

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

提升可撓式太陽能電池模組效率之研究
Flexible Solar Module Efficiency Enhanced By RSM

計畫編號：1032001INER013

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：103 年 12 月 11 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
英文摘要	3
壹、計畫緣起與目的	5
貳、文獻回顧	6
參、研究方法與實驗	8
一、研究方法	8
二、實驗設備	14
(一)、太陽電池模組封裝機	14
(二)、拉力試驗機	15
(三)、太陽電池模組檢測機	16
(四)、分光光譜儀	17
肆、主要發現與結論	18
一、主要發現	18
二、結論	27
伍、參考文獻	29

摘要

本研究採用二階反應曲面法針對太陽電池模組之填充材料乙烯-醋酸乙烯共聚物(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)於層壓製程中，各項參數對 EVA 膠合與光學特性進行探討分析，以及將參數優化之結果實際運用於多晶矽太陽電池模組封裝上。填充材料 EVA 之品質特性，包含表層材料剝離強度、背板材料剝離強度與光線穿透率，而影響品質特性的品質因子有底板溫度、抽真空時間、交聯時間、保壓壓力與 EVA 種類，各因子採業界之水準條件由低水準至高水準取三個水準值，以中央合成設計(Central Composite Design, CCD)進行實驗設計規劃，就各疊層材料與 EVA 之剝離強度及光線穿透率做實驗量測以確認品質特性差異，並經由變異數分析其品質特性後，可獲得顯著影響之因子，且建立數學模型與回歸方程式。

研究發現表層材料之剝離強度及光線穿透率影響因子為底板溫度與抽真空時間，背板材料之剝離強度影響因子為底板溫度與交聯時間，經由參數優化後最佳之表層材料剝離強度為 9.544 N/cm，背板材料剝離強度為 116.193 N/cm，光線穿透率為 68.686 % (200~1100 nm 全光譜範圍平均值)，而為驗證分析預測值，本研究將優化結果之參數再次實驗，確認其可靠性，實驗結果差異值低於 10 %。最後將參數優化之製程參數使用多晶矽太陽電池實際封裝成模組並量測其發電功率，研究結果顯示經層壓製程後太陽電池裸片功率由原功率 3.877 W 提升至 4.013 W，其增益值達到 3.51 %，故利用反應曲面法優化層壓製程確實能有效且快速地獲得最佳製程參數與品質特性。

關鍵字：可撓式太陽電池模組、層壓製程、反應曲面、剝離強度、
光線穿透率

Abstract

In this study, the second-order Response Surface Method (RSM) is used to analysis the quality factors of Ethylene Vinyl Acetate(EVA), i.e., filler material, during the encapsulation process. Through systematic experimenting and regression analysis, the relationship between quality characteristics and quality factors is found in order to establish approximate responses. Looking at the encapsulation process on the lamination machine, these quality factors(variables) are, heating conditions, vacuum time, cure time, hold pressure and the kind of EVA used. We set the level in each factor to reflect data from industries. The levels were chosen three standard values from low to high. In addition, the peel strength of the frontsheet/EVA, the peel strength of the EVA/backsheet and the transmittance of EVA are set up as quality characteristics (response). Then, through systematic experimenting and regression analysis, the relationship between response and variable is found in order to establish approximate responses by the Central Composite Design (CCD).

The results are shown that the impact factors of the peel strength of the frontsheet/EVA and the transmittance of EVA are heating conditions and vacuum time; while the impact factors of the peel strength of the EVA/backsheet are heating conditions and cure time. Through the optimization of RSM, the peel strength of the frontsheet/EVA is up to 9.544 N/cm and the peel strength of EVA/backsheet is up to 116.193 N/cm. The transmittance of EVA is 68.686 % under average range of the spectral between 200 to 1100 nm. The optimization results have been tested again to verify the reliability. The uncertainty analysis of these experiments is less than 10%. The result of the study shows that the

converted power of the solar cells can be increased from 3.877 W to 4.013 W, which has a 3.51% power enhancement! Therefore, the RSM for the optimization of encapsulation parameters can improve the quality of encapsulation process efficiently.

Keywords: Flexible Solar Modules, Encapsulation Process, Response Surface Method, Peel Strength, Transmittance.

壹、計畫緣起與目的

近年來多晶矽材料缺乏，所導致整體產業鏈價格飛漲的情形，可以看出矽晶圓太陽能電池所面臨的最大問題乃是材料成本太高，一方面是因為多晶矽原料雖然是一般的矽(SiO₂)，但是在純化的過程中需要規模龐大的廠房及耗費大量的能源才能辦到，因此就純化單位成本的層面上並不便宜；另一方面，由於物理性質的限制，目前用矽晶圓製造太陽能電池目前最少也要 200 μ m 的厚度，因此在製造大面積發電模組時對矽原料的用量也相對龐大。所以為了節省太陽能電池材料(厚度可低於矽晶圓太陽能電池 90%以上)，可在價格低廉的玻璃、塑膠或不鏽鋼基板上製造，甚至可以 roll to roll 方式大量生產大面積太陽能電池的特性，在業界持續尋求降低生產成本的要求上，加上具有可撓性，容易搭配建築外牆施工等其他優點，已廣被看好將是未來的明星產品。

本計畫之目的為太陽電池模組之封裝參數優化，藉由反應曲面法針對標準型太陽電池於封裝製程中，各項參數對封裝品質之特性進行實驗分析與探討，減少封裝造成材料之翹曲、延長使用壽命與提高太陽電池模組輸出效率，未來此封裝技術可申請專利與技術轉移，使國內太陽電池模組封裝廠商提高競爭力。

貳、文獻回顧

D. Franke 等人[1]利用有限元素法進行最佳化分析，配合電腦軟體輔助分析計算出焊接時所產生之熱應力，進而設計模擬熱處理及製造過程的溫度分佈情況。經模擬發現，固定製程時間之 Beam bit 焊接技術，將產生最高的熱應力，利用均勻預熱之輻射加熱源，進行連續式自動化焊接，熱應力可減少 50%以上，同時製程時間可縮短 60%。因此輻射加熱相較移動式點熱源加熱方式，可相對降低 35%之熱應力與 93%的製程時間。Martijn M. 等[2]指出聚碳酸酯板在光電模件設計的覆板內的應用與技術可行性研究，實驗結果證實由數值模擬獲得運用有限元素方法，EVA 厚度與 PC 厚度增加可減少封裝製品之彎曲產生，也證明多晶矽太陽電池的封裝在 PC 材上配合使用低溫熟化的 EVA 可行，然而 PC 或 EVA 增加層數亦可減少封裝後產品應力，並改進封裝製品之翹曲。Takeshi 等[3]研究乙烯乙烯樹脂乙酸鹽(ethylene vinyl acetate)層板的光熱穩定性，針對非結晶矽太陽能電池和 EVA 薄膜層壓並使用加速的封裝測試探討其性能退化的原因。在 1-SUN(標準日照條件)與 4-SUN(4 倍的標準日照強度)的情況下，藉分光光譜儀測量出在 280-380 nm 紫外線區域進行實驗，結果顯示太陽光照度會直接影響 EVA 材料層性質變化，使其黃化。

K. Agroui 等[4]使用了高溫熟化(fast cure)與低溫熟化(slow cure)兩種類型之 EVA，並使用熱重分析、熱差分析、示差 s 掃描熱分析三種分析方法，研究 EVA 暴露於陽光、熱與濕度下惡化機械特性，經結果顯示在化學和機械性質變化上，光電模組在溫度範圍內快速熟化 EVA 較慢速熟化 EVA 更穩定。G.J. Jorgensen 等[5]研究太陽模組封裝材料之溼度滲透、黏附力及腐蝕保護相關性質，利用

Ci4000 Xenon Weather-Ometer 之耐候實驗機，模擬太陽電池模組受到惡劣氣候後發電效率之優劣評估。 William H. Holley 等[6]研究太陽電池模組封裝材料 EVA 之耐候性，針對目前常用的 EVA 類型，standard 型與 fast cure 型作封裝前後 EVA 的泛黃率，研究其透光率影響之表現。 T. Carlsson 等[7]研究透光型太陽電池模組之水滲透性，因透光型太陽能模板對於水的耐候性為重要因素，利用氧化銦錫(ITO)作溼度量測，利用三個不同的模型去測試，其結果包含對水的滲透率、脫附性。

如何使太陽電池經一系列製程封裝成模組，其功率損失最小化為現階段模組廠商所重視的課題，即使使用相同太陽電池廠商所生產且效率相同的太陽電池，封裝成標準模組後其各別模組效率亦不相同，所以針對業界模組設備進行生產製程參數優化，降低封裝製程功率損失為本實驗室近三年執行的研究項目。

參、研究方法與實驗

一、研究方法

太陽電池真空熱壓實驗控制因子與其水準設定如表 1，採用 Design-Expert 軟體反應曲面法(圖 1)之中央合成設計，建構包含角點、軸點與中心點實驗之實驗規劃程序，層壓製程封裝材料之品質特性，可分為杜邦 ETFE 膜與 EVA 間的剝離強度(Peel Strength of Frontsheet)、TPE 背板與 EVA 間的剝離強度 Peel Strength of Backsheet) 以及杜邦 ETFE 膜、EVA、PET 疊層之光線穿透率三種品質特性，期望可獲得較高的剝離強度與材料穿透率。以下分別說明實驗控制因子與品質因子：

1. 底板溫度(品質因子 A)

底板溫度是層壓製程中相當重要之因子，需加熱使 EVA 融化成液態，並與表層材料及背板材料相互接合，達到保護太陽電池之功效，底板溫度水準設定 130~170°C。

2. 抽真空時間(品質因子 B)

因填充材料 EVA 在加熱過程中會產生二氧化碳等氣體，必須在製程腔體抽真空來消除氣體，使太陽電池模組內部不會有氣泡，達高發電效率與模組外觀完整度，抽真空時間水準設定 4~7min。

3. 保壓壓力(品質因子 C)

太陽電池模組製作時，在層壓製程中施加壓力是為確保各材料能緊密結合，因此將保壓壓力列入品質因子來探討，保壓壓力水準則設定為 60~100kpa。

4. 交聯時間(品質因子 D)

EVA 為高分子聚合物在受熱後內部分子鏈會開始產生反應，須

維持一段時間使其反應效果能達到飽和狀態，EVA 有兩種款式，一為標準固化型，二為快速固化型，本實驗使用之兩款 EVA 皆為快速固化型，交聯時間水準則設定為 9~13min。

5. EVA 產品種類(品質因子 E)

為符合太陽電池模組廠內常使用之填充材料，因此選擇目前市面上年產量最多的日本兩家 EVA 廠商，Bridgestone 與 Mitsui Chemicals 所生產之 EVA 當作實驗材料，型號分別為 S11 及 RC02B。

2.2 實驗品質特性之光線穿透率量測

量測穿透率測試件時，因測試件層壓後會產生些微翹曲，因此利用黑色壓克力治具將測試件固定成平面狀(圖 2)，而穿透率量測條件為波長範圍 200~1100 nm；掃描速度為 100 nm/min；採樣間隔為 1 nm；路徑長度為 10 mm，且每組測試件量測三個不同位置(圖 3)，將量測數據統計後，由 200~1100 nm 全光譜範圍取平均值作為穿透率標準。

2.3 太陽電池功率量測

利用模組檢測機量測其發電功率(圖 4)，將太陽電池模組裁切成 200×160 mm，檢測條件如下；每次量測 80 點 I-V 值，日照量為 1000 W/m²，溫度為 25±1 °C，太陽電池面積為 243.36 cm²，每組實驗片量測 3 次，並將 3 次數據取平均值為比較之依據，模組檢測之 I-V Curve(圖 5)。

2.4 實驗測試件製作

(1) 表層材料剝離強度測試件:

製作 ETFE-EVA-TPE 材料拉力試片，首先將 180×50 mm ETFE 膜平貼於玻璃載台上，使兩者間完全平整貼附，然後疊放 160×35 mm EVA 與 TPE 背板，待層壓完成後利用治具將測試件裁切成 160×25 mm，即完成表層 ETFE 拉力試片(圖 6)。

(2) 背板材料剝離強度測試件:

製作 TPE-EVA-TPE 材料拉力試片，將白色 TPE 背板置於玻璃載台上，然後疊放相同尺寸之 EVA，並利用耐熱膠帶貼住底層 TPE 與 EVA 後，在放置相同尺寸之白色 TPE 背板，待層壓完成後利用治具將測試件裁切成 160×25 mm，即完成背板 TPE 拉力試片(圖 7)。

(3) 穿透度測試件:

製作 ETFE-EVA-PET 材料穿透度試片，將杜邦 ETFE 膜平貼於玻璃載台上使兩者間完全平整貼附，疊放 EVA 與 PET 背板，待層壓完成後即完成穿透度試片(圖 8)。

表 1 實驗因子與參數設定

Experimental factors		Level
A	Temperature (°C)	130、150、170
B	Vacuum time (min)	4、5.5、7
C	Hold pressure (kpa)	60、80、100
D	Cure time (min)	9、11、13
E	EVA type	Bridgestone、Mitsui Chemicals

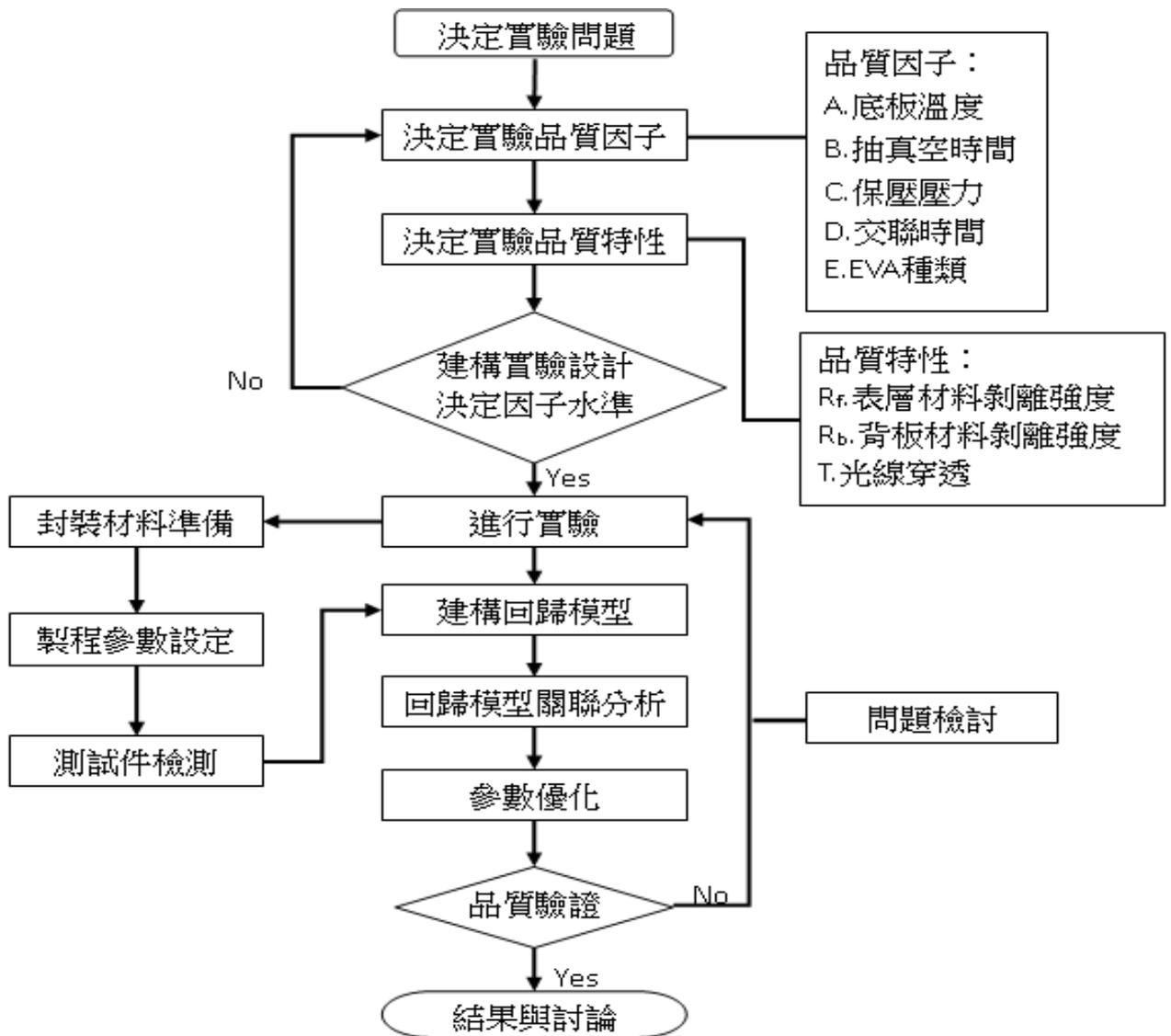


圖 1 最佳化實驗流程



圖 2 穿透率測試件固定治具

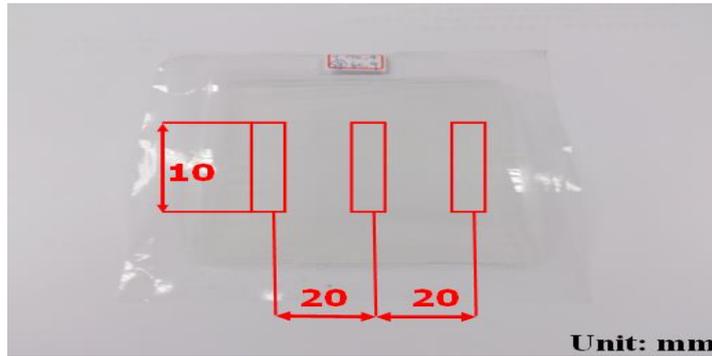
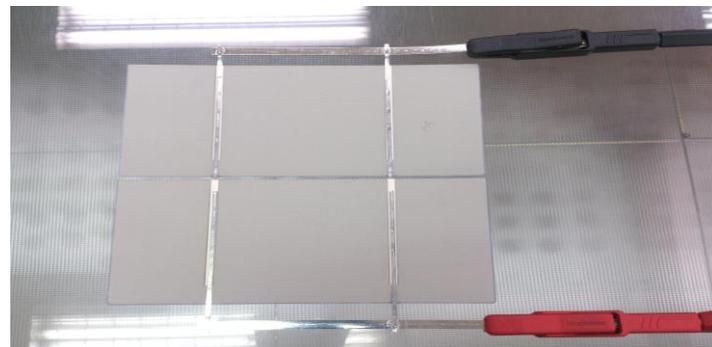


圖 3 穿透率量測位置



(a) 裸片檢測



(b) 太陽電池模組檢測

圖 4 太陽電池光電轉換效率量測

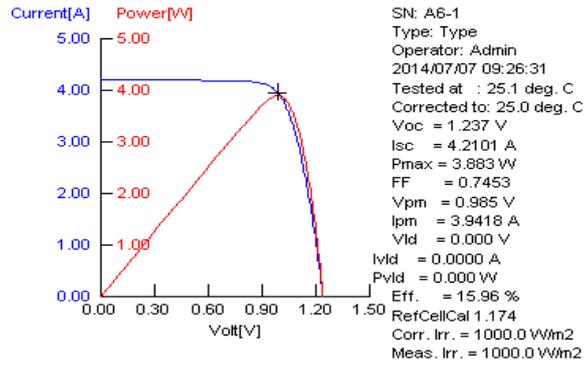


圖 5 太陽電池量測之 I-V Curve

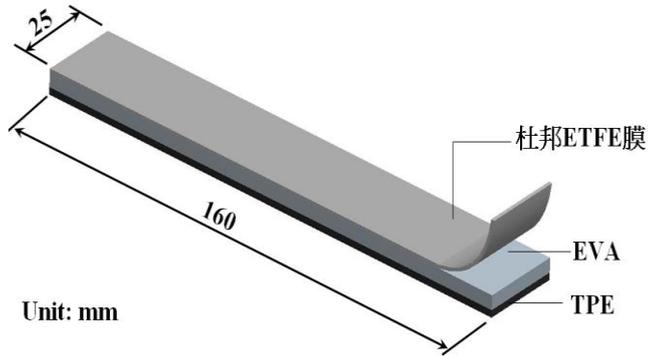


圖 6 表層材料剝離強度測試件

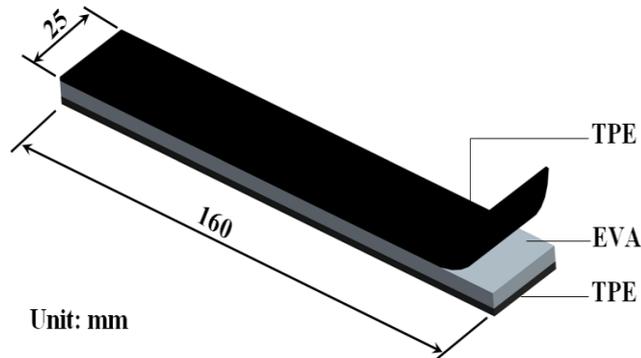


圖 7 背板材料剝離強度測試件

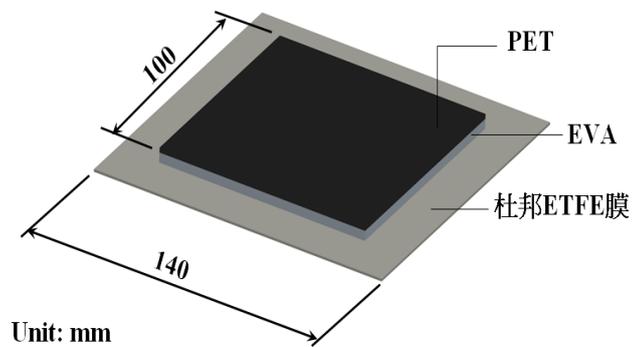


圖 8 穿透度測試件

二、 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 (Laminator)，生產公司為 Nisshinbo(日清坊公司)，型號為 Laminator 1222S(圖 9)，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9、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 10 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 $\pm 50\text{Kg}$ ，精度為 $\pm 0.2\%$ ，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10、拉力測試機

(三) 太陽電池模組檢測機

該設備主要是檢測太陽電池模組發電效率，設備的有效檢測面積，長度2200 mm、寬度1200 mm，可完全配合本實驗室太陽電池模組封裝機台尺寸要求。在光源方面，使用1.3M氙燈(Xenon Lamp)，光源過低設備有自動停止運轉功能，若無法達到額定照度(燈源長期使用後)，設備會自動產生異常警告，在光譜分佈(Filtered to AM1.5 Global Spectrum)符合ASTM E927 Class A 等級要求，光源強度方面具1000 W/m²(從700~1100 W/m²亦可調整之)，光分佈均勻度於全測試平面區內低於±3%，輻射穩定則在±1%內，如圖11所示。



圖11 太陽電池模組檢測機

(四) 分光光譜儀

本實驗量測光線穿透度實驗採用日立公司(HITACHI)所生產之紫外可見光分光光譜儀(UV-Visible)，型號為U-2910，該儀器為化學工程與材料工程系綠色科技實驗室所有。量測光譜頻寬1.5 nm，光譜波長範圍為190~1100 nm，亦可自行選擇波長範圍，其波長精度為 ± 0.3 nm，機台光源採用雙光束設計由鎢絲燈與氬氣燈兩種光源，光源發出的能量被一個反射鏡分成兩束，一束通過參考池，另一束通過樣品池，而單光束設計則不具備這種性能，而光源掃描速度為10~3600 nm/min。該儀器採用Seya-Namioka單色儀作為光學元件，該單色儀使用，是典型的凹面衍射光柵單色儀。由於凹面衍射光柵同時擁有光束的聚焦和色散功能，該光學系統只需配置少量的反射鏡。光線初始通過濾光鏡調整色調後，經聚焦通過單色光分光稜鏡，再經過狹縫選擇波長，而形成單一且特定波長之光線，之後射入樣品槽中，最後射入光電管中將光能轉換為電器訊號，由電腦接收。操作時藉由空白樣品做背景值(Background)，再與樣品所吸收之光能量差與標準片之能量吸收值相比較，便可律定樣本中之待測物穿透率，圖12。



圖12 可見-紫外光分光光譜儀圖

肆、主要發現與結論

一、主要發現

1. 表層材料與EVA之剝離強度

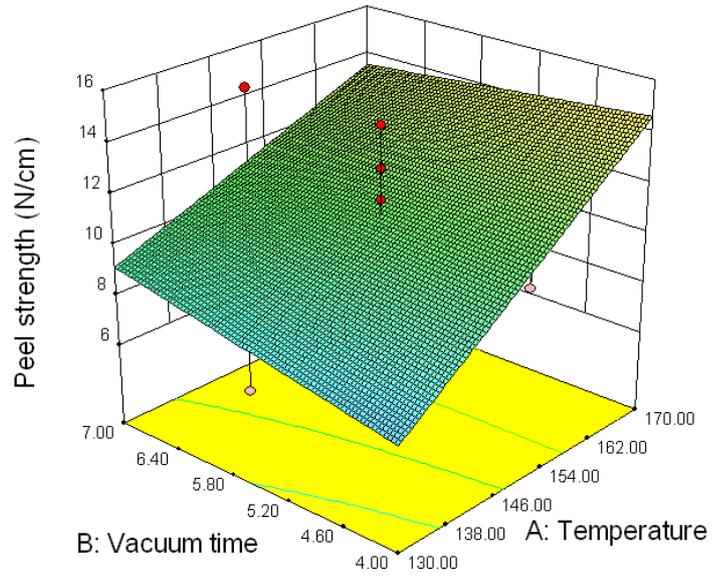
圖13為兩款EVA顯著品質因子之A底板溫度與B抽真空時間對表層材料剝離強度之反應曲面圖的變化趨勢，可看出底板溫度及抽真空時間兩者交互作用對於表層材料剝離強度有相對大的影響，其底板溫度高時，剝離強度較大，且抽真空時間越久，剝離強度亦會顯著提升，反之底板溫度低時，剝離強度較小，且抽真空時間越少，剝離強度則會下降；另從因子擾動圖發現Bridgestone之EVA於表層材料剝離強度明顯受到底板溫度影響顯著，且呈現線性增率，其餘因子由低水準到高水準變化趨勢較平緩；Mitsui Chemicals之EVA單一品質因子與Bridgestone有所差異，在因子擾動圖可發現剝離強度受底板溫度與保壓壓力兩者因子影響呈線性，且交聯時間在此款EVA出現反比趨勢，表示交聯時間越短能獲得較高的剝離強度，然而在相同的交聯時間(低水準)情況下Mitsui Chemicals之EVA剝離強度為9.21N/cm遠小於Bridgestone剝離強度10.43N/cm，如圖14所示。

Peel strength(Frontsheet)



X1 = A: Temperature
X2 = B: Vacuum time

Actual Factors
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
E: EVA type = Bridgestone



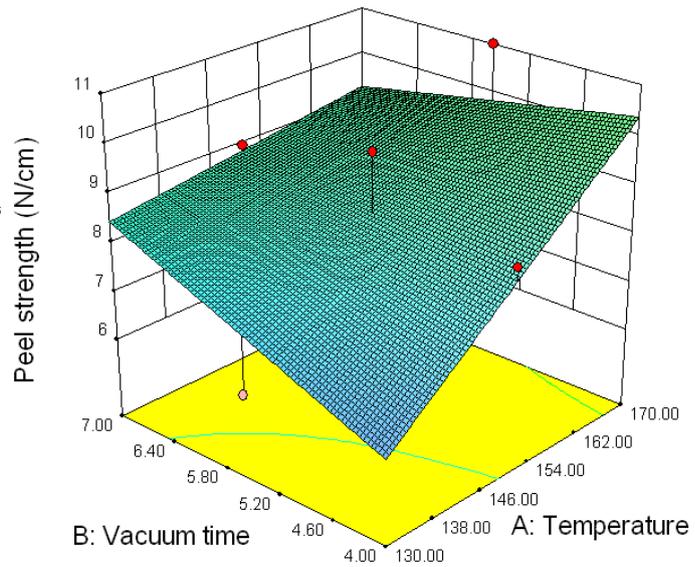
(a) Bridgestone

Peel strength(Frontsheet)



X1 = A: Temperature
X2 = B: Vacuum time

Actual Factors
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
E: EVA type = Mitsui Chemicals



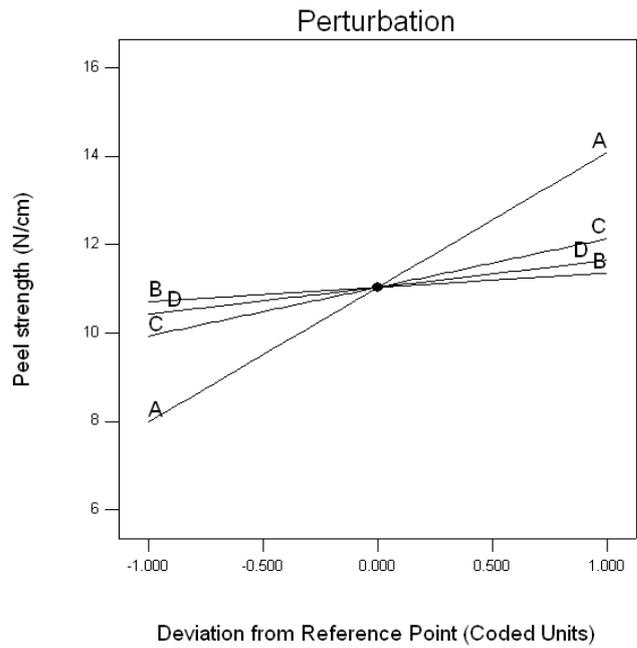
(b) Mitsui Chemicals

圖 13 底板溫度與抽真空時間對表層材料剝離強度影響之反應曲面圖

Factor Coding: Actual
Peel strength(Frontsheet)

Actual Factors
A: Temperature = 150.00
B: Vacuum time = 5.50
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
*E: EVA type = Bridgestone

Categoric Factors
E

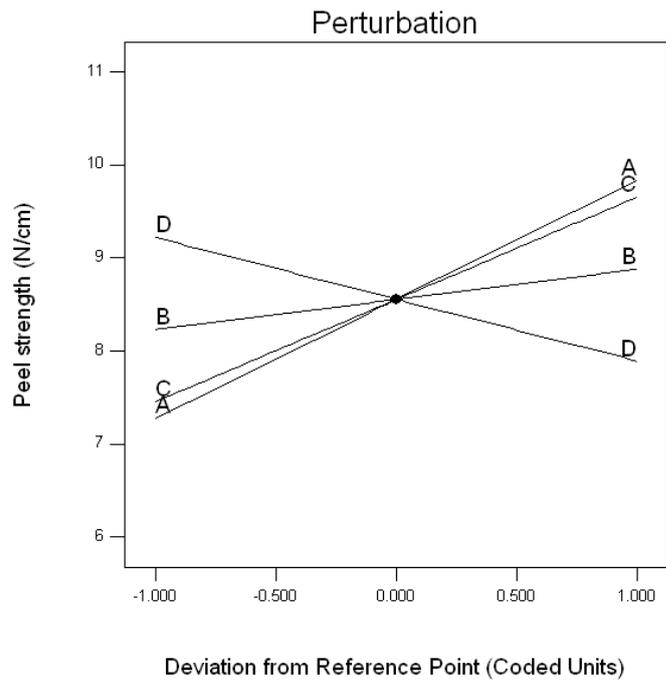


(a)Bridgestone

Factor Coding: Actual
Peel strength(Frontsheet)

Actual Factors
A: Temperature = 150.00
B: Vacuum time = 5.50
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
*E: EVA type = Mitsui Chemicals

Categoric Factors
E



(b)Mitsui Chemicals

圖 14 表層材料剝離強度之因子擾動圖

2. 背板材料與EVA之剝離強度

圖15兩款EVA之因子擾動圖，可得知Bridgestone之EVA背板材料剝離強度受底板溫度因子影響顯著，且呈現拋物線增率趨勢，

其最大值在高水準因子(170°C)時背板材料剝離強度是 135.954N/cm，Mitsui Chemicals之EVA底板溫度曲線亦近似於前者，然而在拋物線趨勢上最大值之水準略偏向左側，表示Mitsui Chemicals於較低水準(163°C)時，可獲得最大值116.09N/cm；兩款EVA交聯時間之因子亦會影響剝離強度，從圖中可得知在相同交聯時間(11.72min)下，Bridgestone之剝離強度為126.7 N/cm，而Mitsui Chemicals之剝離強度為111.8 N/cm，表示Bridgestone之EVA能更有效膠合TPE背板，且差異達13.32%。

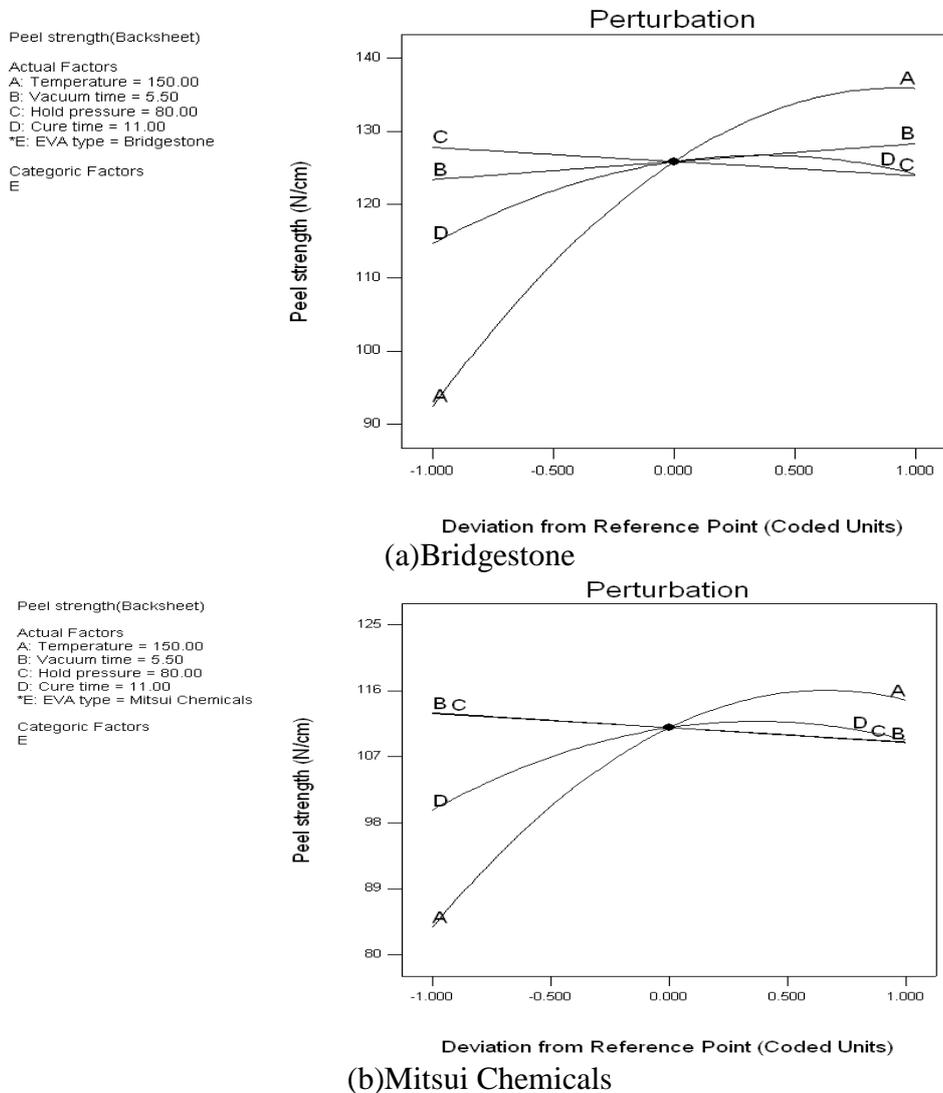
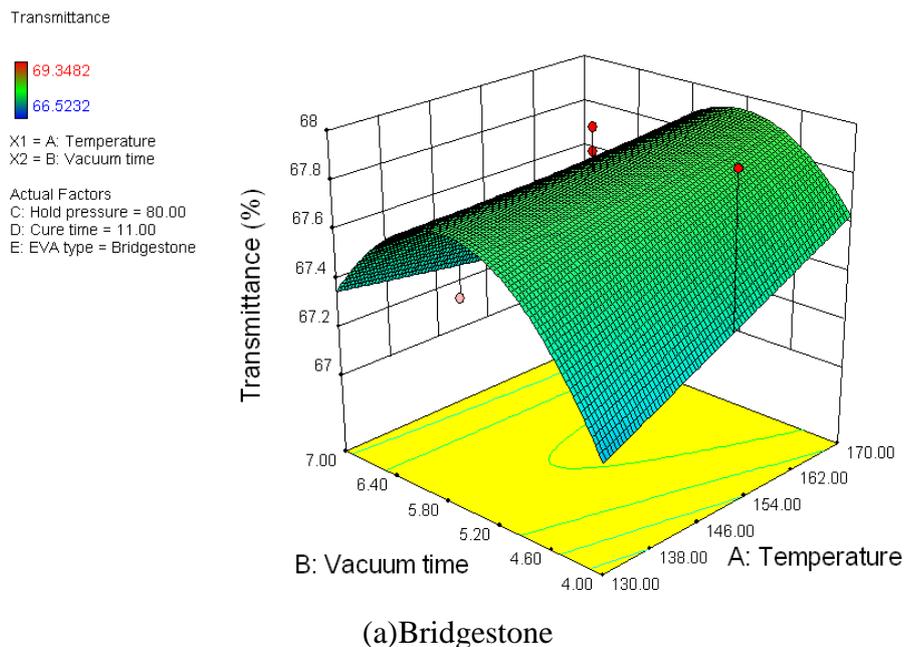


圖15 背板材料剝離強度之因子擾動圖

3. 層壓製程對EVA光線穿透率之影響

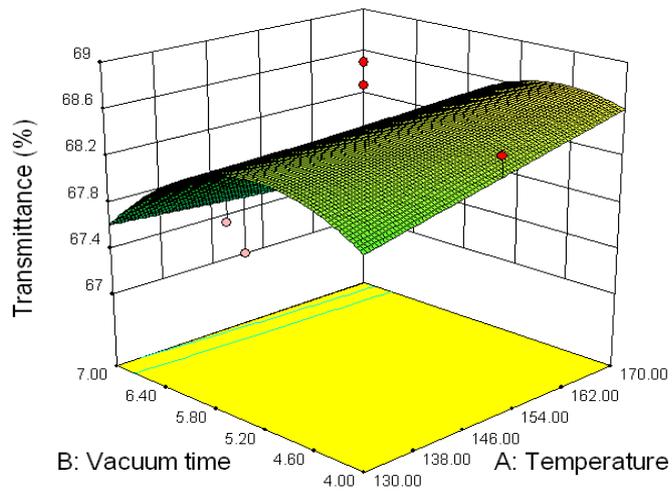
圖16為兩款EVA顯著品質因子之A底板溫度與B抽真空時間對光線穿透率之反應曲面圖的變化趨勢，可看出底板溫度及抽真空時間兩者交互作用對於光線穿透率有相對大的影響，其底板溫度高時，光線穿透率較大，呈線性增率趨勢，但對抽真空時間因子而言，從低水準至高水準間，光線穿透率呈現凹口向下之拋物線趨勢；另從因子擾動圖發現Bridgestone之EVA於光線穿透率反應趨勢，受抽真空時間與交聯時間影響，且兩因子呈現雙曲線型式，其抽真空時間為凹口向下之曲線，而交聯時間為凹口向上之曲線，兩因子相交之焦點於中水準(0)光線穿透率為67.825%；Mitsui Chemicals之EVA於光線穿透率反應趨勢亦近似Bridgestone，然而抽真空時間之曲線頂點略高於前者其值為68.525%，且水準值為-0.39，表示相同層壓參數下，Mitsui Chemicals之EVA於抽真空時間短時，可獲得比Bridgestone高出1.03%的光線穿透率，如圖17所示。



Transmittance



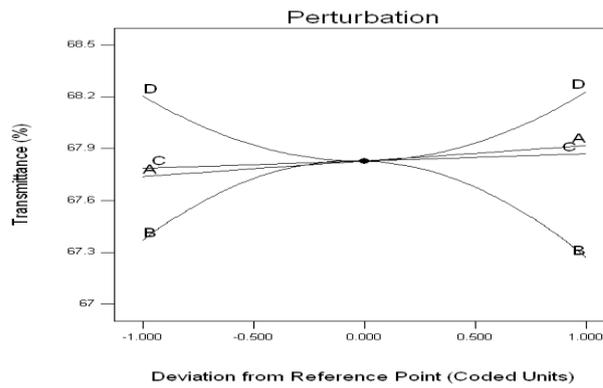
X1 = A: Temperature
X2 = B: Vacuum time
Actual Factors
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
E: EVA type = Mitsui Chemicals



(b)Mitsui Chemicals

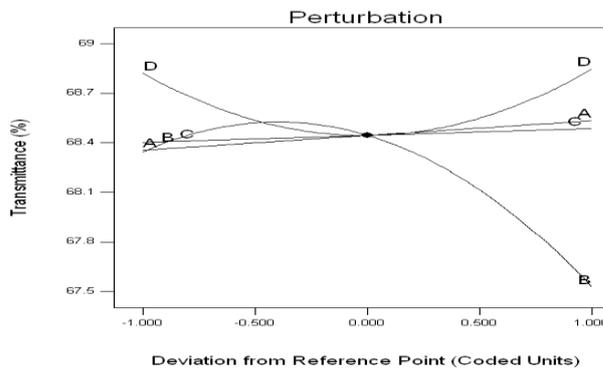
圖16 底板溫度與抽真空時間對光線穿透率影響之反應曲面圖

Transmittance
Actual Factors
A: Temperature = 150.00
B: Vacuum time = 5.50
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
E: EVA type = Bridgestone
Categoric Factors
E



(a)Bridgestone

Transmittance
Actual Factors
A: Temperature = 150.00
B: Vacuum time = 5.50
C: Hold pressure = 80.00
D: Cure time = 11.00
E: EVA type = Mitsui Chemicals
Categoric Factors
E



(b)Mitsui Chemicals

圖17 光線穿透率之因子擾動圖

4. 層壓製程參數優化

由以上1~3章節變異數分析可取得，兩項剝離強度與光線穿透率品質特性之響應顯著因子，如表2所示。由於底板溫度與保壓壓力兩項因子皆會影響剝離強度之大小，且保壓壓力過大時則可能造成層壓後太陽電池產生破裂，因此考量符合實務上需求，將各關鍵顯著因子以模組廠產線中所期望有效縮短層壓製程時間為基礎，加以限制並令各品質因子期望值為望小(minimize): 希望可獲得最佳封裝材料物理特性為目標，並令各品質特性期望值為望大(maximize)，如表3所示。

表4係經參數優化後得到最佳組合，Bridgestone層壓參數為底板溫度152.45°C、抽真空時間4.42min、保壓壓力60kpa與交聯時間9min；Mitsui Chemicals層壓參數為底板溫度151.28°C、抽真空時間4min、保壓壓力60kpa與交聯時間9min。兩者最佳化分析預測值之表層材料剝離強度分別為9.544、7.932 N/cm，底板材料剝離強度分別為116.193、102.95 N/cm，光線穿透率分別為67.944、68.686%。然而驗證品質因子經參數優化後之水準條件，需再次經實驗優化，且為使實驗具可靠性，優化參數時製作2個測試件，各數據皆以2個測試件平均值為依據，在品質驗證上，亦符合本實驗所設定之水準強度需求，如表5與表6所示。表7為最佳化分析預測值與實際驗證值之差異，結果顯示Bridgestone於表層材料剝離強度差異為8.91%、底板材料剝離強度為9.28%與光線穿透率為-0.01%；Mitsui

Chemicals於表層材料剝離強度差異為1.28%、底板材料剝離強度為11.24%與光線穿透率為-0.46%，其實際驗證之結果差異最高為Mitsui Chemicals於背板材料剝離強度實驗，且光線穿透率實驗兩者皆略低於預測值，但亦可發現各別之實驗值皆符合預測值趨勢，然而其餘實驗差異值均小於10%，表示經參數優化後之品質特性能達到預期，且有效地得到最佳層壓製程參數與材料性質。

表 2 R_f 、 R_b 與 T 之各項顯著因子

	反應顯著因子
R_f : Peel Strength(Frontsheet)	A、C、E、AB、AE
R_b : Peel Strength(Backsheet)	A、C、D、E、AE、BE、 A^2 、 D^2
T : Transmittance	B、E、AB、BE、 B^2 、 D^2

表 3 最佳化條件限制

Constraints		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A: Temperature	minimize	130	170	1	1	3
B: Vacuum time	minimize	4	7	1	1	3
C: Hold pressur	minimize	60	100	1	1	3
D: Cure time	minimize	9	13	1	1	3
E: EVA type	is in range	Bridgestone Mitsui Chemical		1	1	3
Peel strength(F)	maximize	4.3884	17.5644	1	1	3
Peel strength(E)	maximize	60.902	136.265	1	1	3
Transmittance	maximize	66.5232	69.3482	1	1	3

表 4 最佳化之層壓製程參數與預測值

Solutions for 2 combinations of categoric factor levels

Number	Temperature	Vacuum time	Hold pressur	Cure time	EVA type	Peel strength	Peel strength(B	Transmittanc	Desirability
1	152.45	4.42	60.00	9.00	Bridgestone	9.54374	116.193	67.9438	0.660
2	152.49	4.43	60.00	9.00	Bridgestone	9.55278	116.272	67.9498	0.660
3	152.48	4.45	60.00	9.00	Bridgestone	9.55567	116.336	67.9598	0.660
22	150.93	4.00	60.00	9.00	Mitsui Chemica	7.89351	102.668	68.684	0.659
23	151.28	4.00	60.00	9.00	Mitsui Chemica	7.93151	102.95	68.6862	0.659
24	150.53	4.00	60.00	9.00	Mitsui Chemica	7.851	102.341	68.6815	0.659

表 5 驗證優化 Bridgestone 層壓參數實際值

實驗次數	Peel Strength of Frontsheet (N/cm)	Peel Strength of Backsheet (N/cm)	Transmittance (%)
1	12.7148	125.7104	67.888
2	8.0736	128.2356	67.986
Average	10.3942	126.973	67.937

表 6 驗證優化 Mitsui Chemicals 層壓參數實際值

實驗次數	Peel Strength of Frontsheet (N/cm)	Peel Strength of Backsheet (N/cm)	Transmittance (%)
1	8.2192	116.7472	68.417
2	7.8468	112.2892	68.323
Average	8.033	114.5182	68.370

表 7 最佳化預測值與實際值之差異

	EVA type	Peel Strength of Frontsheet(N/cm)	Peel Strength of Backsheet(N/cm)	Transmittance (%)
Optimization results	Bridgestone	9.54374	116.193	67.944
	Mitsui Chemicals	7.93151	102.95	68.686
Validation results	Bridgestone	10.3942	126.973	67.937
	Mitsui Chemicals	8.033	114.5182	68.370
Difference	Bridgestone	8.91	9.28	-0.01
	Mitsui Chemicals	1.28	11.24	-0.46

5. 太陽電池模組效率

由以上章節得知，兩款EVA經參數優化後其表層材料剝離強度、背板材料剝離強度與光線穿透率皆符合本實驗分析及驗證結果，因此利用太陽電池熱風點焊機焊接6吋對半多晶矽太陽電池作為實驗片，並檢測每組太陽電池功率，為使實驗更具可靠性，在模組化過程每筆實驗參數皆製作兩組測試片，且每組測試片都需量測3次取平均值。實驗後發現太陽電池經由層壓製程後其發電功率有所增益，結果顯示使用Bridgeston與Mitsui Chemicals之EVA經層壓封裝後能使太陽電池功率分別提升3.51%及3.49%，結果為太陽電池採用Bridgeston之EVA層壓能獲得較高的光電轉換效率，且模組機械性質表現上更優於Mitsui Chemicals。

二、 結論

本研究利用反應曲面法之中央合成設計作參數優化，探討太陽電池模組填充材料 EVA 於層壓製程之因子影響，考量杜邦 ETFE 膜與 EVA 之剝離強度、TPE 背板與 EVA 之剝離強度及杜邦 ETFE 膜、EVA、PET 疊層之光線穿透率三種品質特性。實驗分析結果歸納如下：

1.杜邦 ETFE 膜與 EVA 之剝離強度實驗，其重要之因子為 A 底板溫度、C 交聯時間以及 AB 底板溫度與抽真空時間交互作用項，最佳之 EVA 為 Bridgestone；TPE 背板與 EVA 之剝離強度實驗，其重要之因子為 A 底板溫度、C 保壓壓力以及 D 交聯時間，最佳之 EVA 亦為 Bridgestone；光線穿透率實驗，其重要之因子為 B 抽真空時間與 AB 底板溫度與抽真空時間交互作用項，最佳之 EVA 為 Mitsui

Chemicals。

2.由本研究得知影響 EVA 品質特性關鍵因子，依其結果運用於日清坊公司(Nisshinbo)型號 Lam1222S 之真空熱壓設備可達到最佳化太陽電池之模組封裝，進而有效提升太陽電池模組之發電功率。但目前太陽能模組廠層壓設備型號種類繁多，使用時須再考量品質因子，需要再重新定義水準及進行實驗驗證。若從材料成本考量，本研究之 Bridgestone EVA 採購成本為 100 元/m，而 Mitsui Chemicals EVA 成本為 85 元/m，將成本除以表層材料剝離強度後，可得每單位剝離強度 Bridgestone EVA 為 9.62 元，而 Mitsui Chemicals EVA 為 10.58 元。兼顧膠合性與成本，選用 Bridgestone 之填充材料製作太陽電池模組性價比(Cost-Performance Value)優於 Mitsui Chemicals。

3.經由兩款不同 EVA 製作的太陽電池模組發電功率比較，得知使用 Bridgestone EVA 之模組發電功率可提升 3.51%，而使用 Mitsui Chemicals EVA 之模組僅提升 3.49%，綜合考量膠合性、成本與發電功率，選用 Bridgestone 之產品能獲得較佳的生產效益。

伍、参考文献

- [1] D. Franke and I. Steinbach, “Calculation of Thermal Stresses During the Soldering of Solar Cell Strings”, First WCPEC, pp.1458-1461, 1994.
- [2] Martijn M. Hackmanna, Marcel H.H. Meuwissena, Tom L. Botsa, Jan A.H.M. Buijsa, Kees M. Broekb, RonaldKindermanb, Olga B.F. Tanckc, and Frank M. Schuurmans, “Technical feasibility study on polycarbonate solar panels,” Solar Energy Materials & Solar Cells 84 , pp.105–115, 2004.
- [3] Takeshi Kojima, Takeshi Yanagisawa, “The evaluation of accelerated test for degradation a stacked a-Si solar cell and EVA films,” Solar Energy Materials & Solar Cells 81 , pp.119–123 , 2005.
- [4] K. Agroui, A. Maallemi, M. Boumaour, G. Collins, and M. Salama, “Thermal stability of slow and fast cure EVA encapsulant material for photovoltaic module manufacturing process,” Solar Energy Materials & Solar Cells 90 , pp.2509–2514 , 2006.
- [5] G.J. Jorgensen, K.M. Terwilliger, J.A. DelCueto, S.Glick,M.D.Kempe, J.W. Pankow, F.J. Pern, and T.J. McMahon, “Moisture transport, adhesion, and corrosion protection of PV module packaging materials,” Solar Energy Materials & Solar Cells 90 , pp.2739–2775 , 2006 .
- [6] William H. Holley, Jr. , Susan C. Agro, James P. Galica, and Robert S.,UV, “Stability and module testing of non-browning experimental PV encapsuiants,” 1996.
- [7] Thomas Carlsson, Petri Konttinen, Ulf Malm, Peter Lund,

“ Absorption and desorption of water in glass/ethylene-vinyl-acetate/glass laminates,” Polymer Testing 25 , pp.615–622 , 2006.