

**行政院原子能委員會**  
**委託研究計畫研究報告**

**降低太陽能電池模組之接點電阻之研究**

**To Reduce Contact Resistance for Amorphous Silicon Solar  
Cells On Stainless Steel Substrate**

**計畫編號：1022001INER012**

**受委託機關(構)：國立高雄應用科技大學**

**計畫主持人：艾和昌 教授**

**聯絡電話：(07) 3814526 #5414**

**E-mail address：herchang@cc.kuas.edu.tw**

**核研所聯絡人員：蔡丁貴**

**報告日期：102 年 12 月 19 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、文獻回顧	4
參、研究方法與實驗	7
一、研究方法	7
二、樣品材料	9
三、實驗設備	12
(一)、太陽電池模組封裝機	12
(二)、拉力試驗機	13
(三)、工業紀錄萬用電表	14
四、拉力強度	15
肆、結果與討論	16
一、太陽電池模組封裝參數探討	16
二、剝離強度探討	17
三、串接接點電阻探討	19
伍、結論與未來工作	26
陸、參考文獻	27

## 降低太陽能電池模組之接點電阻之研究

### To Reduce Contact Resistance for Amorphous Silicon Solar Cells On Stainless Steel Substrate

(計畫編號：1022001INER012)

艾和昌 朱章勇

國立高雄應用科技大學模具系暨應用工程科學研究所

#### 摘要

太陽能電池模組生產過程中，效率與可靠度是兩個重要的優化指標，太陽能電池模組壽命至少需20年，在太陽能電池至製作完成模組過程有太陽能電池串接製程、模組層壓製程及模組檢測與品管，其中串接製程與封裝層壓製程是影響模組發電效率的關鍵過程，然而目前在整廠設備輸出的生產製程中，針對不同太陽能電池原廠設備所提供的製程參數往往不是最佳的！

本研究主要目的是降低非晶矽不鏽鋼太陽能電池模組之接點電阻，實驗工作分為兩部分執行；一著重於非晶矽不鏽鋼太陽能電池之模組封裝，由於不鏽鋼片的熱膨脹係數較一般矽晶片高出甚多，封裝後模組表面易產生波浪細紋，本研究對波浪紋的產生影響發電效益的影響作探討，結果顯示因表面之波浪紋使功率衰退 4.84%；二為探討不鏽鋼與焊線之焊接效應，以往層壓製程上非晶矽薄膜不鏽鋼太陽能電池，在太陽能電池串接部份都使用耐熱絕緣膠帶或金屬膠帶(如：銅箔或鋁箔)，利用層壓壓力使不鏽鋼與焊線貼合，而本研究利用恆溫電烙鐵於焊接溫度 425°C 時，拉力試驗之剝離強度已達到 2.28N/mm。

關鍵字：非晶矽薄膜不鏽鋼太陽能電池、剝離強度、太陽能電池模組封裝

## **Abstract**

The manufacturing processes are key factors to achieving optimum modules with highly efficiency and reliability. The minimum life expectancy of commercialized solar modules is 20 years. The processes include the soldering process, performed in a tabbing machine, the lamination process, performed in a laminator, as well as simulation and quality control. Especially, the soldering process and lamination process are responsible for the most final power loss of PV modules. In fact, the parameters used by turnkey technology may not be optimal parameters for the process because of the variation of cells from different suppliers.

This research is aimed to reduce the contact resistance for the modules made by the amorphous silicon solar cells on the stainless steel substrate. The experiment will be divided into two parts; the first part focused on the encapsulation of the amorphous silicon solar cells on the stainless steel substrate, and the second part focused on the tabbing effect for the ribbons on the stainless steel substrate. The former should consider the module power loss due to the encapsulation process. There are several wave patterns on the surface of the module because of the thermal expansion difference between the EVA and the stainless steel substrate. The results show the power loss 4.84% for the encapsulation process. The heat insulating tapes or metal tapes, such as copper or aluminum foil, is used in the tabbing process to connect these solar cells in series. In this study, the soldering the ribbon and the stainless steel by a thermostat electric iron with temperature at 425 °C. The results show the peel strength reached 2.28N/mm by tensile testing.

**Keywords:** Amorphous silicon solar cell on stainless steel substrate, Peel strength, Photovoltaic module encapsulation.

## 壹、計畫緣起與目的

全球太陽電池需求量仍以矽晶太陽電池(佔 80%以上)居首，矽晶體系分為單晶矽(Single Crystalline Silicon)及多晶矽(Polycrystalline Silicon)兩種，且量產的矽晶太陽電池效率已可高達 20%[1]。目前矽晶體系太陽電池仍存在許多缺點，受到晶圓製造需較多的能量及高純度材料提煉，使得成本降低較不易達成。薄膜太陽電池製造對能源需求低及材料消耗少(一般薄膜太陽電池厚度約為 1~10  $\mu\text{m}$  左右)[2]，且可製作於金屬基板材料上，因此可實現低成本、大面積的工業化量產，為其發展優勢[3]。

核能研究所開發之非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池，是在可撓式不鏽鋼基板(SUS 430)上製備非晶矽半導體層(amorphous silicon, a-Si)[4]。目前發展矽薄膜太陽電池需具有低成本優勢，然而矽薄膜太陽電池厚度相當薄且脆弱，因此對於模組端焊接過程不同於一般結晶矽太陽電池，特別需考慮能防止半導體層破壞及短路的情況，此外，又必須有良好導電接觸，以往層壓製程上非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池，在太陽電池串接部份都使用耐熱絕緣膠帶或金屬膠帶(如：銅箔或鋁箔)，並利用層壓壓力使焊線(Ribbon)與不鏽鋼能貼合導引出電流。因目前非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池串接，其不鏽鋼基板與焊線非由金屬熔接而易造成接觸電阻增加，本研究目的為尋找適合的焊接方式，將非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池之背接觸面(負極)進行有效的焊接，達到能降低接觸電阻與不損壞半導體層，進而在太陽電池封裝後，使模組光電轉換效率有所增益。

## 貳、文獻回顧

Kore 等人[5]利用電磁衝擊焊接接合 1mm 厚度鋁板與 0.25mm 厚度不鏽鋼，並控制影響參數為能量、偏移間距與線圈幾何形狀之拉伸剪切力等，對不鏽鋼與鋁板之焊接強度進行探討。然而鋁與不鏽鋼是不容易相互焊接，因為兩者熔點溫度的差異，在焊接中於能量 5.18kJ 下可達到 24.8MPa 之拉伸強度，當偏移間距為 1.5mm 和能量為 5.18kJ 時，拉伸強度提升至 35.5MPa。研究結果得知線圈橫截面面積的減少，增加的電流密度，導致焊縫的拉伸剪切強度的增加；當提升放電能量進行焊接產生的磁場也相對增加，從而增加對於固定隔開距離之焊接拉伸與剪切強度。

Kundu 等人[6]利用擴散焊接研究鈦合金與不銹鋼接合之界面反應和強度特性，兩者間以 Ni 作為金屬間化合物。研究結果得知接合溫度和時間是擴散焊接中最重要的因素，因為直接影響兩者材料擴散接合之接合面，常溫下力學性能的擴散接合面與接合溫度的變化，在低溫度下接合強度由於凝聚界面處表面不完整，則造成焊接強度不足之結果；接合時間與擴散接合接面力學性能的變化，由於接合時間不足在拉伸強度和剪切強度明顯無法達到一定水準之強度，並導致不完整塑性破壞與表面不平整。

Yildirim 及 Kelestemur[7]利用硼摻雜  $\text{Ni}_3\text{Al}$  之金屬間化合物與 AISI 304 不銹鋼作固態焊接，實驗使用電阻點焊機，其焊接溫度為  $850^\circ\text{C}$  左右並保持 10sec 的時間和壓力 6MPa 於表面上作焊接，並使用 SEM、EDS 和 XRD 等方法來分析界面接合特性。研究表示  $\text{Ni}_3\text{Al}$  金屬間化合物可以固態接合，然而隨著焊接溫度提升，最大應力也

會相對性增加，此外，焊接材料之界面區域之彈塑性分析顯示，接合材料在焊接處之殘餘應力有較大之熱膨脹發生。

郭[8]以 Nd:YAG 雷射鐳接對 0.3mm 厚度之不銹鋼與黃銅薄板實施不加填料金屬對接實驗，探討 Nd:YAG 雷射焊接對焊道之機械性質與顯微組織之影響。不銹鋼與黃銅對接實驗參數以漸升波波形、脈衝寬度 2ms、脈衝頻率 6Hz 及焊接速度 6cm/min，結果得到平均抗拉強度 282MPa。研究結果得知不銹鋼與黃銅並未能完全相互接合，於熔融交界處呈現兩種母材成份交織的現象，而銅的熔點較低容易於沃斯田鐵晶界產生液相薄膜，固定應力下貫穿晶界形成沿晶破裂，因此不銹鋼與黃銅異種金屬對接，較適合用於強度要求不高之情況。

Lee 等人[9]探討鈦與不鏽鋼金屬材料之異種接合，實驗將兩種金屬先進行表面拋光，且利用丙酮作超音波震盪清潔表面氧化物，實驗一採用 Ti-Zr-Ni 薄膜作為中間層之填充物，在固相與液相溫度 844°C 和 875°C 下，分別探討熱分析；實驗二為分別濺鍍 Ni、Cr 和 V 在不鏽鋼與鈦之間作為中間層，且使用紅外線加熱，並探討其微結構與拉伸強度。結果顯示採用三個連續的中間層 Ni-Cr-V 系和鈦合金填料，由於接面之結合強度超過鈦的強度(480MPa)，在 900°C 下進行 10 分鐘熱處理無任何脆性鈦或  $\sigma$  相析出，則表示 Ni-Cr-V 系多層金屬作為中間層，是可讓鈦與不鏽鋼兩種不同之金屬材料相互接合。

洪[10]利用直流式微電阻鐳之對接 AISI 316 不銹鋼細線，探討鐳接參數對焊接區域之溫度場影響。研究結果顯示，鐳接電流與時

間直接影響微電阻銲之焊接區域溫度場變化，其不銹鋼細線接觸界面之電流密度與溫度皆呈現均勻之分佈。經由金相顯微鏡發現銲接區域之範圍大小，隨著銲接電流增加而增加，且微電阻銲接之接觸面顯微組織明顯受銲接參數變化之影響，而銲接面之抗拉強度與硬度值會隨電流升高而增加，且銲接之電流值受限於某一臨界值，若電流超過臨界值時，將導致焊接過程中發生噴濺(Splashing)。

經由上述文獻探討中發現，欲將不銹鋼與其他金屬作焊接接合，其接合溫度大多超過 800°C，然而非晶矽薄膜太陽電池處理溫度約為 150°C 至 300°C 範圍內[11]。當焊接溫度過高時 n-i-p 半導體層受溫度影響，導致晶界層融化或破裂造成太陽電池 p-n 二極體接層失效，欲將非晶矽薄膜不銹鋼太陽電池與 Ribbon 作焊接接合，控制製程焊接溫度為一重要之因子，而由 Yilmaz 及 Çelik 研究中得知不銹鋼與銅之接合溫度條件範圍為 800-850°C [12]，因此勢必在不銹鋼與 Ribbon 之間作表面改質或鍍層處理，進而降低兩者之接合溫度，往後研究方向會著重於不銹鋼與 Ribbon(Sn-Pb-Ag-Cu)之金屬間化合物(Intermetallic compound)，利用不銹鋼或焊線表層金屬鍍膜層來達到焊接成效，並期望能有效降低接點之電阻，提升整體非晶矽薄膜不銹鋼太陽電池之發電效率。



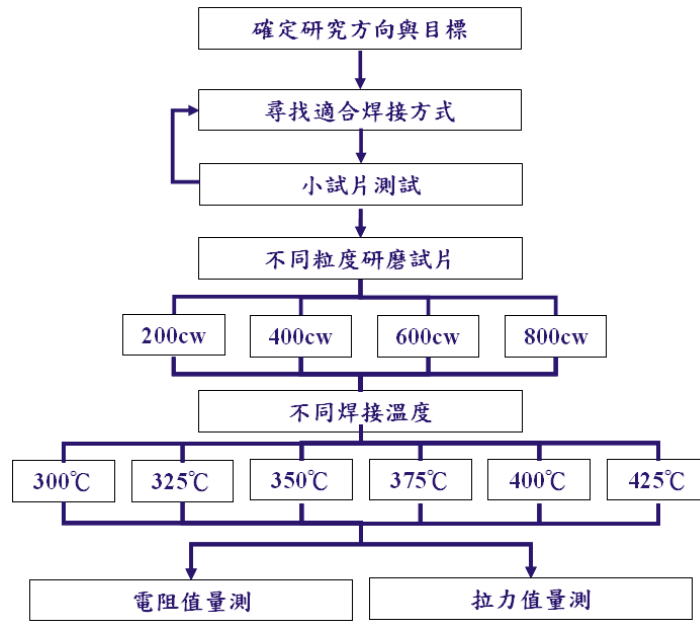
## 參、研究方法與實驗

### 一、研究方法

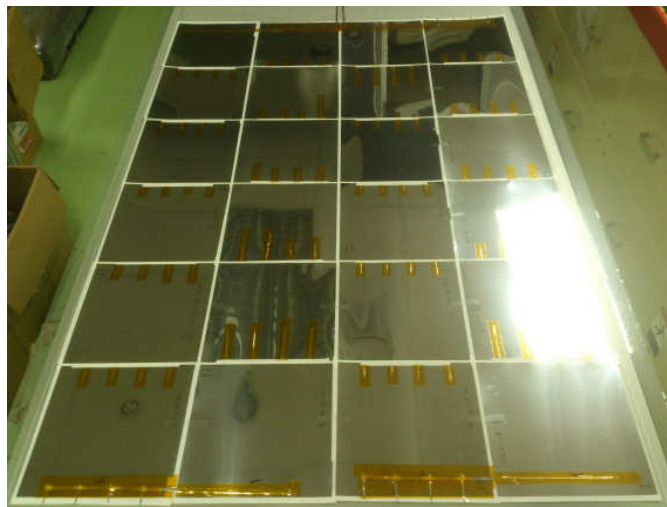
本研究方法是先將尺寸為 20×20 mm 不鏽鋼試片(型號為 SUS 430，厚度為 100 μm，屬於肥粒系不鏽鋼)表面由 200cw~800cw 號數砂紙研磨除去氧化層，並使用丙酮擦拭研磨後的表面，在其表面上依約 5 mm 等間距點上錫膏(直徑約 2 mm，重量約 1g) 作為接著劑，然後貼附厚度為 0.12 mm 之焊線(成分為 Sn62/Pb36/Ag2)，採用恆溫控制的烙鐵調整溫度由 300°C 增加至 425°C，每次提升 25°C 進行焊接，如圖一所示。

模組封裝方面，則利用量產型太陽電池模組層壓機，將尺寸 24×24 cm 之非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池背接觸面採用耐熱絕緣膠帶固定串接(圖二所示)，並依序於玻璃載台上鋪設杜邦 ETFE 膜、EVA、非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池、EVA、白色 Tedlar，藉此疊層順序將太陽電池移除(圖三所示)，即可製作 10×10 cm 之封裝測試片，其封裝熱壓製程如下：

- (1)抽真空：把上述疊層件放到太陽電池真空模組的下室。熱壓封裝機的上、下兩室同時抽真空。
- (2)加熱：熱壓封裝機的上下兩室保持真空，加熱模組，並維持4分鐘。
- (3)加壓：模組逐漸加壓到80 kpa。
- (4)保溫固化：在固化溫度130°C下，恆溫固化，維持13分鐘。
- (5)冷卻：完成後，取出模組，放置室溫冷卻一段時間後，將玻璃與模組分離。



圖一、實驗流程圖



圖二、背接觸面貼附絕緣膠帶



圖三、封裝測試片疊層

## 二、 樣品材料

(1)不鏽鋼基板：不鏽鋼基板:型號為 SUS 430，厚度為 100um，表面經研磨處理後，表面粗糙度(Rms)值約為 18.34nm。屬於肥粒系不銹鋼，其標準化學成份為 16~18%的 Cr、0.03%的 S、0.04%的 P、1%的 Mn、0.75%的 Si 及 0.12%的 C。此類不銹鋼不僅耐腐蝕且具有磁性，將來可使用於 Roll to Roll 製程，大量生產降低成本(圖四所示)。

(2)焊線(Ribbon):本實驗採用含鉛焊錫為太陽電池模組廠所廣泛使用之材料，金屬成分中含有鉛可使焊接溫度下降40~50°C，焊線厚度0.12 mm、寬度2 mm，焊料厚度約20 μm，其原廠標示成份為錫-鉛-銀，含量百分比分別為62%的Sn、36%的Pb、2%的Ag (圖五所示)。

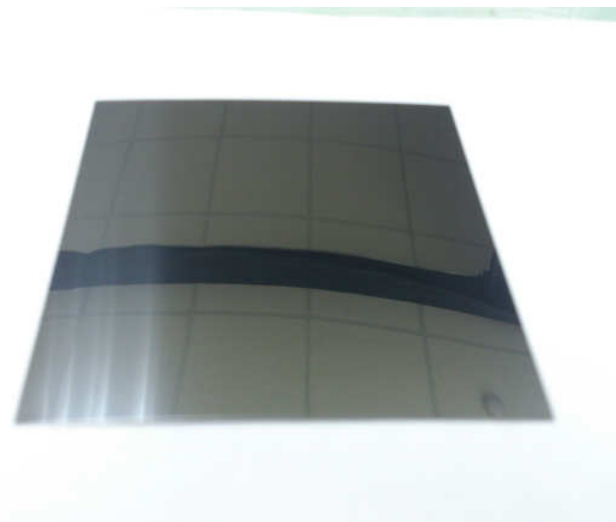
(3)錫膏：焊線與不鏽鋼之間接合，採用昇貿科技公司所生產之無鉛低溫錫膏作為添加劑，熔點約220°C，粒徑為20~38μm，黏度(Viscosity)為200±30Pa-s，其化學成分為96%的Sn、3%的Ag、0.5%的Cu (圖六所示)。

(4)杜邦 ETFE 膜[13]：ETFE(乙烯-四氟乙烯)，接近 Teflon 含氟聚合物。折射率為 1.38，具有 97%以上之高透光度，厚度 50 μm 之薄膜，有高透光率，具有抗輻射性、耐候性、抗撞擊性、對所有化學品耐腐蝕，其電絕緣性不受溫度影響，拉伸強度高與優異的機械韌性，適於製作耐腐蝕件，減磨耐磨件、密封件、絕緣件和醫療器械零件(圖七所示)。

(5) EVA：為醋酸乙烯與乙烯共聚物，折射率為 1.49，具有高透光

性、高交聯固化度、優越的黏著強度性、極高的容積電阻性、優越的機械強度、優越的光熱穩定性、耐腐蝕性、容易使用等[14]。本實驗採用三井化學所生產之 EVA 作為封裝用之填充材料，材料厚度 0.6mm，固化溫度為 150°C，是一般太陽電池模組常用之封裝材料(圖八所示)。

(6) TPE背板材料：採用台虹科技公司所生產之標準型太陽電池模組背板材料(Backsheet) 其材料疊層順序為Tedlar、膠層、PET基材、膠層、抗UV塗層，總厚度約為350 $\mu$ m，具抗紫外線和耐候性。主要功能包括作為太陽電池模組的背板材料、防潮、保護實物的電線及其他敏感元件、電氣絕緣和減少電池的工作溫度(圖九所示)。



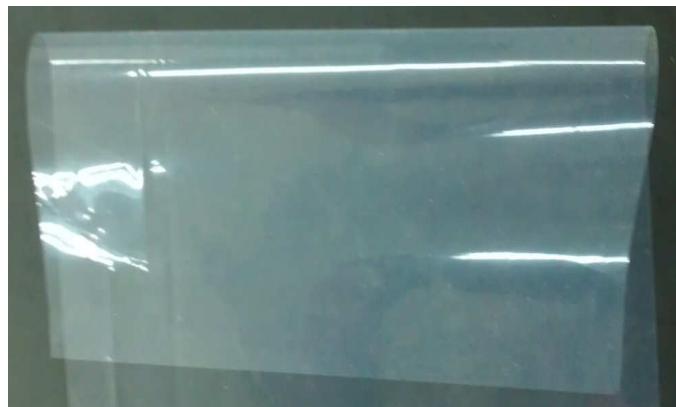
圖四、SUS430不鏽鋼試片



圖五、太陽電池焊線



圖六、低溫錫膏



圖七、杜邦ETFE膜



圖八、EVA



圖九、TPE背板

### 三、 實驗設備

#### (一)太陽電池模組封裝機

太陽電池模組封裝主要設備為本系現有之真空封裝機 (Lamminator)，生產公司為 Nisshinbo(日清坊公司)，型號為 Lam1222S(圖十所示)，機台可使用之封裝範圍，長度最大為 2200 mm，寬度為 1200 mm，一般封裝機可作最大厚度為 25 mm 的封裝

製程，本實驗室考慮學術研究，所以特別訂購量產型、最大厚度可達 35 mm 的機台。該機器的操作溫度最大為 180°C，誤差值約在±5°C 左右，加熱速率從 30°C 至 150°C 可在 30 分鐘內完成，溫度控制是透過 PID 調控，冷卻方式係利用空氣自然冷卻，亦可注入純水做液態冷卻，最大工作的壓力值介於 0 到 1 大氣壓之間，工作台面全開至全閉合所需時間僅需 20 秒。



圖十、太陽電池模組封裝機

## (二)拉力試驗機

本實驗量測不鏽鋼與焊線之拉力值，係使用昇群科技公司所製造之太陽電池拉力試驗機(圖十一所示)，其型號為 MOGRL009，該試驗機上採 AIKOH 公司所製造之電子拉力計，可量測拉力範圍為 ±50Kg，精度為±0.2%，另搭配昇群開發的軟體介面可即時記錄拉力

值。由於研究上需要，設置三種不同角度之拉力量測平台，分別為45°、90°、180°，其中45°與90°主要為材料黏著度實驗用，180°為純材料破壞點拉力實驗使用。



圖十一、拉力測試機

### (三)工業紀錄萬用電表

本實驗量測焊接後不鏽鋼與焊線之接點電阻，採用FLUKE289均方根值萬用電表(圖十二所示)，其量測0.025%的基本直流精確度與設有LoZ，可消除殘留的電壓，量測電阻時配合兩個端子夾，在低電阻50Ω範圍內量測接點電阻值，且精確值為±0.005%，最低電阻值可量測到0.001Ω，並同時記錄最大、最小與平均電阻值作為參考之依據。

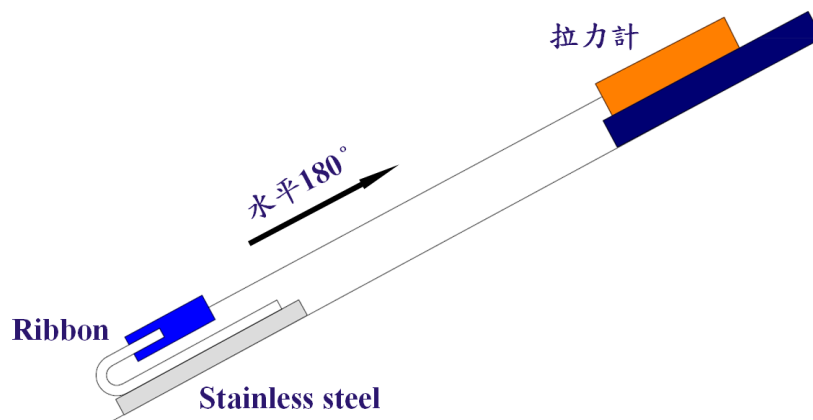




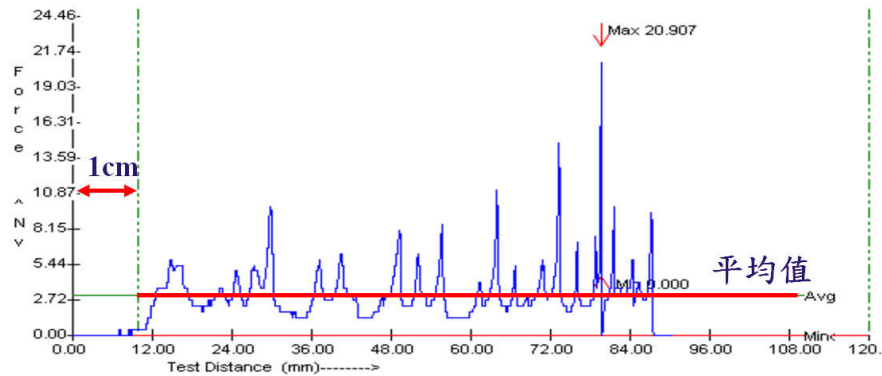
圖十二、工業紀錄萬用電表

#### 四、 拉力強度

本實驗以Mogri ST-RX N002拉力測試機配合AIKOH數位式拉力計量測不鏽鋼試片與焊線於 $180^\circ$ 之剝離強度(Peel Strength)(圖十三所示)。將拉力計之夾頭以 $180^\circ$ 夾持並固定，以 $120\text{ mm/min}$ 之速度進行拉力測試，取樣長度為 $10\text{ mm}\sim 100\text{ mm}$ (圖十四所示)。分別量測不鏽鋼在不同的焊接溫度及研磨粒度的剝離強度，並計算其平均值。



圖十三、拉力設置示意圖



圖十四、材料拉力取樣長度為 10 mm~100 mm

## 肆、結果與討論

### 一、太陽電池模組封裝參數探討

本實驗室利用輕量化封裝材料杜邦 ETFE 膜，配合核能研究所研發之非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池封裝達到太陽電池模組可撓性，在封裝製程中表層材料杜邦 ETFE 膜與填充材料 EVA，經真空加熱時因受熱收縮，易造成太陽電池模組表面產生波浪紋(圖十五所示)，未來擬使用新型收縮率低的 EVA 填充材料進行製程改善。

電性檢測方面，在核研所提供 32 片非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池發電功率經由逐一檢測(表一所示)，經挑選出最大功率電流( $I_{pm}$ )較佳的 24 片太陽電池進行串接及封裝，式(3-1)為所有挑選出太陽電池之功率加總，最大功率為 16.71 W，經製成長寬為 1500×1000 mm 模組，由於封裝成模組後邊角處有波浪紋出現，藉太陽電池模組檢測機檢測該模組之電氣特性，圖十六為檢測之 I-V 曲線結果，模組最大功率值為 15.9 W，較原始功率總合值少 4.84%，其最大功率電流依然維持在 1.348 A，且單一太陽電池之最大功率電壓則由原始平均

值 0.528 V 下降至 0.492 V。

$$\sum_{i=1}^{24} P_i = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{24} = 16.71 \text{ W} \quad (4-1)$$

模組封裝表面波浪紋可能造成模組發電功率減少的探討，本實驗製作尺寸為 10×10 cm 之封裝試片，且封裝材料疊層為杜邦 ETFE 膜、兩層 EVA、白色 Tedlar，藉表二中之封裝製程參數組合下，結果顯示在封裝參數抽真空時間為 4 分鐘與未交聯前溫度為 80°C 時，測試片表面已無出現波浪紋；然而在抽真空時間為 3 分鐘與未交聯前溫度為 70°C 時，測試片表面有嚴重坑洞痕跡，研判因太陽電池與 EVA 從未交聯前溫度 70°C 升至保壓溫度 130°C 間，升溫過程的溫差造成填充材料 EVA 產生熱變形與熱收縮[15]，導致層壓過程中杜邦 ETFE 膜無法完全貼附於玻璃使加壓成形後模組表面出現瑕疵。

## 二、剝離強度探討

在不鏽鋼試片焊接方面，試片表面經不同號數之砂紙研磨後，並藉光學顯微鏡拍攝不鏽鋼試片之表面狀態，如圖十七所示；無研磨之試片表面幾乎呈現光滑，其表面粗糙度為 0.0217 μm，然而當研磨號數 200 表面粗糙度為 0.5397 μm；號數 400 表面粗糙度為 0.1075 μm；號數 600 表面粗糙度為 0.0678 μm；號數 800 表面粗糙度為 0.0501 μm。

本研究將所有不鏽鋼試片經研磨處理後進行焊接，並利用拉力測試所得之拉力值經由式(4-2)換算為剝離強度(Peel Strength)加以表示。

$$\sigma = F_{\text{average}} / W \quad (4-2)$$

其中  $\sigma$  為剝離強度；  $F_{\text{average}}$  為平均拉力值；  $W$  為焊線寬度。

圖十八所示，當焊接溫度為  $300^{\circ}\text{C}$  時，所有研磨粒度在此溫度下，不鏽鋼無法與焊線接合，其剝離強度值為零，主要原因為鉛錫合金溶點為  $183^{\circ}\text{C}$  於此溫度下已呈液相，但烙鐵加熱由焊線傳導至不鏽鋼表面因熱通量小，溫度傳遞慢造成無法接合[16]。試片經研磨粒度 200cw、400cw 及 800cw 研磨且焊接溫度在  $325^{\circ}\text{C}$  至  $400^{\circ}\text{C}$  下，不鏽鋼與焊線間之剝離強度呈線性增率；但焊接溫度於  $400^{\circ}\text{C}$  與  $425^{\circ}\text{C}$  間，試片經研磨粒度 200cw 與 400cw 研磨，兩者剝離強度則較無增加趨勢；在焊接溫度  $400^{\circ}\text{C}$  以下研磨後的試片( $375^{\circ}\text{C}$ )時，經研磨粒度 200cw 剝離強度唯一超過  $1 \text{ N/mm}$ (一般市售模組之太陽電池焊接剝離強度應達  $1.2\text{N/mm}$ )，其餘者均無法達到，研判因表面粗糙度大且接觸面積越多，使錫較易附著於不鏽鋼片表面；另從表三得知，4 種經研磨的不鏽鋼片試片，在  $425^{\circ}\text{C}$  焊接下，均能達市售太陽電池串焊要求的剝離強度，而經 600cw 研磨後的試片於焊接溫度  $425^{\circ}\text{C}$  時，其剝離強度最高可達  $2.28 \text{ N/mm}$ ，可見溫度還是提升剝離強度最主要的關鍵參數。

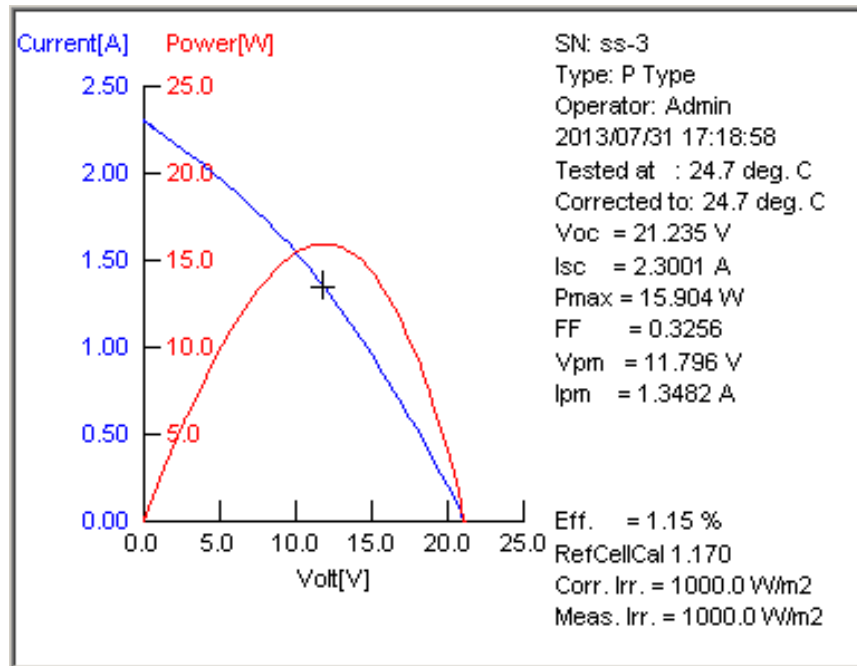
本研究也採用表面鍍層之方式來改善其焊接性質，將不鏽鋼試片表面利用直流/射頻濺鍍機製備銅薄膜，調整溫控電烙鐵恆溫至  $300^{\circ}\text{C}$ ，對具銅薄膜之不鏽鋼表面添加錫膏進行焊接。圖十九所示，若不鏽鋼試片表面銅鍍層不完整，則焊接無法達到接著效果，但不鏽鋼與焊線仍有局部反應呈現黏著狀態如紅圈處，拉開焊線後可觀察到部份銅薄膜已附著於焊線上，但因試片過小，於拉力測試時，採樣數據無法精確表示。

### 三、 串接接點電阻探討

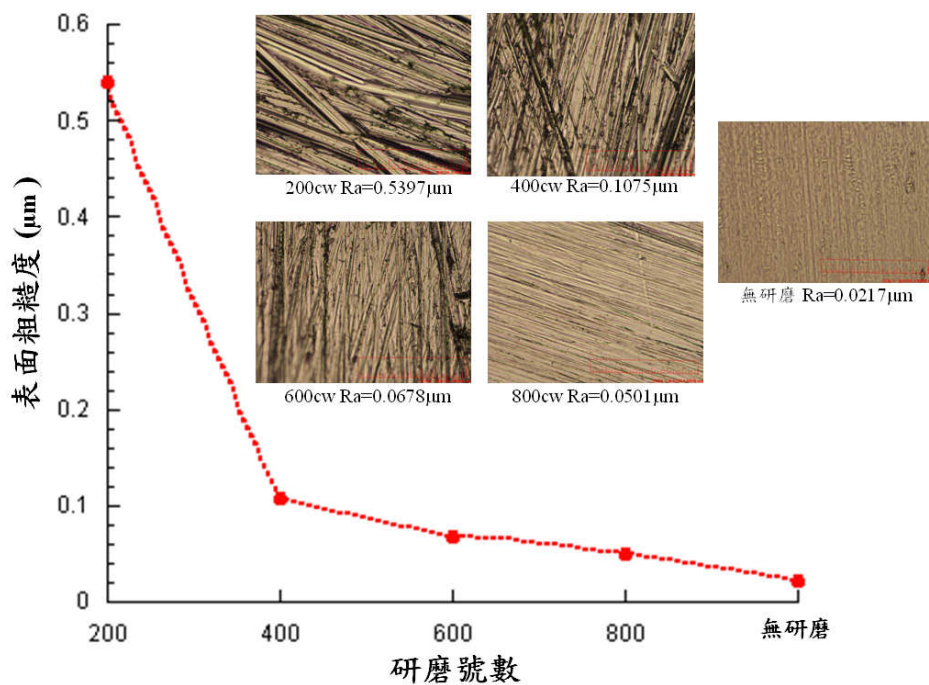
接點電阻檢測試驗下，圖二十所示，由研磨粒度 200cw 與 600cw 曲線發現，隨著不鏽鋼焊接溫度提升呈現接點電阻下降，兩者成反比趨勢。結果顯示因較高焊接溫度能有效將焊料填滿粗糙表面而增加接觸面積，進而讓電阻值下降；而在研磨粒度 800cw、焊接溫度 325°C 時，因不鏽鋼無法與焊線有效接合，所以無該筆電阻值。由表四中得知，在研磨粒度 400cw 及焊接溫度 400°C 時，獲得最低之接點電阻 0.081Ω。



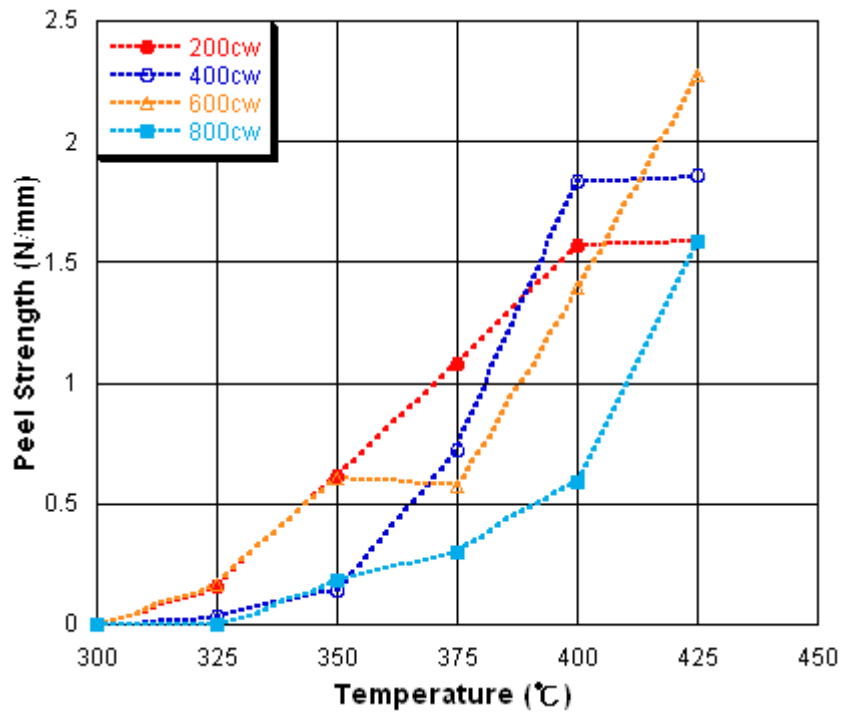
圖十五、模組表面之波浪紋



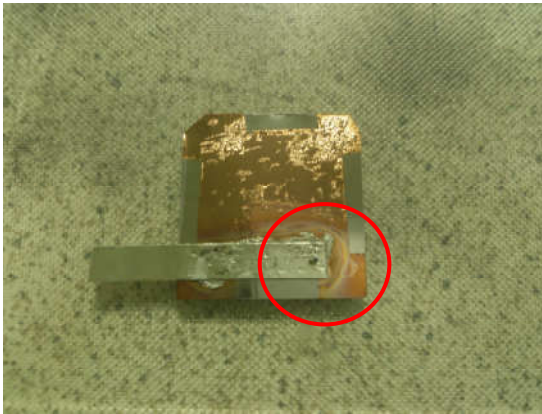
圖十六、非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池模組電氣特性



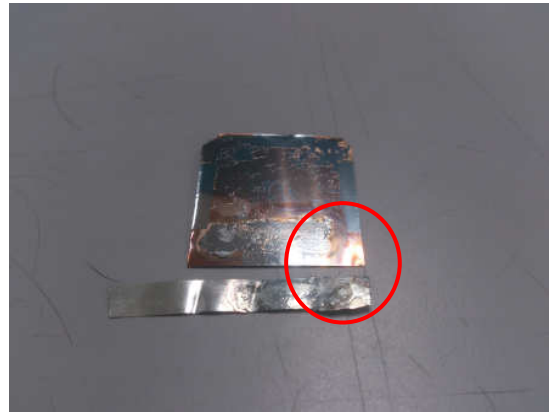
圖十七、不鏽鋼試片研磨後之表面狀態



圖十八、不鏽鋼與焊線之剝離強度

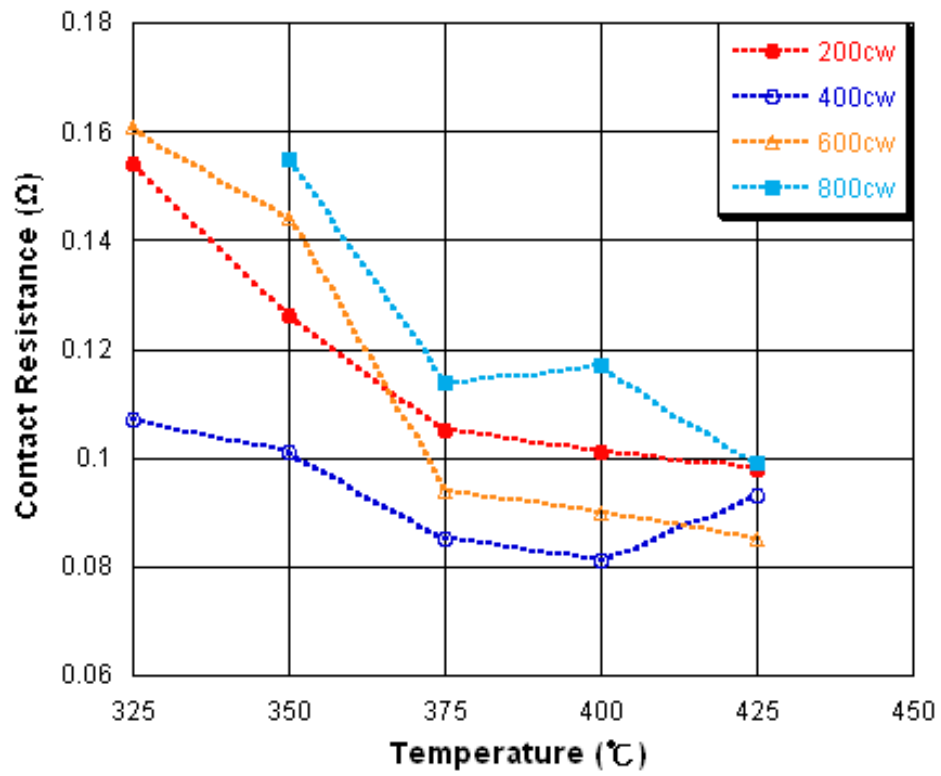


(a)不鏽鋼與焊線焊接



(b)焊線拉開後

圖十九、不鏽鋼表面濺鍍銅薄膜之焊接



圖二十、不鏽鋼與焊線之接點電阻



表一、非晶矽不鏽鋼太陽電池電氣特性

cell1 編號	Voc	Isc	Pmax	Vpm	Ipm
SS01	0.871	1.0136	0.253	0.477	0.5302
SS02	0.864	0.8717	0.189	0.52	0.3625
SS03*	0.889	2.1693	0.714	0.543	1.3145
SS04*	0.869	2.0525	0.605	0.509	1.1884
SS05*	0.895	1.9406	0.57	0.509	1.1209
SS06*	0.907	2.2351	0.776	0.568	1.3673
SS07*	0.91	2.8217	0.95	0.546	1.742
SS08	0.79	0.4657	0.091	0.396	0.2305
SS09*	0.901	2.1822	0.751	0.571	1.3141
SS10*	0.891	2.3217	0.827	0.582	1.4218
SS11*	0.888	1.7625	0.419	0.424	0.9869
SS12*	0.894	2.0983	0.717	0.542	1.3228
SS13*	0.897	2.3094	0.779	0.56	1.3904
SS14*	0.908	2.4569	0.864	0.58	1.489
SS15*	0.88	1.8853	0.488	0.445	1.095
SS16*	0.912	2.258	0.867	0.603	1.4386
SS17*	0.902	2.4619	0.797	0.511	1.5579
SS18*	0.783	1.7644	0.321	0.317	1.0132
SS19	0.911	0.9262	0.187	0.417	0.449
SS20	0.854	0.7717	0.134	0.399	0.3361
SS21*	0.898	1.5384	0.498	0.548	0.9091
SS22*	0.903	2.3694	0.807	0.558	1.4469
SS23	0.865	1.4398	0.306	0.396	0.773
SS24*	0.899	1.8765	0.74	0.567	1.3049

SS25	0.631	0.8378	0.154	0.328	0.4687
SS26	0.86	1.3744	0.353	0.453	0.7799
SS27*	0.885	2.1472	0.669	0.534	1.2537
SS28*	0.891	2.288	0.718	0.534	1.3448
SS29*	0.896	2.5617	0.886	0.575	1.5415
SS30*	0.874	1.9466	0.558	0.486	1.1479
SS31*	0.875	1.913	0.561	0.496	1.1315
SS32*	0.9	2.3657	0.835	0.575	1.4531

註\*：表示選用於模組製作的太陽電池

表二、封裝製程參數

未交聯前溫度(°C)	70、80、90
抽真空時間(min)	2、3、4
保壓壓力(kpa)	80
保壓時間(min)	13
交聯後溫度(°C)	130

表三、不同溫度下之剝離強度

溫度(°C) \ 粒度	粒度			
	200cw	400cw	600cw	800cw
325	0.1585	0.032	0.1685	
350	0.611	0.145	0.6085	0.1845
375	1.084	0.7205	0.575	0.2985
400	1.572	1.835	1.395	0.5865
425	1.5855	1.8585	2.280	1.5827

剝離強度單位：N/mm

表四、不同溫度下不鏽鋼與焊線之接點電阻

溫度(°C) \ 粒度	200cw	400cw	600cw	800cw
325	0.154	0.107	0.161	
350	0.126	0.101	0.144	0.155
375	0.105	0.085	0.094	0.114
400	0.101	0.081	0.09	0.117
425	0.098	0.093	0.085	0.099

電阻單位：Ω

## 伍、結論與未來工作

### 一、 不鏽鋼焊接結果

剝離強度隨著焊接溫度升高而提升，在研磨粒度 600cw 焊接溫度 425°C 時，可獲得最大剝離強度 2.28N/mm，為拉力試驗之最高值，且已達到一般結晶矽太陽電池 1.2N/mm 之標準。然而接點電阻量測結果為研磨粒度 400cw、焊接溫度 400°C 時，測得最低之接點電阻 0.081Ω。

### 二、 封裝測試結果

因各封裝材料不同之收縮性質，將影響封裝後太陽電池模組表面狀況，結果顯示於 4min 抽真空時間及未交聯前溫度控制為 80°C 時，測試件表面已無出現波浪紋。然而將參數實際運用於非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池封裝時，為求模組封裝後有較佳完整性，遂於太陽電池周圍黏貼遮蔽間隙之白色膠帶，但結果反而造成封裝模組表面產生波浪紋。

未來於非晶矽不鏽鋼太陽電池背接觸面之接點電阻及模組封裝完整性方面，可作深入的探討如下：

- (1)採用熱影響區域較小之焊接方式(如超音波焊接)，可避免半導體層因焊接溫度過高而導致破壞或短路。
- (2)非晶矽薄膜不鏽鋼太陽電池模組封裝擬採用新型不收縮之 EVA，並且測試 EVA 與杜邦 ETFE 膜之剝離強度及驗證其可靠度。
- (3)往後不鏽鋼試片焊接，可藉反應曲面法尋找出最佳化之焊接參數，並將該參數組合實際運用於太陽電池上，並檢測其發電效益。

## 陸、參考文獻

- [1] <http://www.spectrolab.com>
- [2] 魯瑞峰，另類太陽電池-薄膜太陽電池的發展與機會，產經資訊，2007。
- [3] J.S. Cho, S. Baek and J.C. Lee, "Surface Texturing of Sputtered ZnO:Al/Ag Back Reflectors for Flexible Silicon Thin-film Solar Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 95, pp. 1852-1858, 2011.
- [4] 蔡娟娟，PECVD 設備應用光電膜性能提昇研究，國立交通大學，2010。
- [5] S.D. Kore, P.P. Date and S.V. Kulkarni, "Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets, " *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208, pp. 486-493, 2008.
- [6] S. Kundu, S. Sam and S. Chatterjee, "Interfacial reactions and strength properties in dissimilar titanium alloy/Ni alloy/microduplex stainless steel diffusion bonded joints, " *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, pp. 288-295, 2013.
- [7] Sukru Yildirim and Mehmet Halidun Kelestemur, "A study on the solid-state welding of boron-doped Ni<sub>3</sub>Al–AISI 304 stainless steel couple, " *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 1134-1137, 2005.
- [8] 郭錦榮，不銹鋼與黃銅異種金屬雷射銲接性質之研究，國立台灣師範大學工程教育學系，碩士論文，2009。
- [9] M.K. Lee, J.G. Lee and Y.H. Choi, "Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel, " *Materials Letters*, Vol. 64, pp. 1105-1108, 2010.
- [10] 洪德傑，應用微電阻銲於 AISI316 不銹鋼金屬細線對接之研究，國立屏東科技大學車輛工程系，碩士論文，2007。

- [11]C. Beneking, B. Rech and S. Wieder, "Recent developments of silicon thin film solar cells on glass substrates, " *Thin Solid Films*, Vol. 351, pp. 241-246, 1999.
- [12]O. Yilmaz and H. Çelik, " Electrical and thermal properties of the interface at diffusion-bonded and soldered 304 stainless steel and copper bimetal, " *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141, pp. 67-76, 2003.
- [13]Dupont ETFE data sheet ,  
[http://www2.dupont.com/Teflon\\_Industrial/en\\_MS/](http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_MS/) °
- [14]K. Agroui and N. Benrekaa, " Characterisation of Etylene Vinyl Acetate for Photovoltaic Application, " *IEEE*, pp. 217-274, 2009.
- [15]A. Sonia, K. Priya Dasan and R. Alex, "Celluloses Microfibres (CMF) Reinforced Poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) Composites: Dynamic Mechanical, Gamma and Thermal Ageing Studies, " *Chemical Engineering Journal*, Vol. 228, pp. 1214-1222, 2013.
- [16]T. Chellaih, G. Kumar and K. N. Prabhu, "Effect of thermal contact heat transfer on solidification of Pb–Sn and Pb-free solders, " *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 1006-1011, 2007.