fabricated structure is used in an a-Si solar cell as a back-reflector. Under A.M. 1.5 illumination, the overall efficiency and the filling factor for this solar cell are 3.7% and 54%, respectively. Compared with an a-Si thin-film solar cell without as-proposed structure, the conversion efficiency increases 7%.

Keywords: nanostructure, back-reflector, thin-film solar cell

壹、計畫緣起與目的

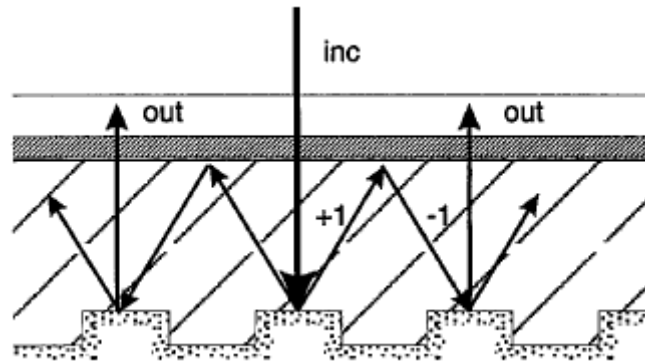
為執行本研究計畫，發展自有關鍵性技術，並使相關參與人員與參閱者瞭解本計畫目的，本計畫研究緣起與目的分述如后：

一、緣起:

由於我國能源 95% 仰賴進口，天然自源日益枯竭，國內反核聲浪在權貴推波助瀾下日漸高漲，面對永續經營與環保的考量下，太陽能電池成為我國一個值得期待與發展的方向，但由於目前商用模組較高轉換效率矽晶太陽電池受限於材料成本與轉換效能有限，且價格昂貴，致使太陽能發電每度電成本高於現有火力、水力、核能與天然氣等發電成本，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，無法有效廣為使用，成為我國主要電力來源，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成本需求的薄膜太陽電池技術發展，希望有效降低太陽電池發電成本。

但由於非晶矽薄膜太陽電池，在長波長($>750\text{ nm}$)部份光學吸收係數較低，始終無法提高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結構上動了手腳，以所謂光補捉(Light-trapping)結構[1-4]概念，如圖一，達到更高的效能，利用光的散射特性使進入薄膜太陽電池仍未被材料吸收的光，仍有效的侷限於太陽電池內部，藉由提升在電池內部光程差，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，得到長波長光電流將近五倍大之值[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，如利用電漿技術將薄膜蝕刻成皺褶結構，也可使薄膜太陽電池效率有效提升，

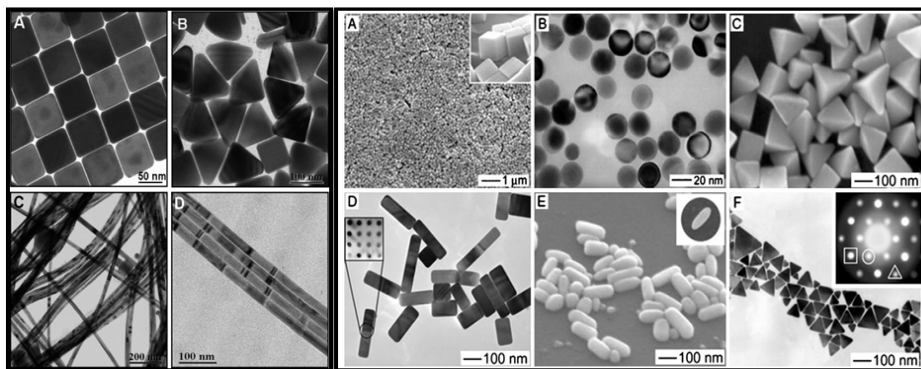
但這些皺摺結構一般均為導電介電材料，其尺寸明顯大於 $\sim 10\ \mu\text{m}$ ，對於厚度僅 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 薄膜太陽電池而言，並不是很好的設計，因此科須學家便將目光投注於金屬材料，對部份貴重金屬材料而言，由於其內部電子結構特性與光波作用於不同介電材料，造成當轉換成貴重金屬材料，製作與設計概念則有不同考量。



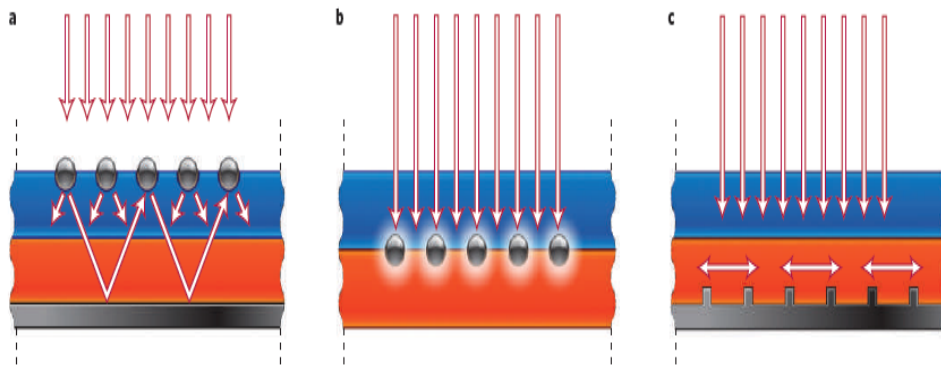
圖一、週期性光柵結構示意圖

近年來隨著奈米科技近步，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。研究已發現奈米銀結構具有多樣性[6]，如圖二，因此這些不一樣的結構，對所謂表面電漿共振效應的共振波長將隨之改變。對太陽電池而言，由於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於太陽電池的機會，藉以有效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 則透過加熱處理的

方式製作奈米銀結構，使太陽電池的光捕捉效應具有可調的[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。



圖二、不同結構奈米銀



圖三、不同奈米金屬應用於薄膜太陽電池的結構示意圖

隨著科技進步，奈微米顯影技術在雷射與光學科技的取得重要進展輔助下，近年有關雷射干涉曝光(Laser Interference Exposure)技術的穩定成熟，使得快速且廉價的奈米結構製程曝得以實現，並

呈現一些特定的週期性結構，鑑於表面電漿效益在對不同奈米結構的尺吋與間距都能表現出對不同波長的共振效應，因此若成功開發特定奈米銀具有可調控的結構相關技術，對於薄膜太陽電池的轉換效率提升，將有顯助的助益。

二、目的：

為擴大應用表面電漿子結構於太陽電池上，使大尺吋太陽電池能藉由表面電漿子效應，改善薄膜太陽電池轉換效率，鑑於眾多奈米金屬結構製程均已被開發(如合成、金屬薄膜退火等)，因此本研究計畫將以實現不一樣奈米銀製程，將此奈米銀製程透過雷射干涉曝光技術，整合於薄膜太陽電池上，得以建立異於國外採用的通用製程，提升本國自身能量，獲取專利保護，提升我國相關產業的競爭力。

因此本計畫將展示如何以電化學簡易製程將不同形貌奈米銀與雷射干涉曝光製程，完成具有可調整間距的週期性奈米銀樹狀結構，整合應用於非晶矽薄膜太陽電池上，評估對太陽電池元件整體轉換效能的影響。

貳、研究方法與過程

執行本研究計畫方法採取實作驗證與歸納，過程包含一般學術研究上有關文獻收集與資料分析、實驗規劃與歸納結論。

一、文獻蒐整

為圓滿本研究計畫，避免疏漏國、內外相關研究團隊最新研究成果，有關本研究文獻蒐整主要以下三個方向進行：

(一)雷射干涉曝光法(Laser interference lithography)開發

週期性結構[11-13]。

(二)特殊奈米銀製程研究

(三)表面電漿子效應應用於薄膜太陽電池研究[14-15]

二、理論

(一)表面電漿子

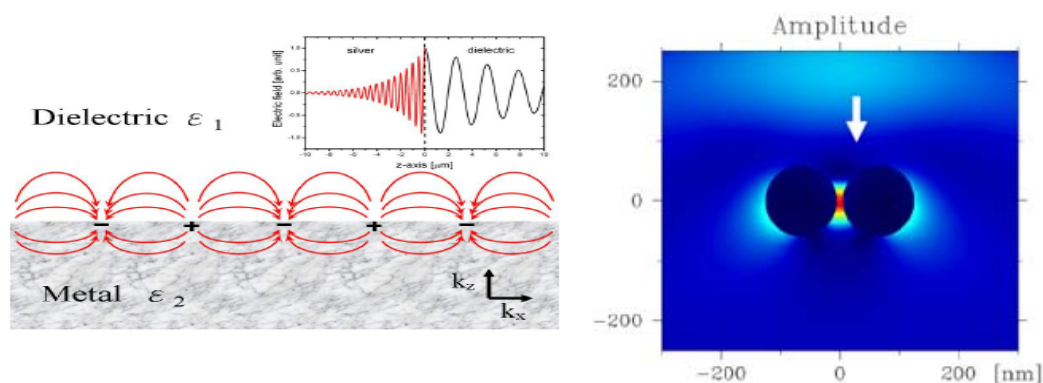
如前所述，金屬與光作用後，在金屬與介質界面的消散波 (Evanescent wave) 所產生的模態，即稱為表面電漿子，如圖四。這個消散波與自由空間的波傳遞相比較，因擁有較高的能階密度，故具有激發或偶合材料內部的電子運動行為，造成特性改變，研究發現其對於發光半導體中載子和表面電漿子模態耦合之效率可以遠高於載子本身的自發性放光效率。依其特性，表面電漿子主要可區分為兩大類：侷域表面電漿子 (localized surface plasmon, 簡稱 LSP) 與表面電漿電磁耦子 (surface plasma polariton, 簡稱 SPP) 及。

LSP 一般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。至於 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)，由於系統中若有表面電漿子存在，對半導體等

發光元件部分能量可耦合至表面電漿子模態，進而改變其運動形態與效能。

研究上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，如圖五。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。



圖五、電荷密度在金屬表面上發生集體電偶極振盪電場分量的示意圖。

因此對表面電漿子元件其最重要的在於結構或表面粗糙度。

(二)雷射干涉曝光法：

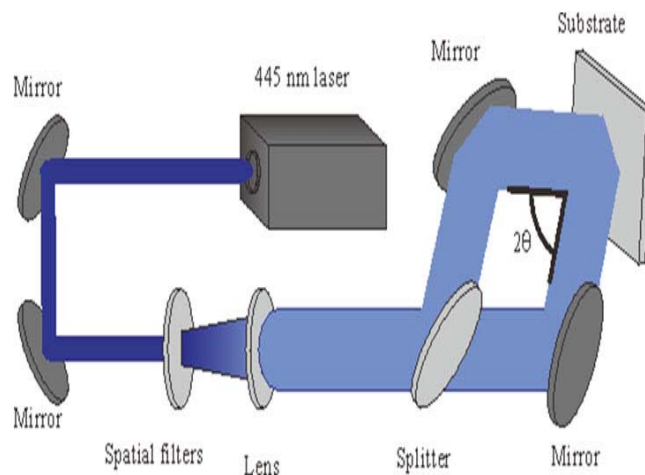
干涉 (interference) 是兩列或兩列以上的波在空間中重疊時發生疊加從而形成新波形的現象。例如採用分束器將一束單色

光束分成兩束後，再讓它們在空間中的某個區域內重疊，將會發現在重疊區域內的光強並不是均勻分布的：其明暗程度隨其在空間中位置的不同而變化，最亮的地方超過了原先兩束光的光強之和，而最暗的地方光強有可能為零，這種光強的重新分布被稱作「干涉條紋」，雷射光具有單一波長，能量高的特性，傳統上非常適合做為產生干涉條紋的光源，目前研究已發展出不同架構的光涉系統，如白光干涉儀、邁克生干涉儀等。

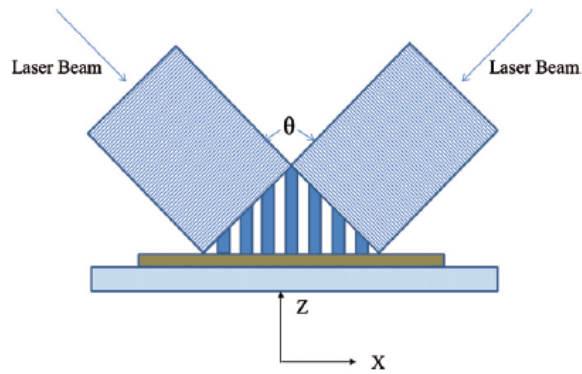
三、製程

(一)雷射曝光法製作週期性結構：

為完成本研究計畫，在實驗過程中，參研干涉的學理機制，自行架設一套 Mach-Zender 雷射干涉系統，藉由調整光程差與能量強度，可精確控制兩束光的干涉角度，如圖六。透過基板的旋轉與搭配角度的變化，便可在光阻上形成不同圖樣的顯影，最後獲得不同週期間距 1D 與 2D 的結構，圖七。



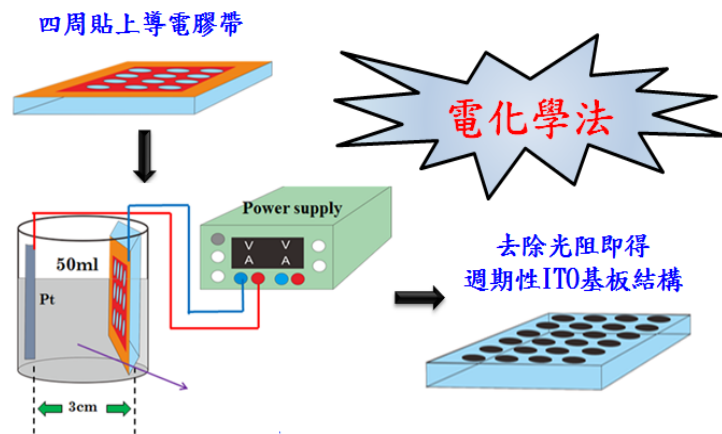
圖六、Mach-Zender 干涉示意圖



圖七、干涉圖案成影示意圖

(二)週期性奈米銀結構電化學製程：

由於電化學製程可以快速得到奈米結構，但由於金屬離子在溶液中容易受到電場的影響而改變運動方向。造成電化學奈米結構製作上分佈不均的盲點，為使電化學製程的奈米銀結構於基板上方均勻分佈，特別在基板上方設計具有均勻電場分佈的結構，以協助電化學製程，如圖八所示。



圖八、電化學法製備奈米銀製程示意圖

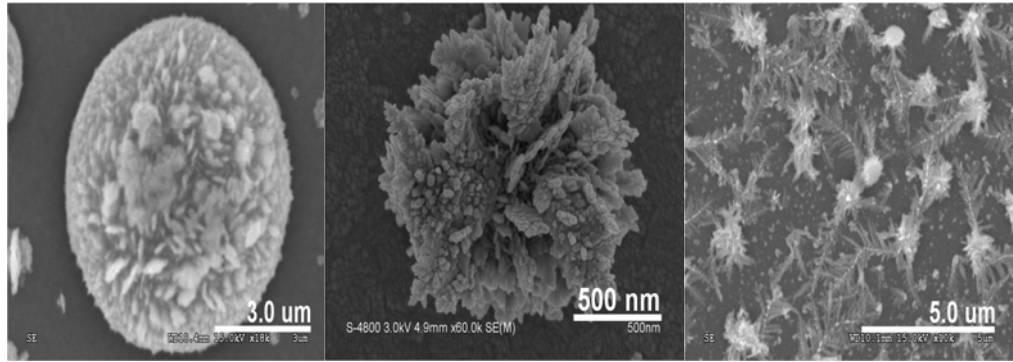
參、主要發現與結論

(一)主要發現

為比較不同製程製備奈米銀結構在週期排列下，對薄膜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，設計並製作於 1D 與 2D 週期性陣列中，最後成功整合應用於薄膜太陽電池的背反射層，研究中進行了非晶矽薄膜太陽電池轉換效率量測比較，其重要結果分述如后：

(一)奈米銀外形控制

研究發現經過本研究所開發的電化學反應，經 5 秒反應時間便可在 ITO 導電基板上方獲得均勻分佈的半球狀(semi-sphere)奈米銀結構，當增加反應時間到 10 秒，奈米銀結構轉變為灌木(bush)形狀；反應時間 20 秒鐘，可於 ITO 基板上方形成緻密的奈米銀樹狀結構，結果充份顯示，奈米銀外形依反應時間而產生變化，並具備簡單、快速製備的特性。如圖九。由圖得知，當反應時間過常，銀結構順利成長出樹枝狀。但由於枝幹過長，因此並不適合製作於間距 400 nm~600 nm 的週期性結構中，因此本研究將以反應時間為 10 秒的奈米銀樹進行相關研究。



圖九、不同反應時間奈米銀樹狀結構變化(左)5 秒 (中)10 秒 (右)20 秒

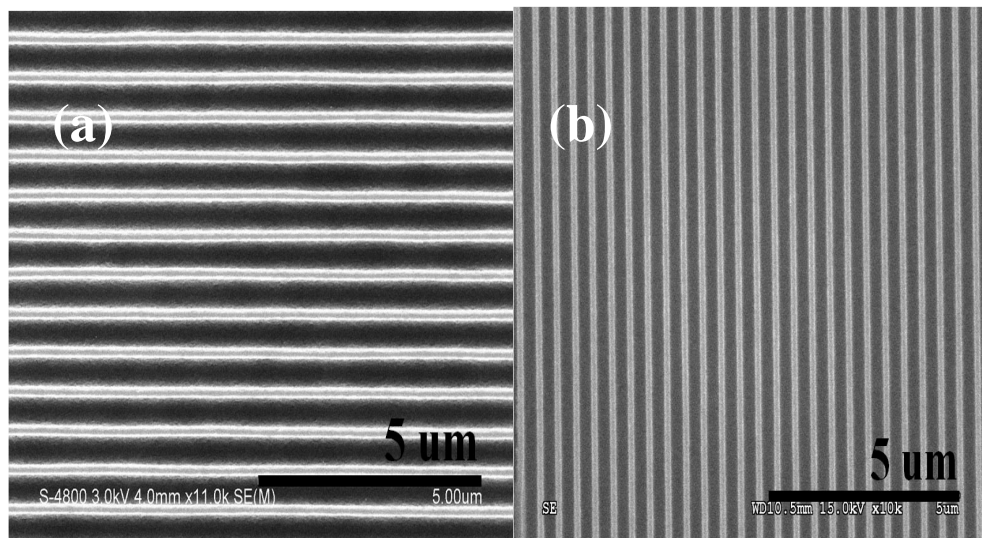
從圖九得知不同反應時間奈米銀確實可以提供有效的表面粗糙，除提供光學散射機制外，並可結合表面電漿子原理，具有容易產生局域表面電極共振效應(LSP)的粗糙奈米銀結構。

(二)不同間距週期性陣列設計

本研究在干涉條紋的開發上，我們採用 Mach-Zender 干涉架構，從原理可以得知獲得干涉圖樣的間距為：

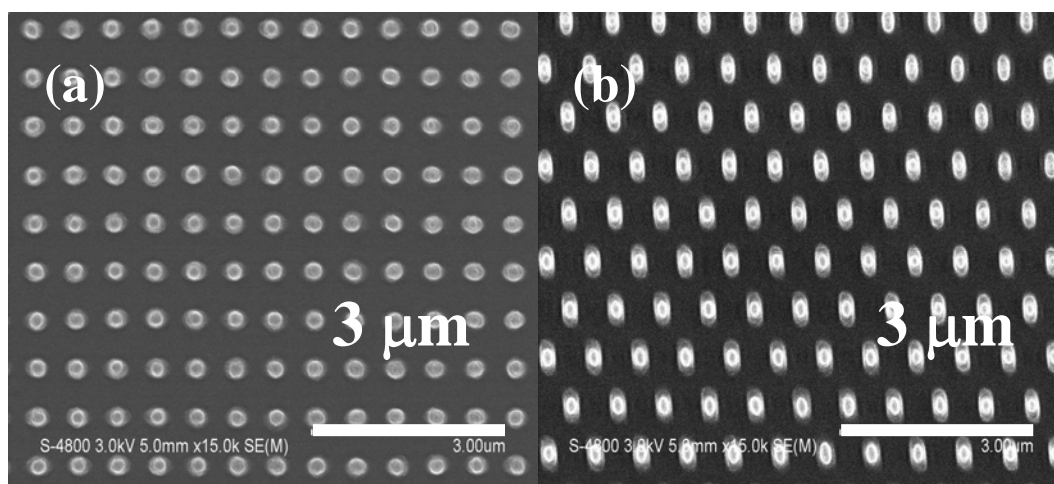
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

其中 d 為週期間距， θ 為兩道光的夾角， λ 為雷射光的波長，本研究雷射光源為波長 445 nm。圖十(a)~(b)為本研究成功以雷射曝光法製作之一維週期性陣列圖案，其中(a)為週期 600 nm 的一干涉圖案，(b)為週期 450 nm 的一維干涉圖案，證實本研究採用雷射干涉曝光方法確實具有可以成功調整其週期性間距的特性。



圖十、雷射干涉曝光法製作一維不同週期陣列圖(a)週期 700 nm (b)週期 450 nm

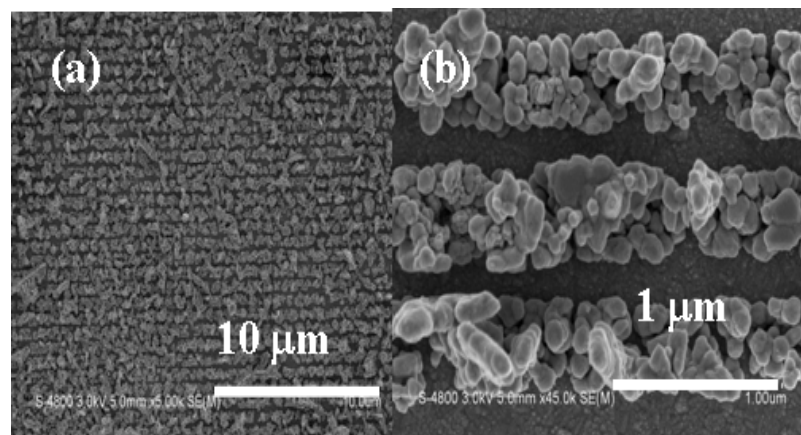
研究證實將相同干涉架構將基板旋轉不同角度，進行多次曝光即可得到 2D 不同週期陣列圖案，如圖十一(a)~(b)所示。



圖十一、雷射干涉曝光製作 2D 不同週期性結構圖案(a)旋轉 60 度 (b)旋轉 90 度

(三)、週期性奈米銀陣列

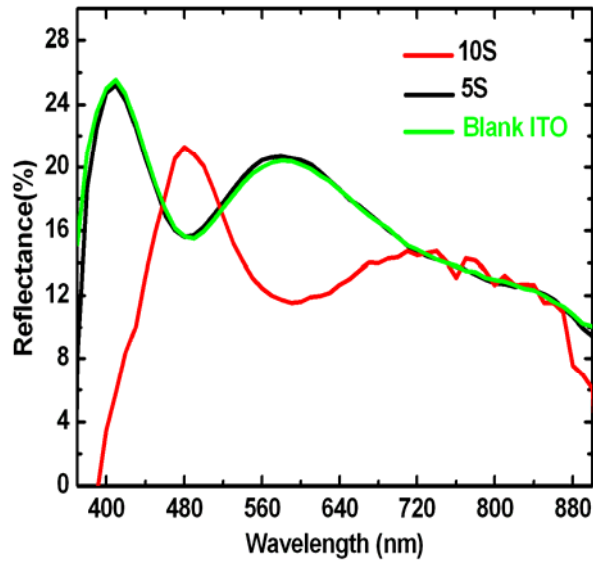
為實現研究目標，結合電化學奈米銀結構製程與雷射干涉曝光法，調整曝光與顯影時間，可利於不同外形奈米銀結構成功製成於基板上方，形成具有周期性特殊形貌奈米銀結構。圖十二(a)低倍率下呈現本研究成功製作之週期性奈米銀結構 SEM 圖。圖十二(b)為高倍率下奈米銀樹狀結構俯視圖，研究顯示本結構具有特殊性。



圖十二、奈米銀結構製作於週期性結構(a)低倍率 (b)高倍率

(四)、光學特性量測

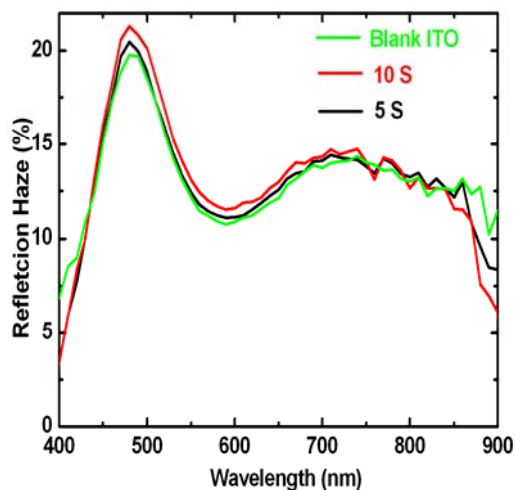
為評估結構應用於薄膜太陽電池背反射層對整體轉換效率的影響，以濺鍍法在週期性奈米銀上方分別覆蓋不同厚度(50nm、100nm)的摻鋁氧化鋅(AZO)薄膜，形成特殊的背反射層，並量測其光學特性，圖十三為週期間距為 600 nm，不同奈米銀結構在 ITO 玻璃上方對波長 400 nm~900 nm 的反射光譜。



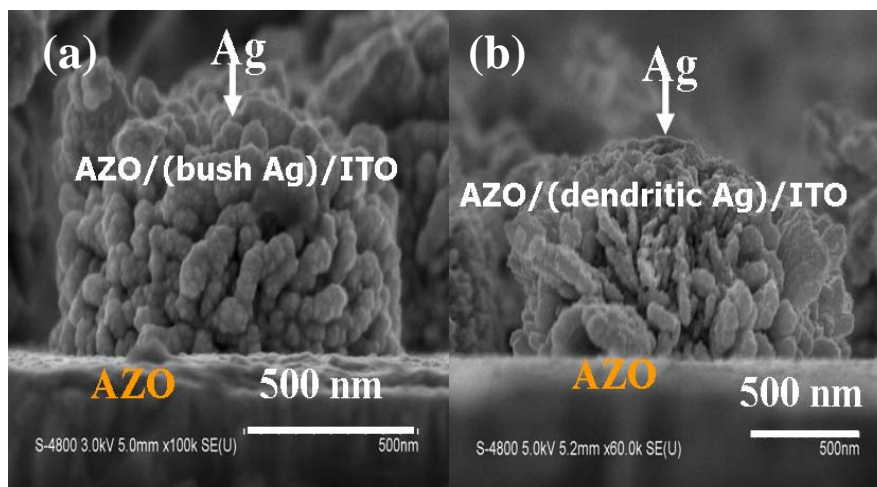
圖十三、不同奈米銀結構在週期間距 600 nm 時對波長 400 nm~900 nm 的反射光譜

從圖十三得知，在基板上方製作反應時間為 10 (sec)的奈米銀樹狀結構圖案在 400~900 nm 範圍具有較差的反射率。推測其原因係由於奈米銀樹表面較粗糙，造成光通過具有較大的散射能力，以致偵測器所量得的反射值較差。圖十四為三個樣品在波長 400~900 nm 所對應到的反射霧度值，結果顯示在波長 400~800nm，三個樣品的反射霧度差異並不大。然而在波長 850~900 nm 時，在基板上方製作反應時間為 10 (sec)的奈米銀樹狀結構圖案在具有較差的反射霧度，通常反射霧度較差，在傳統上認知對薄膜太陽電池的光捕捉效應較差，為改善此一現象，與元件導電特性考量，在奈米銀結構基板上

方度上厚度為 100nm AZO (實驗結果顯示 50 nm AZO 無法順利製作出薄膜太陽電池樣品), 如圖十五所示, 並量測分析結果的光譜特性。



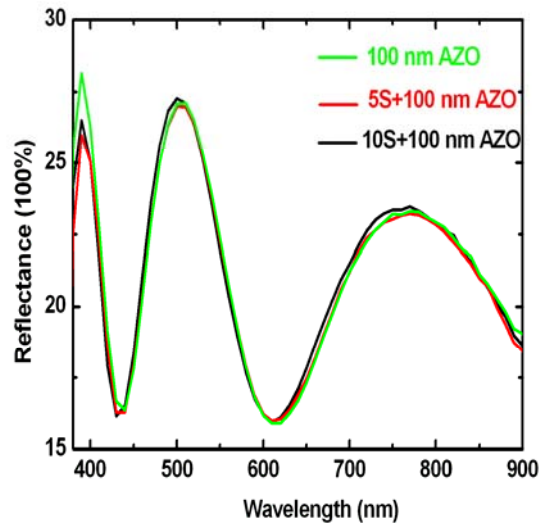
圖十四、不同奈米銀結構在週期間距 600 nm 時對波長 400 nm~900 nm 的反射光譜



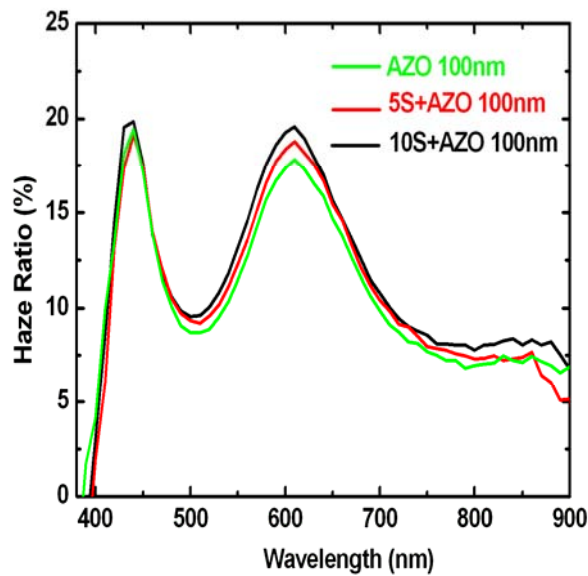
圖十五 不同奈米銀外形背反射層剖面 SEM 圖

圖十六為厚度 100 nm AZO 薄膜濺鍍於週期間距 600 nm, 不同奈米銀結構反射光譜。由透光光譜得知, 在波長 400 nm-900 nm,

穿透值差異並不大。



圖十六、100 nm AZO 複蓋於週期間距 600 nm，不同奈米銀結構在對波長 400 nm~900 nm 的反射光譜



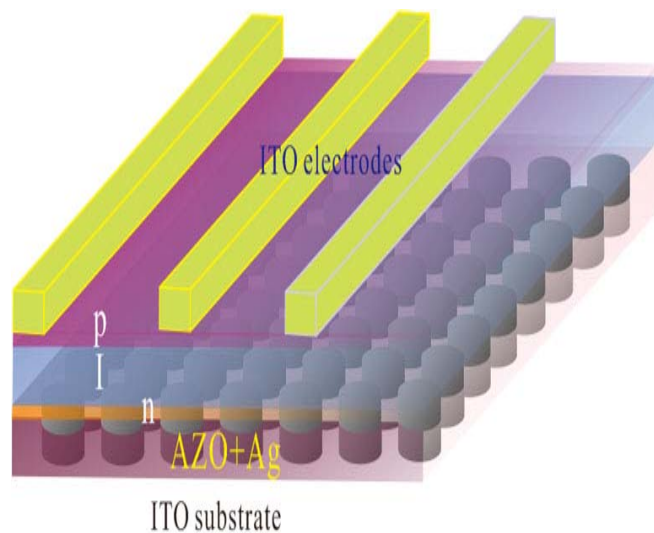
圖十七、100 nm AZO 複蓋於週期間距 600 nm，不同奈米銀結構在對波長 400 nm~900 nm 的反射霧度

從圖十七結果顯示週期間距在 600 nm，在基板上方製作反應時

間為 10 (sec)的奈米銀樹狀結構圖案經 100 nm AZO 複蓋後，在波長 400~900 nm 範圍均具有較佳的反射霧度。推測其原因係由於奈米銀樹表面與 AZO 薄膜間產生較大的粗糙度，造成光通過具有較大的散射能力。

(五)、薄膜太陽電池元件特性

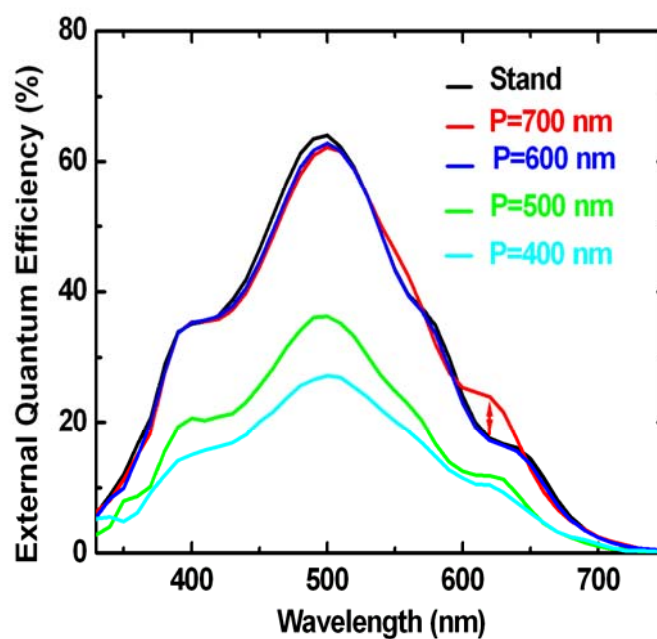
為驗證設計結構對非晶矽薄膜太陽電池的轉換效應的影響，因此製作一個具有本研究所製作的奈米銀結構應用的特殊結構，整合於薄膜太陽電池製作中，如圖十八所示。



圖十八、奈米銀結構背反射層薄膜太陽電池元件示意圖

對於太陽電池而言，它的效率往往取決於外部量子效應 (EQE)，因此本研究對於元件的外部量子效應進行相關量測。圖十九為非晶矽薄膜太陽電池採用不同奈米銀背反射層結構，在 AM1.5 光譜量測下，其外部量子效率。很明顯的以週期間距 600 nm 的奈米銀結構陣列，在波長 600 nm~650 nm 可以比標準製作元件得到較好

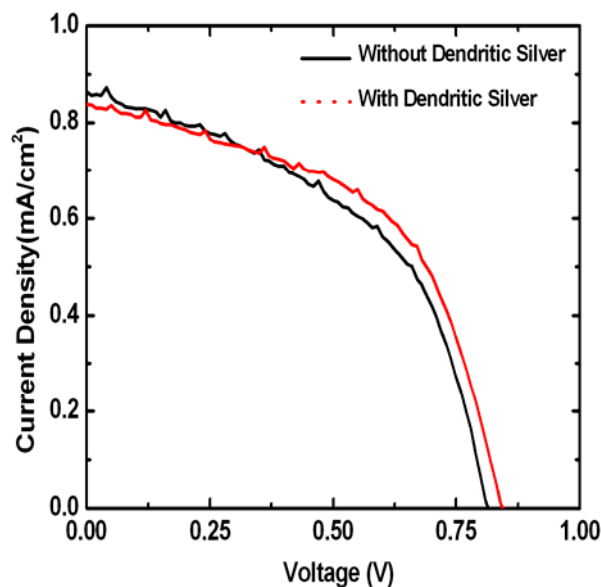
的外部量子效率，但在波長 480 nm~500 nm 處外部量子效率卻以標準元件最佳，因此很明顯得到由於奈米銀樹狀結構的表面粗糙，造成元件對特定波長的部份外部量子效應明顯增加，對特定波長部份量子效應卻是受限，此一原因可以歸納為奈米銀週期性結構對於光學整體的綜合影響。



圖十九、不同結構背反射層對薄膜太陽電池外部量子效應影響

本研究計畫最後目的在於評估週期性奈米銀樹狀結構對於薄膜太陽電池的轉換效率影響，因此當元件在 A.M.1.5 下光源下，所得的元件轉換效率可以做為本研究所開發成果最終應用於矽晶薄膜太陽電池轉換效率的影響。以 EQE 所得結果，評估元件整體效能，圖二十為非晶矽薄膜太陽電池應用週期間距 700 nm 奈米銀樹狀結構

背反射層在 A.M1.5 光譜下的 I-V 特性曲線，元件整體轉換效率為 $\eta=3.7\%$ ，F. F. =52%，比較非晶矽薄膜太陽電池未採用週期性奈米銀樹狀結構，其轉換效率 $\eta=3.3\%$ ，F. F. =47%，明顯提升其轉換效能。結果顯示非晶矽薄膜太陽電池經週期性奈米銀樹狀結構設計於背反射層，以本研究所開發之奈米銀樹狀配合雷射干涉曝光在週期 700 nm，經覆蓋一層 100 nm AZO，在 A.M. 1.5 光譜下可以有效提升非晶矽薄膜太陽電池的轉換效率與填充因子。



圖二十、非晶薄膜太陽電池應用週期間距為 700 nm 奈米銀樹狀結構背反射層 I-V 特性曲線。

二、結論：

本研究結果顯示以電化學法製備的奈米銀結構的週期性樹狀結構，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，將結構整合於厚度 100 nm AZO 薄膜中，可以得到一個較佳的反射霧度，結合於非晶矽薄膜太陽電池背反射層中研究結果顯示，在週期間距為 700 nm 的奈米銀樹狀結構，可使薄膜太陽電池的轉換效能較未採用此結構設計者增加 7%，此一結果證明具有有效提升轉換效率，係由其結構上整體光學散射與局部表面電漿耦合效應所造成。

肆、參考文獻

1. R. Brendel, "Optical design of crystalline thin-film layer silicon solar cell on glasses," In Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Con. Pp. 436-441 (1995)
2. D. Thorp, D. Campbell and S. R. Wenham, "Absorption enhancement in conformally textured thin-film silicon solar cell," Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. pp. 705-707 (1996)
3. D. Thorp, P. Campbell 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. Brendel, M. Wolf, P. Lölgen, J. H. Wener, J. Krinkr and H. P. Strunk, "Crystalline silicon films by Chemical Vapor deposition on glass for thin-film solar cell, Proc. 25th, 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. Carsten Rockstuhl, Stephan Fahr, and Falk Lederer, "Absorption enhancement in solar cells by localized Plasmon polaritons," J. Appl. Phys. 104, 123102
7. 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)
8. 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)
9. Harry, A. Atwater, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," Nature materials, 9, 209, (2010)
10. M. Zhang, M. Yu, Y. Liu, R. Skomski, S. Liou, "Magnetic nanodot arrays produced by direct laser interference lithography," Appl. Phys. Lett., 79, 2606-2608, (2001)
11. L. Vodelaar, W. Nijdam, H. A. G. M. F. B. Segerink, E. Fluck, L. Kuiper and N. F.

- van Hulst, *Adv. Mater.* 13, 1551-1554 (2001)
13. Stein Kuiper, Henk van Wolferen, Cees van Rijn, Wietze Nijdam, Gijs Krijnen and Miko Elwenspoek, "Fabrication of microsieves with sub-micron pore size by laser interference lithography, *J. Micro. & Micro*, 11, 33-37 (2001)
12. F. Yu, P. Li, Hao Shen, Sanjay Mathur, Claus-Michael Lehr, Udo Bakowsky, Frank Mücklich, *Biomater.* 26 (2005) 2307-2312
13. Johannes de Boor, Nadine Geyer, Jorg V Wittemann, Ulrich Gosele and Volkr Schmidt, "Sub-100 nm silicon nanowires by laser interference lithography and metal-assisted etching," *Nanotech.* 21 095302 (2010)
14. Stacey D. Standrige. George C. Schatz and Joseph T. Hupp "Distance Dependence of Plasmon-Enhanced Photocurrent in Dye-Sensitized Solar Cells, *J. Am. Chem. Soc.* 131, 8407-8409 (2009)
16. T. L. Temple, G. D. K. Mahanama, H. S. Reehai, D. M. Bagnall, "Influence of localized surface plasmon excitation in silver nanoparticles on the performance of silicon solar cell" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 1978-1985 (2009)