

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

大尺寸製作摻鋁氧化鋅(Al-doped ZnO)微球薄膜之研究
**The fabrication of large scale thin-film formed with Al-doped ZnO
microspheres**

計畫編號：1002001INER037

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：民國 100 年十二月十三日

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、文獻蒐整.....	5
二、粒徑 100~300 nm，不同摻雜濃度(1%~3%)AZO 微球之製備方 式.....	5
三、AZO 單層自主裝結構製作.....	7
參、主要發現與結論.....	8
一、AZO 微球特性.....	8
(一) 球體表面型態及尺寸大小.....	8
(二) AZO 微球之(Al/Zn)摻雜比例鑑定.....	8
(三) 不同[Al/Zn]摻雜比例之 AZO 微球球體之結晶型態.....	9
(四) AZO 微球光致發光光譜.....	10
二、大尺吋 AZO 微球自組裝結構製作.....	11
(一) AZO 微球單層自組裝結構製作.....	11

(二) AZO 微球單層自組裝結構製作於玻璃基板.....	<u>12</u>
三、大尺寸 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 與 AG 薄膜製作.....	<u>14</u>
(一) AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜光學特性量測.....	<u>15</u>
(二) AZO 微球部份鑲嵌於不同 AZO 薄膜厚度電性量測.....	<u>18</u>
四、結論	<u>23</u>
肆、參考文獻.....	<u>24</u>

中文摘要

本研究開發製作將直徑大小 100 nm~300 nm，不同鋁摻雜濃度 (1%~3 wt.%) 氧化鋅 (Al-doped ZnO, AZO) 奈米微球，以沉浸式鍍膜法 (Dip-Coating)，將 AZO 微球於基板上形成一個由 AZO 微球均勻鋪排的微球單層自主裝結構，透過薄膜製程將 AZO 微球鑲嵌於銀、鋁薄膜中，形成一個球體部份鑲嵌結構，評估製成薄膜其特有光學特性與在薄膜太陽電池背反射層的應用。研究發現以此製程在大尺寸基板開發上，可在玻璃基板上將 AZO 微球結構成功轉變為具光散射與捕捉的薄膜，但對於以 AZO 微球製作於可撓性不銹鋼基板上，由於基板彎曲，造成其均一性與實用性仍須考量可撓性基板邊側的平整與 AZO 微球受溶液推疊的堆疊效應，研究顯示目前並無法直接應用於太陽電池上。

Abstract

In this study, we develop the fabricating process of large scale thin-film with monolayer Al-doped (1%~3%) ZnO (AZO) nanospheres. The AZO nanospheres will be separated from the solution via dip-coating process. The monolayer close-pack structure with AZO nanospheres will be formed on substrate. The ZnO, Ag and ZnS will be deposited on the AZO structure. Therefore, the AZO nanospheres will be embedded thin-film to evaluate the optical properties and application of the proposed thin-film for thin-film solar cell. We found the proposed structure exhibits superior optical scattering effect and light trapping ability when the thickness of thin-film is less than 300 nm. The proposed structure can be fabricated on glass substrate with a large scale 10x10 cm². However, when the proposed structure was deposited on the flexible stainless substrate, the AZO nanospheres will stack on the corner due to the edge is not smooth.

壹、計畫緣起與目的

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看好，但仍然受限。為降低發電成本，目前發展趨勢則以朝向更低材料需求的薄膜太陽能電池技術發展，以求有效降低太陽能電池吸收層的發展成本與更高的製作效益。

當薄膜太陽電池的發展(如非晶矽、微晶矽、化合物等)被廣泛注意，礙於薄膜結構，對於有限的吸收層無法達到有效的光學吸收，為有效提升內部量子效率與太陽光譜吸收，有鑑於此，科學家便提出一種所謂的光捕捉(Light-trapping)結構[1-4]，這種光捕捉結構最重要在於光學設計上散射特性使入射於薄膜太陽電池的光，於太陽電池元件中經由多次折射與反射，促進吸收層對光的吸收，以提升光電轉換效率，因此近年來工程上已分別出現各種結構，例如：Claus 等人提出的用次微米光柵於背反射面增加光侷限效果[5]，得到將近五倍的值，但由於製作光柵不易，所以大面積生產有其困難。在 1998 年，Zettner 等人用多孔洞概念，加強光的散射，得到 20% 的光電流增加[6]，這個方式需要控制精密參數才能得到良好結果，因此，之後又有所謂利用酸鹼或離子蝕刻等方式製作皺褶結構，這項技術有一個缺點，當需要大面積生產，機台必需加大，致使設備成本大幅增加，進年則隨著奈米科學的進步，科學家開始採用微奈米結構於薄膜太陽電池中，在轉換效率上均可獲得提升與改進[7-9]，充份證明奈米

工程在未來太陽電池的發展具有優勢。

二、目的:

有關薄膜太陽電池光捕捉技術與製程，目前絕大部份均由先進國家所掌握、開發，進年來引進奈米工程結構的新觀點與學理研究，則多數由先進國家所進行，對於國內廠商若把太陽能光電列為下一個發展產業，將來在製程上勢必面臨支付高額權利金，對成本與獲利均不利，並有可能步上 TFT LCD 面板與 Dram 的後塵，因此有效開發先進製程與整合低製作成本，對國內產學界而言已刻不容緩。

本研究在於應用沉浸式鍍膜法，將不同摻雜濃度摻鋁氧化鋅微球(100~300nm)在玻璃與可撓式不銹鋼基板上進行鋪排，借由微球自組裝的特性，形成單層結構，透過薄膜技術將微球鑲嵌於薄膜中，如圖二，形成一個具實用性、大尺寸(10 cmx10 cm)光捕捉效能的結構，以評估是否具有導入大尺寸薄膜太陽電池契機。

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，過程包含一般研究上相同之文獻收集與分析、實驗規劃與歸納結論。

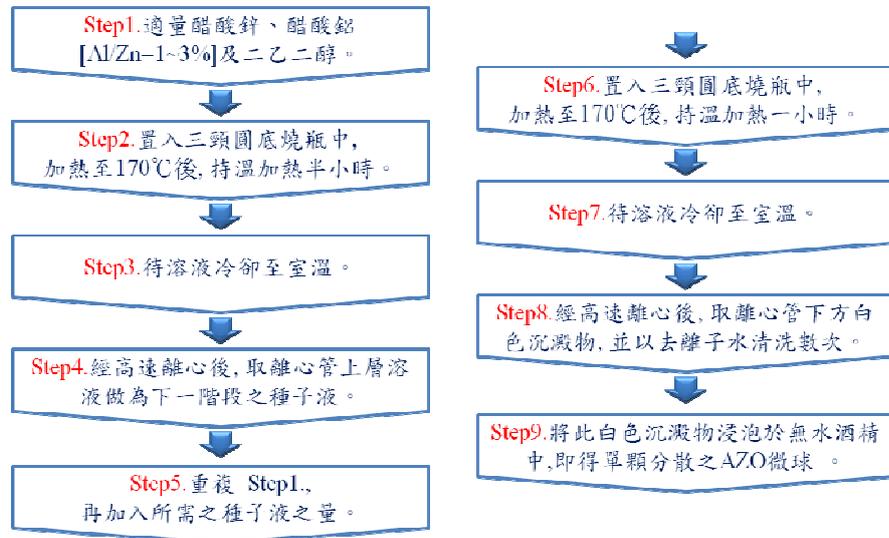
一、文獻蒐整

有關本研究文獻蒐整主要以下三個方向進行：

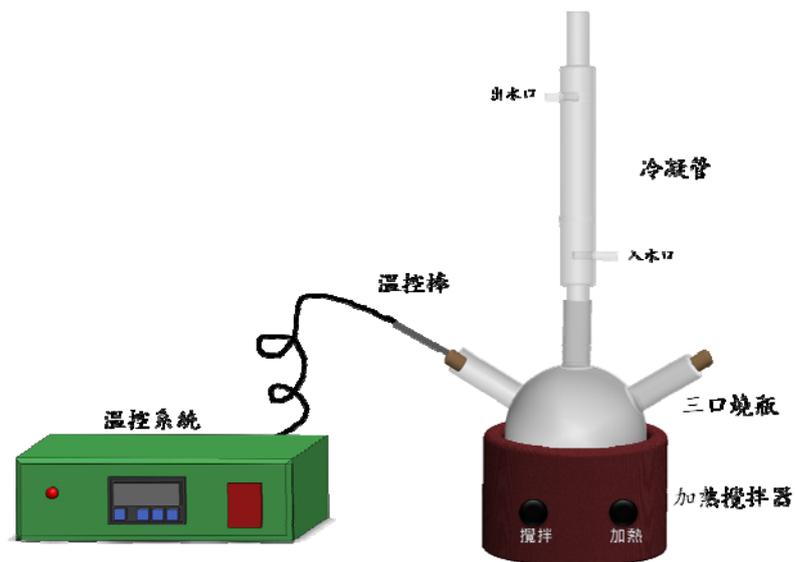
- (一) 摻鋁氧化鋅(AZO)奈米微球製作技術[8];
- (二) 太陽電池透明導電層薄膜光捕捉結構設計[9-11];
- (三) 奈米結構薄膜製作工程[12-14]。
- (四) 國內外類似結構之研究結果[15]

二、粒徑 100~300 nm，不同摻雜濃度(1%~3%)AZO 微球之製備方式

下圖一為以化學膠體法製備 AZO 微球的流程圖，以兩階段的製備使第一階段產生的 AZO 產生微晶，使其具有成核的條件，並以第二階段的導入使 AZO 微球尺寸得以控制，其合成裝置如圖二。採用迴流裝置的用意在於得到穩定的反應溫度，將第二階段合成的 AZO 微球以無水酒精與離心機洗淨，以獲得可做為沉浸式鍍膜法適用的微球。



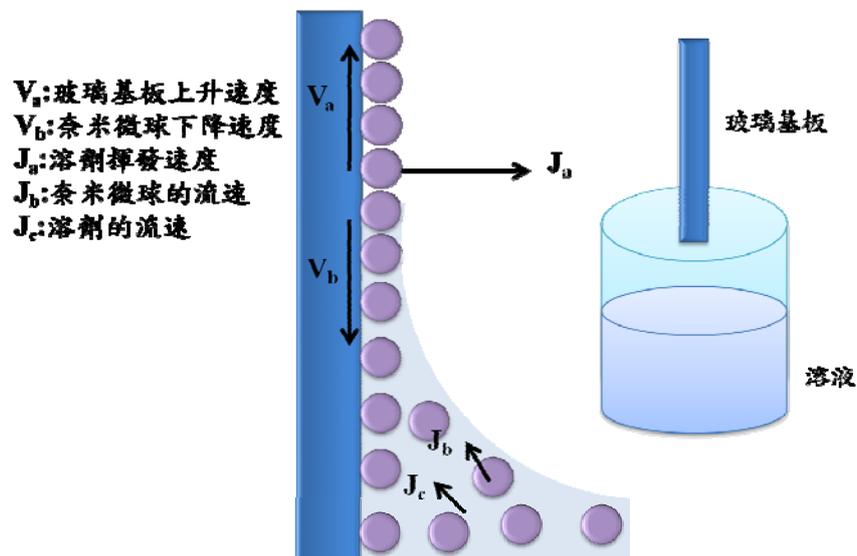
圖一 AZO 微球製程示意圖



圖二、AZO 微球迴流製程示意圖

三、AZO 單層自主裝結構製作

配合 Langmuir-Blodgett 技術，如圖三，研究得知將 AZO 微球於酒精與乙二醇 3:1 的體積比 10 wt.% 溶液中，可以得到將 AZO 微球在溶液中形成單一均勻分散式球體，適合進行 AZO 微球的單層自主裝最密堆積結構的製作，AZO 微球自組裝緊密程度與其溶液的揮發速度、基板拉升速度與黏稠度有關。



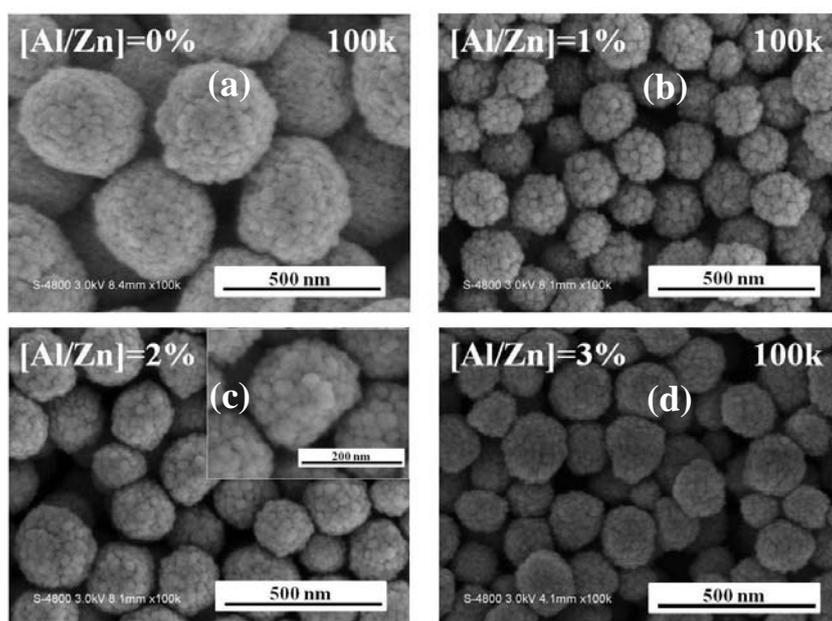
圖三、沉浸式鍍膜法示意圖。

參、主要發現與結論

一、AZO 微球特性

(一)球體表面型態及尺寸大小

圖四為不同[Al/Zn]之摻雜比例 AZO 微球球體表面及尺寸大小 SEM 圖，由圖知 AZO 微球隨著鋁摻雜比例增加，微球球體的尺寸大小越不均勻，尺寸大小亦會隨之減少。成果顯示 AZO 微球可製備直徑大小範圍約為 100~400 nm，這種尺寸的球體對於可見光(400~700nm)而言為次波長結構，且微球為單顆分散球體，可滿足於後續光學設計需求與應用。由圖四(c)中小圖為 AZO 微球之高倍率 SEM 圖，由此圖可觀察得知 AZO 微球球體表面聚集大量 AZO 奈米實體，因此，AZO 微球球體為一非平滑表面之結構。

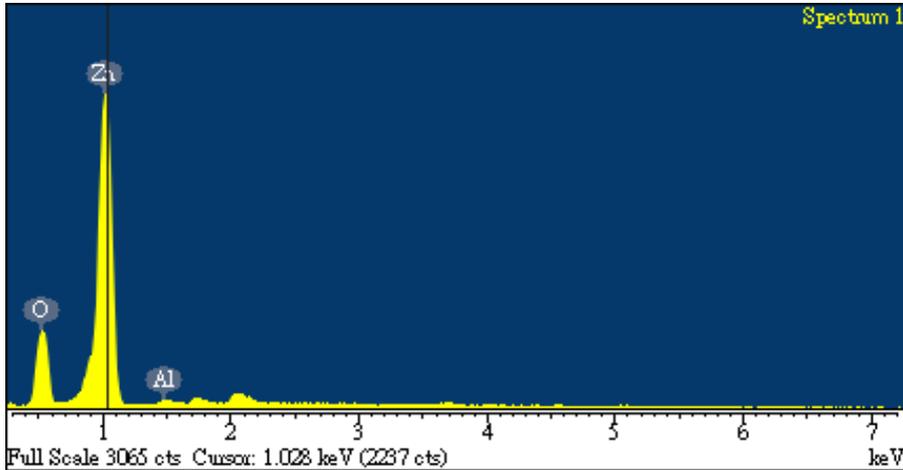


圖四：不同[Al/Zn]之摻雜比例 AZO 微球球體表面及尺寸大小

(二)AZO 微球之(Al/Zn)摻雜比例鑑定

以能量散佈光譜進行樣品特性分析，圖五為[Al/Zn]=2%之摻雜

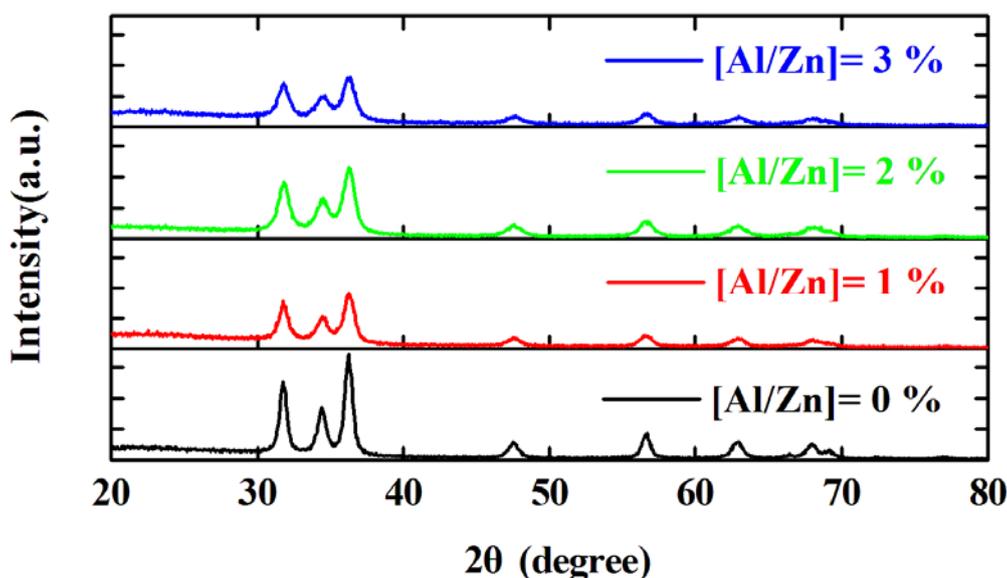
比例之 AZO 微球球體之能量散佈光譜圖。由圖可知合成樣品中儘 Al、Zn 與 O 的元素，AZO 微球之實際摻雜比例 $[Al/Zn]$ 大約為 2%。



圖四、 $[Al/Zn]=2\%$ 之摻雜比例之 AZO 微球球體之能量散佈光譜

(三)不同 $[Al/Zn]$ 摻雜比例之 AZO 微球球體之結晶型態

圖五為不同 $[Al/Zn]$ 之摻雜比例 AZO 微球球體之結晶型態，對照標準 ZnO 材料(JCPDS card file No.36-1451.)相比較之 XRD 圖，與 ZnO 的閃鋅結構相互脗合並得知合成球體為多晶(Poly)球體。再比較 $[Al/Zn] = 1\sim 3\%$ 之摻雜比例之 AZO 微球球體之結晶型態可發現 $[Al/Zn]=2\%$ 之摻雜比例之 AZO 微球球體具有較好的結晶型態。故目前先以 $[Al/Zn]=2\%$ 之摻雜比例之 AZO 微球球體運用在後續的 AZO 薄膜隨機皺摺結構製作上。



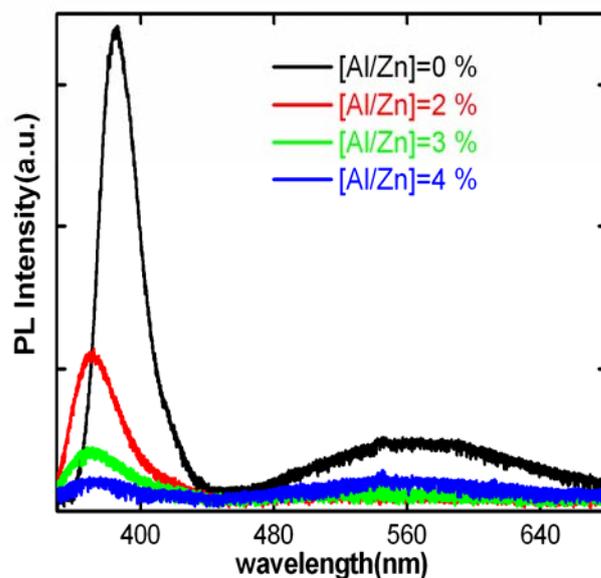
圖五: 不同[Al/Zn]之摻雜比例 AZO 微球球體之結晶型態

(四)AZO 微球光致發光光譜

以波長 325 nm He-Cd 雷射為光源，搭配單色儀(Monochromator)，進行 AZO 微球之光致發光(Photoluminescence)光譜量測，圖六為不同 Al 摻雜濃度 PL 光譜，由圖中可看出(Al/Z)為 0%之摻雜比例之 AZO 微球球體之光致發光光譜在光譜波長 384 nm 處有一個中強且尖銳的譜線，轉換成能量，證實這個合成(Al/Zn)為 0%之摻雜比例之 AZO 微球，其能帶寬度為 3.23 eV，由圖中亦可看出(Al/Zn)為 0%之摻雜比例之 AZO 微球球體在合成過程中，常造成一些氧缺陷，這個缺陷在光譜上表現為波長 540~650 nm 的發光光譜。

合成(Al/Zn)2%之摻雜比例之 AZO 微球球體之光致發光光譜在光譜波長 372 nm 處有一個中強且尖銳的譜線，其能帶寬度為 3.33 eV，雖然(Al/Zn)為 2%之摻雜比例之 AZO 微球球體之光致發光峰值強度沒有比(Al/Zn)=0%之摻雜比例 AZO 微球來的好，但在 (Al/Zn)為 2%之摻雜比例 AZO 微球球體，在光致發光光譜上可見光的強度

明顯比較其氧缺陷較(AI/Zn)為 0%之摻雜比例 AZO 微球球體來的小，因此可證明這個製程合成之 AZO 微球球體晶體品質好，適合進行光學與電學應用。

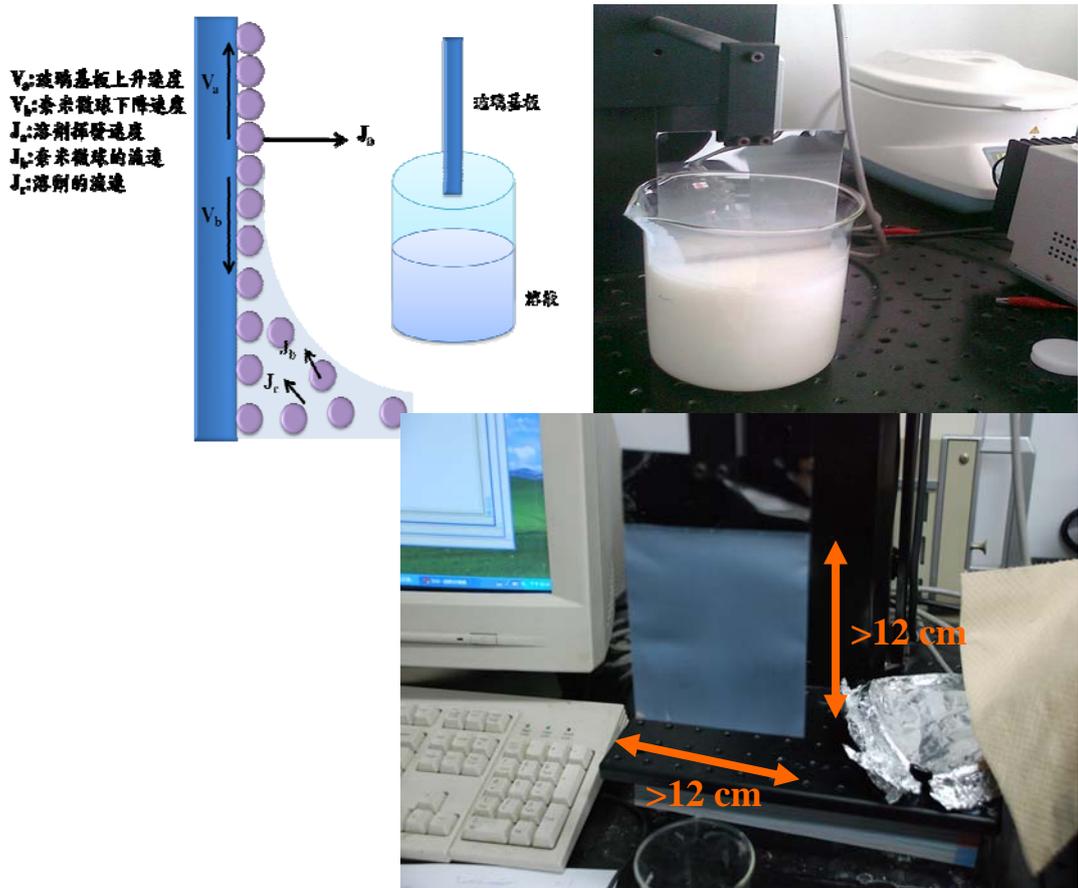


圖六、不同(AI/Zn)摻雜比例之 AZO 微球球體光致發光光譜

二、大尺寸 AZO 微球自組裝結構製作

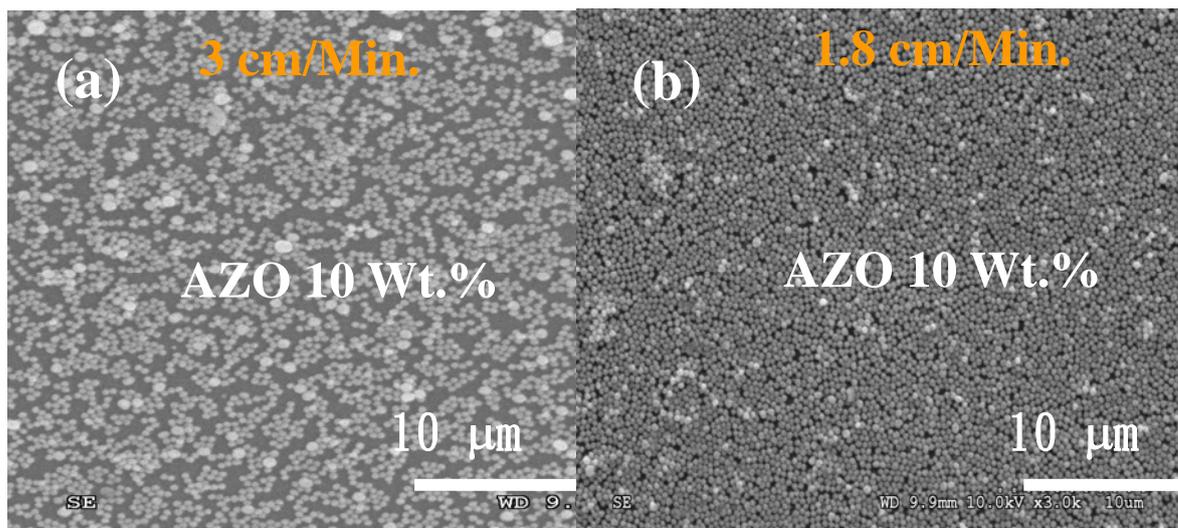
(1)AZO 微球單層自組裝結構製作

將基板以 RCA 製程完整清洗一次，並以吹氣槍與烘乾板得到清洗乾淨的基板。並將基板一端固定於沉浸式鍍膜系統上，使其緩緩沒入溶液中，並控制基板不同的拉昇速率(1.8cm/min, 3cm/min, 6 cm/min)，如圖七所示。



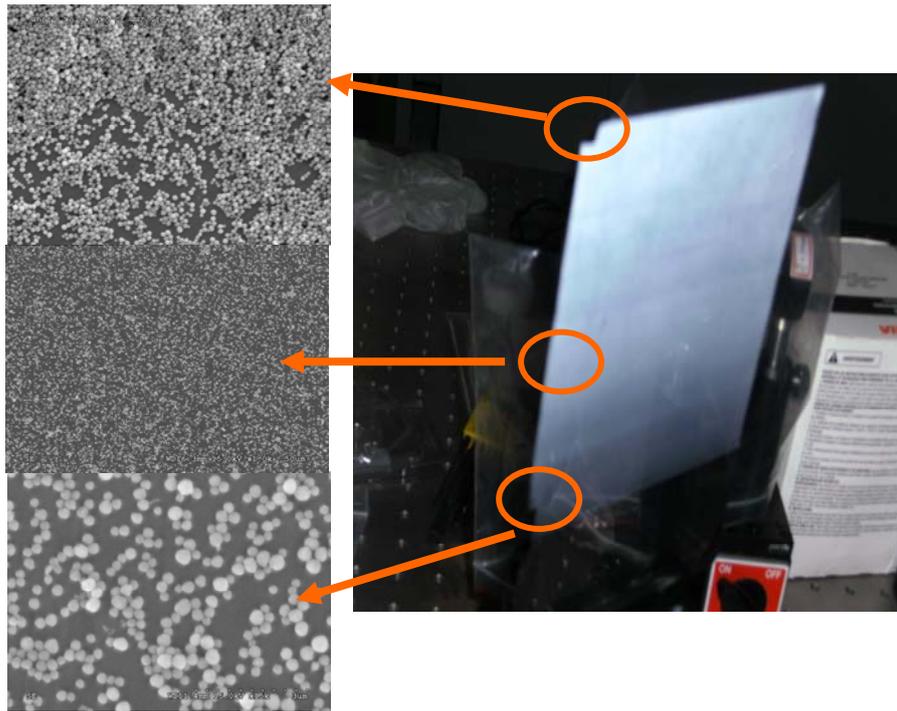
圖七、(a) 浸式鍍膜法製作 AZO 微米球單層結構示意圖, (b) 製作影像圖

(2) AZO 微米球單層自組裝結構製作於玻璃基板



圖八分別為不同拉升速度下 AZO 微球單層自組裝結構製作於玻璃基板上成品圖

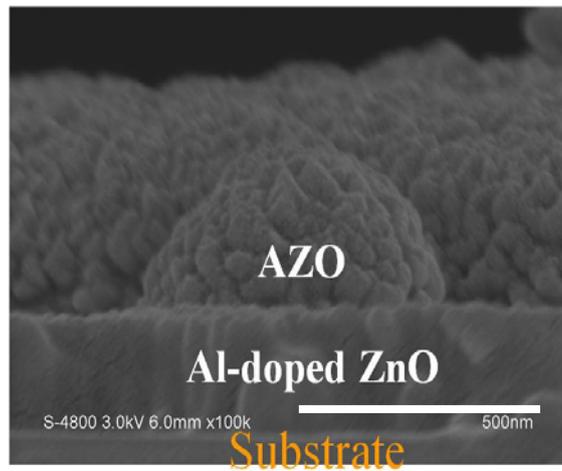
過去大量文獻研究以浸入式鍍膜法製作出 SiO_2 、PS 與 PMMA 等絕緣體微球單層自組裝結構，並進行了相關應用，從圖七(a)中可知有關浸入式鍍膜法製作單層自組裝結構最主要係使其中溶液的揮發速率 J_s 與黏滯性 ρ ，將影響由浸入式鍍膜法製作 AZO 單層自組裝結構的成果。雖然文獻中有關 AZO 微球單層自組裝結構並未見相關報導，但嘗試以不同拉升速率(1.8 cm/min、3 cm/min、6 cm/min 與 18 cm/min，發現 AZO 在 DEG:Ethonal=1:4 混合的溶液下，球體濃度在 10 wt.% 時以 3 cm/min 的拉升速率可以使 AZO 球體在大面積玻璃基版上獲得緊密堆積，隨著濃度不同與拉升速率不同，AZO 球體均可以以單顆分散形式散佈於基板上，以 SEM 檢測可以發現，在大尺寸下單層 AZO 微球仍具以均勻散佈特性，有並以相同製程製作於不銹鋼可撓式基板，發現由於基板為可撓式在裁切過程中因邊界效應產生捲曲，因此最後 AZO 微球將於可撓式基板邊角堆疊，如圖九，不利後續薄膜製程。



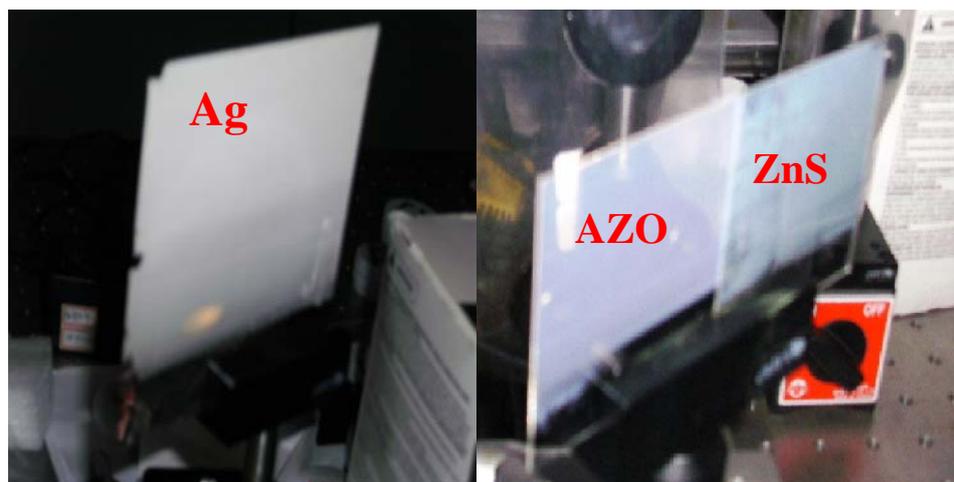
圖九、AZO 微球鋪排於可撓式不銹鋼基板 SEM 示意圖

三、大尺寸 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 與 Ag 薄膜製作

將緊密堆疊的單層 AZO 微球搭配鍍膜技術鍍上不同厚度的薄膜，可以將微球固定於基板上，形成一個具週期結構的二維光學散射器，如圖九所示。並試著以相同步驟分別將 AZO、ZnS 與 Ag 薄膜製作於 AZO 微球上方，可分別評估本結構是否可完整應用於各類薄膜太陽電池的可行性，如圖十所示。



圖十、緊密堆疊 AZO 微球鑲嵌於薄膜示意圖



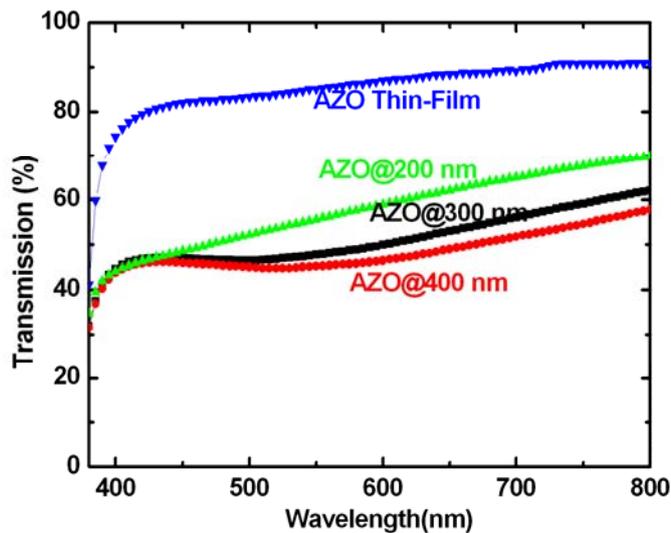
圖十一、緊密堆疊 AZO 微球鑲嵌於 Ag、AZO 與 ZnS 薄膜示意圖

四、玻璃基板上製作大尺寸 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜特性量測

(1) AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜光學特性量測：

結構穿透光譜量測：

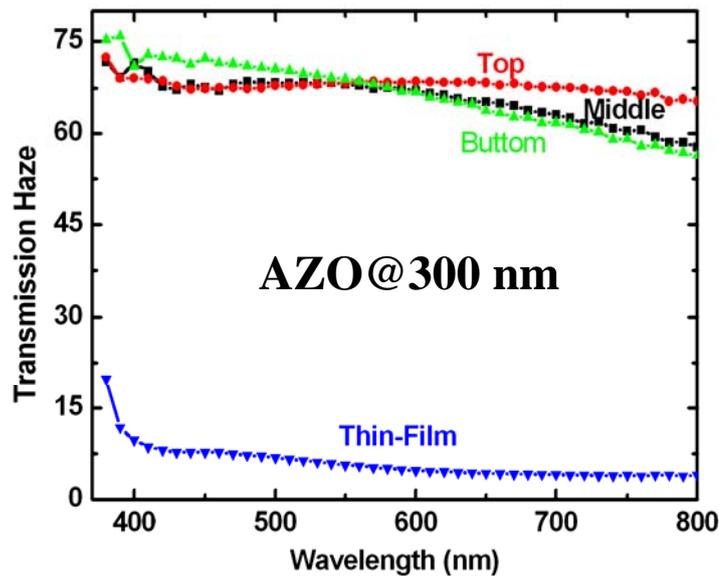
將不同尺寸 AZO 微球分別製作於玻璃基板上形成一個單層自組裝結構，並以厚度 150 nm 之 AZO 薄膜蒸鍍於其上方，形成一個單層 AZO 微球鑲嵌於 AZO 薄膜之結構，量測其對可見光(400-800nm)穿透光譜，可以進一步得知其對可見光的穿透效應，評估使用效應，圖十二為不同尺寸 AZO 微球其穿透光譜比較，為比較方便，圖十一中亦將 AZO 薄膜對可見光的穿透畫出，由圖可以很明顯看出，AZO 薄膜對可見光具有較高的穿透率，隨著微球尺寸增大，其穿透值越低，此乃由於 Scattering 之故，以 Mie-scattering 散射理論可以很明確的計算出所量得的結果，由研究得知，微球直徑(200~400 nm) AZO 微球在玻璃基板上形成的單層自組裝結構在可見光(400~800)其平均穿透率仍可達 50%，且球體越小其穿透率越小，此乃由於球體越小其球體表面相對較平整，以至於散射較小之故。

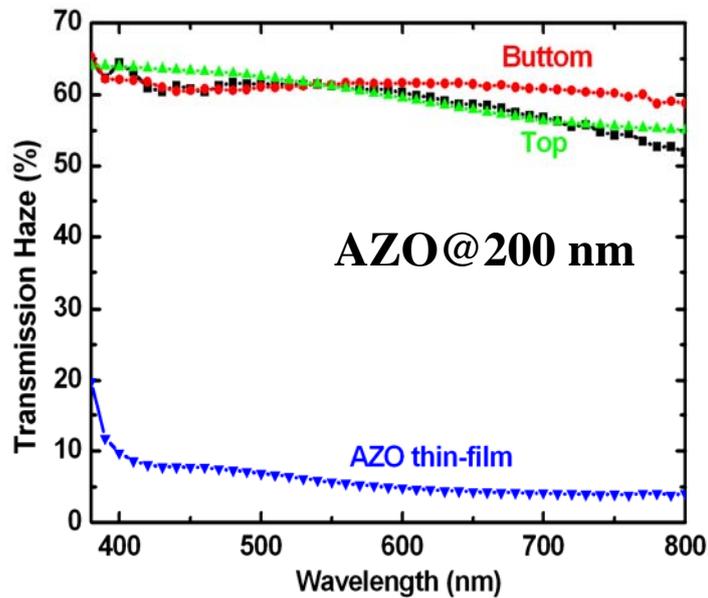


圖十一、不同 AZO 球體尺寸單層自組裝結構鋪排於玻璃基板之穿透光譜

(2) 玻璃基板製作大尺寸 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜光學特性均一性探討：

為評估製作大尺寸 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜於玻璃基板上整體光學均一性的影響，因此評估不同 AZO 球體尺寸製作之結構在基板不同位置其穿透霧度進行探討，圖十二為不同位置所量得之穿透霧度，為方便比較，圖中一樣畫出一個 AZO 薄膜之穿透霧度，以 AZO 薄膜看來，對可見光的穿透霧度平均約 10%，但具有 AZO 微球部分鑲嵌於 AZO 薄膜之結構其平均穿透光譜達 50%，而且從研究結果得知，針對不同尺寸大小 AZO 微球，在基板不同處，其穿透霧度變化不大，代表以玻璃基板所製作之微球薄膜其均一性良好，非常適合於薄膜太陽電池製作。

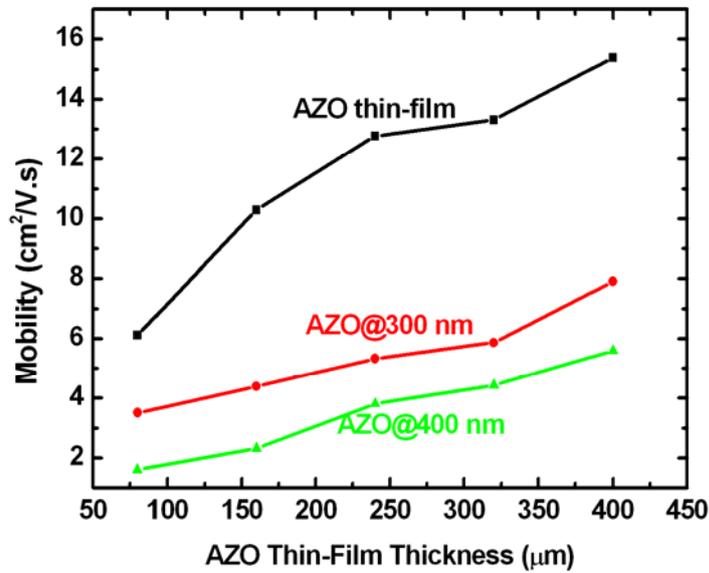




圖十二、不同 AZO 球體尺寸單層自組裝結構鋪排於玻璃基板之穿透光譜

(2) AZO 微球部份鑲嵌於不同 AZO 薄膜厚度電性量測

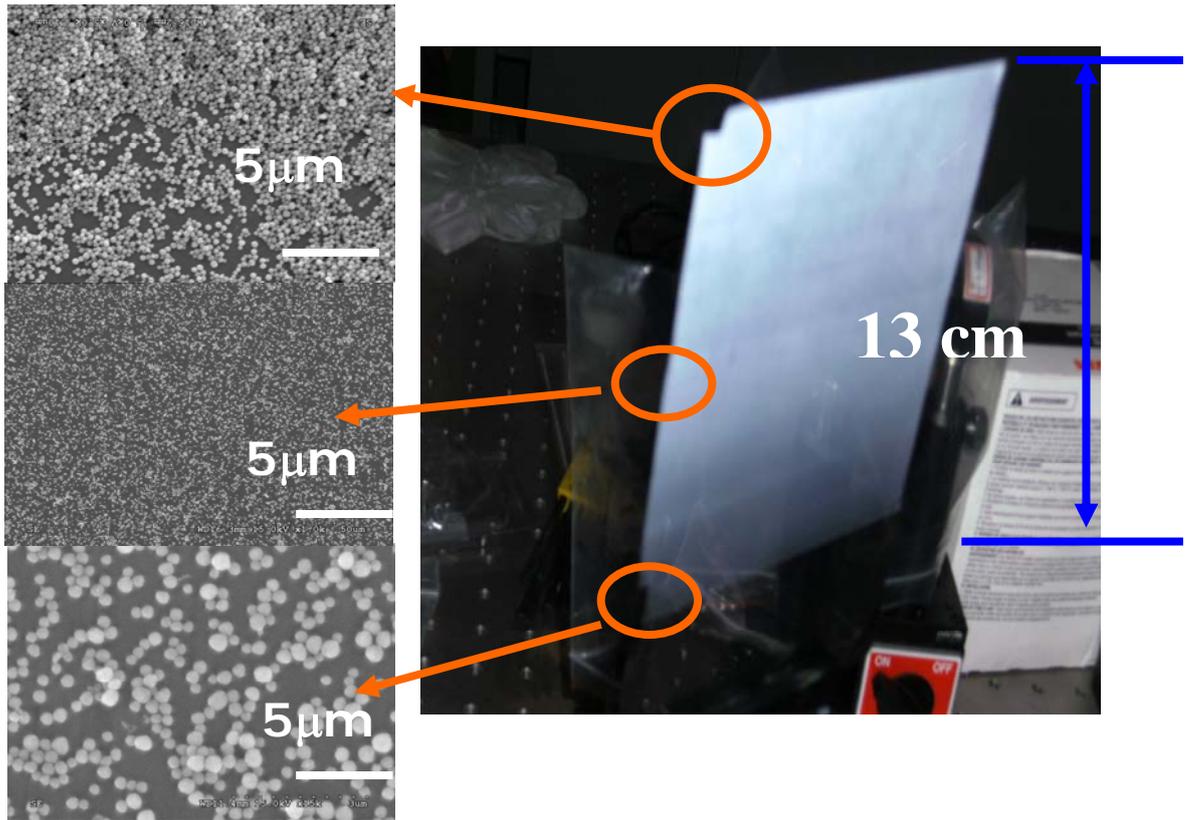
AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 薄膜中研究結果顯示具有良好的光學特性，與穿透霧度特性，以這個結構量測其電學特性，可以進一步瞭解其在太陽電池的應用，研究中以 Hall 量測系統分別對不同厚度的 AZO 薄膜進行 Mobility 量測，為了便於探討結構在電子 mobility 的效應，圖十三亦畫出不同厚度 AZO 薄膜之 mobility，由圖得知隨著 AZO 薄膜厚度增加，其 Mobility 亦隨著增加，所以明確看出，AZO 微球部份鑲嵌在 AZO 薄膜內其 mobility 受薄膜厚度影響，當薄膜厚度約等於微球尺寸時，具有最大的 mobility，這個結果非常適合於將 AZO 薄膜進行後續太陽電池應用的設計考量。



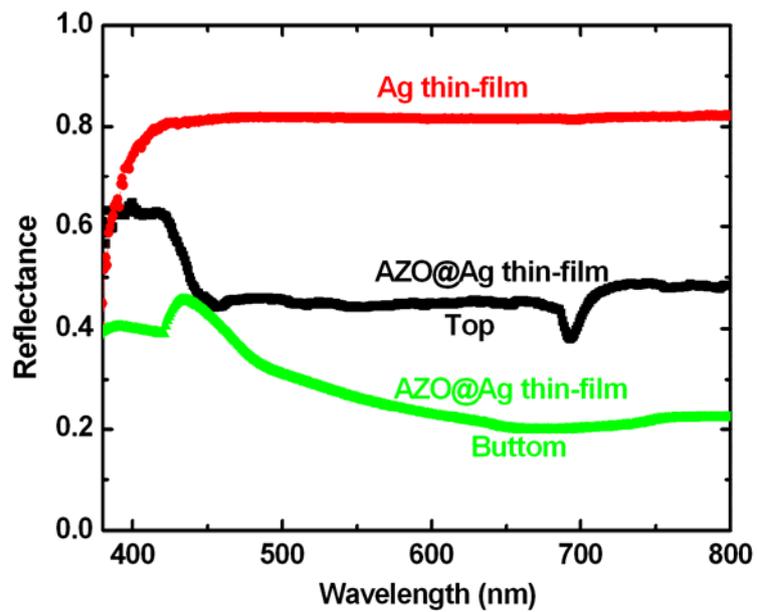
圖十三 不同 AZO 微球尺寸鑲嵌於 AZO 薄膜其 mobility 對 AZO 厚度的變化。

(3) 可撓式不銹鋼基板製作大尺寸 AZO 微球鑲嵌於 Ag 薄膜均一性探討：

在研究中除了以 SEM 分析 AZO 微球於可撓式(不銹鋼)基板的均一性量測基板上不同區域反射霧度進行評估，由於基板彎曲與裁剪，造成 Langmuir-Blodgett 技術應用於單層微球製作上，微球往下速度不均，導致微球於邊角處堆疊，因此造成不平整之效應，以反射與反射霧度評估其光譜不均勻所造成的影響，圖十四所示。



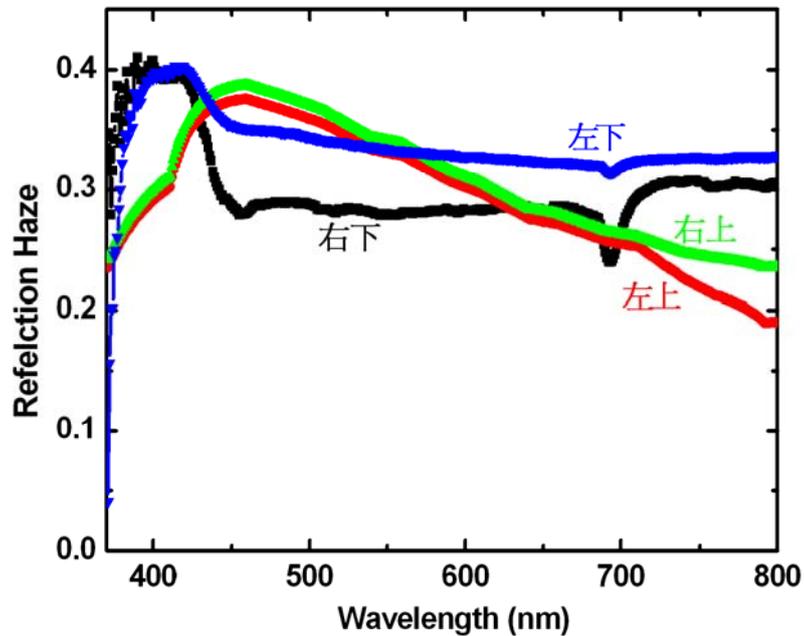
圖十四 可撓式不銹鋼基板上不同位置的 AZO 微球堆疊 SEM 圖



圖十五 AZO 微球鑲嵌於 Ag 中於可撓式基板上之反射光譜

圖十五為針對可撓式基板將 AZO 微球鑲嵌於 Ag 薄膜，不同位置其反射率的變化，由結果得知所製作的結果其反射率在可撓式基板下方具有較差的反射率，Ag 薄膜，其反射係數最高。

進一步對 AZO 微球鑲嵌在銀薄膜中可知，其反射霧度在大尺寸可撓式基板上，對短波長特別明顯，尤其對波長 400 nm 具有一個明顯的峰值，整體元件在波長 380~800nm 之平均反射霧度可達 35%，如圖十六，具光捕捉效果。

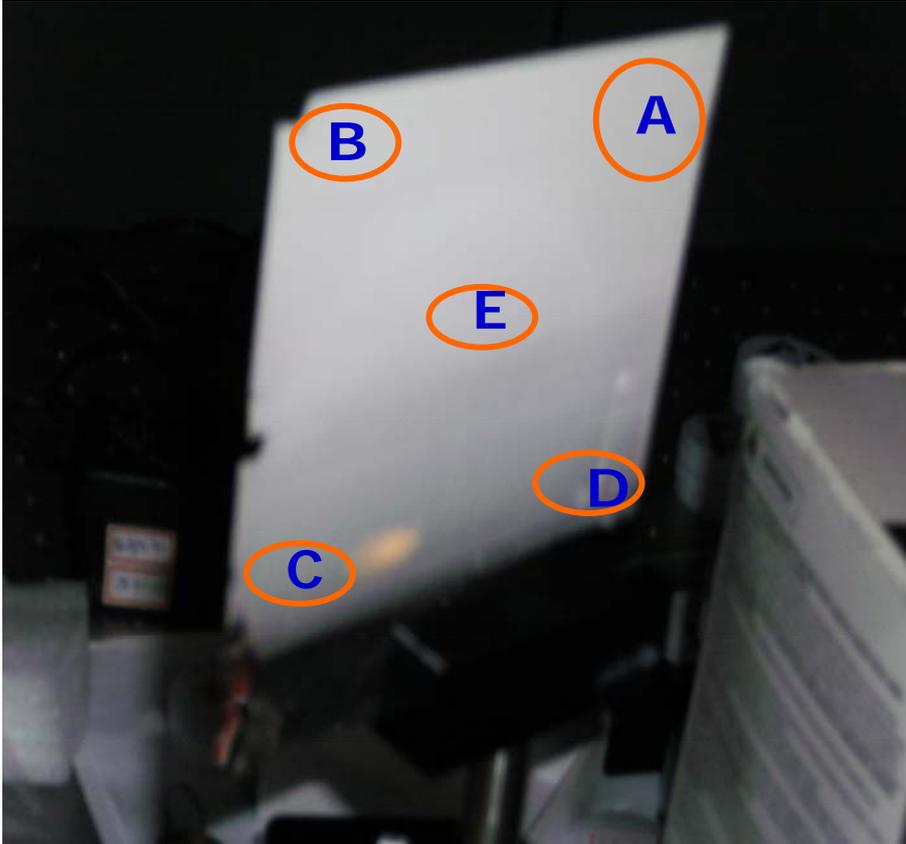


圖十六、單層緊密堆疊 AZO 微球鋪排於可撓式不銹鋼基板部份鑲嵌於 Ag 薄膜反射霧度

(3) 可撓式不銹鋼基板製作大尺寸 AZO 微球鑲嵌於 Ag 薄膜電性探討：

將 AZO 微球鑲嵌於 Ag 薄膜中分別針對不同位置電性進行量測與探討，可以得到一個完整的 AZO 微球因為在不銹鋼基板上分佈不

均勻所造成的電學不均效應，如圖十七所示，很明確的得知在可撓式基板上即便鑲嵌在 Ag 薄膜上方，其電阻值分布仍呈現明顯不均，將倒致應用於薄膜太陽電池電性短路。



Location	Resistance
A	0.46 (W)
B	0.39 (W)
C	0.42 (W)
D	1.22 (W)
E	1.43 (W)

圖十七 大尺寸 AZO 微球鑲嵌於 Ag 薄膜製作於可撓式基板電性量測

四、結論

本研究目前已能達到將不同尺寸(100~300nm)、摻雜濃度(1~2%)氧化鋅微球均勻鋪來在大尺寸(10x10 cm) 玻璃基板上，將 AZO 微球部份鑲嵌於 AZO 與 ZnS 薄膜中，其穿透霧度良好，具有光捕捉效能，但對於在可撓式不銹鋼基板的製作上，在基板中間仍可得到良好的薄膜特性，而在基板邊角處，由於基板的不平整，影響微球的堆積，造成不適用情形，在後續應用於薄膜太陽電池上必須予以切除，但其整體的面積仍可達 10x10 cm 以上，由於結構製作簡單、成本低廉且可與超薄、染料敏化、全量子點等前瞻太陽電池做結合，實際效能有待 n-type 或 p-type 皺褶結構完成後即可進行實體元件驗證。

肆、參考文獻

- [1]Campbell, Patrick, Green, Martin A., “Light trapping properties of pyramidally textured surface,” 62, 243-249 (1987)
- [2] Tudor N. Buican, Miriam J. Smyth, Harry A. Crissman, Gary C. Salzman, Carleton C. Stewart, and John C. Martin, “Automated single-cell manipulation and sorting by light trapping,” 26, 5311 (1987)
- [3]Claus H. and Rudolf H. Morf, “Submicrometer gratings for solar energy applications,” Appl. Opt. Vol.34. No.14, pp. 2476-2482 (1995)
- [4]J. Zettner, M. Thonissen, T. Hierl, R. Brendel and M. Schulz, “Novel porous silicon backside light reflector for thin silicon solar cell,” Progress in Photovoltaics Vol.6, pp.423-432 (1998)
- [5]L. Zeng, Y. Yi, C. Hong, J. Liu, N. Feng, X. Duan and L. C. Kimerling, “Efficiency enhancement in Si solar cells by textured photonic crystal back reflector,” Appl. Phys. Lett. 89, 111111-111113 (2006)
- [6]R. Groenon, J. Loffler, P. M. Sommeling, J. L. Linden, E. A. G. Hamers, R. E. I. Schorpp, M. C. M. van de Sanden, “Surface textured ZnO films for thin film solar cell application by expanding thermal plasma CVD.” Thin Solid Film.392 226-230 (2001)
- [7]Svetoslav Koynov, Martin S.Brandt, “Black nonreflecting silicon surface for solar cell” Appl. Phys. Lett. 88.203107(2006)
- [8] K. J. Chen, T. H. Fang, F. H. Fang, F. Y. Hung, L. W. Ji, S. J. Chang, S. J. Yiung, Y. J. Hsiao, “The crystallization and physical properties of Al-doped ZnO nanoparticles,” Appl. Surf. Sci. 254, 2791-2795 (2008)
- [9] J.A. Anna Selvan, Alan E. Delahoy, Sheyu Guo, Yuan-Min Li, “A new light trapping TCO for nc-Si:H solar cells,” Solar Materials &

Energy. 90, 3371-3376 (2006)

- [10] Linwei Yu, Benedict O'Donnell, Pierre-Jean Alet, Pere Roca, Cabarrocas, "All-in-situ fabrication and characterization of silicon nanowires on TCO/glass substrates for photovoltaic application," 94, 1855-1859 (2010)
- [11] Aswin Hongsingthong, Ihsanul Afdi Yunaz, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai, "Preparation of ZnO thin films using MOCVD technique with D₂O/H₂O gas mixture for use as TCO in silicon-based thin film solar cells," 95, 171-174 (2011)
- [12] Zusing Yang, Chia-Ying Chen, Huan-Tsung Chang, "Preparation of highly electroactive cobalt sulfide core-shell nanosheets as counter electrodes for CdZnSSe nanostructure-sensitized solar cells" , 95, 2867 (2011)
- [13] D.H. Levi, H.R. Moutinho, F.S. Hasoon, B.M. Keyes, R.K. Ahrenkiel, M. Al-Jassim, L.L. Kazmerski, R.W. Birkmire, "Bottom-up grown ZnO nanorods for an antireflective moth-eye structure on CuInGaSe₂ solar cells," 95, 2650 (2011)
- [14] Ping-Chen Tseng, Peichen Yu, Hsin-Chu Chen, Yu-Lin Tsai, Hao-Wei Han, Min-An Tsai, Chia-Hua Chang, Hao-Chung Kuo, "Angle-resolved characteristics of silicon photovoltaics with passivated conical-frustum nanostructures," 95, 2610-2615 (2011)
- [15] Y. Wang, L. Chen, H. Yang, Q. Guo, W. Zhou, M. Tao, "Spherical antireflection coatings by large-area convective assembly of monolayer silica microspheres," 93, 85-91(2009)