

出國報告(出國類別：其他(訪問))

CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池等級可撓式金屬箔技術出國報告

服務機關：國防部軍備局中山科學研究院

姓名職稱：梁仕昌 少校技士

派赴國家：德國

出國時間：101.09.23~101.09.30

報告日期：101.10.25

國防部軍備局中山科學研究院出國報告建議事項處理表

報告名稱	CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池等級可撓式金屬箔技術出國報告		
出國單位	第五研究所	出國人員級職/姓名	少校技士/梁仕昌
公差地點	德國	出/返國日期	<u>101.09.23</u> / <u>101.09.30</u>
建議事項	<p>1.矽基太陽能電池可藉由晶片薄化、使用 N 型晶片及具有摻雜導電膠來達到高效率與降低成本，是未來主流發展之晶圓型矽太陽能電池之技術與材料發展趨勢。</p> <p>2.銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽能電池因材料等性質與電池製作特性，將有機會與矽基太陽能電池同步發展，甚至將矽基市場做部分取代。</p> <p>3.利用捲對捲製程設備達到高品質、高產出、低生產成本，將是 CIGS 薄膜太陽電池未來技術與市場重要產品發展，其中，在整線製程技術、線蒸鍍源關鍵組件開發、阻障層、含鈉背電極、多階段吸收層及緩衝層等關鍵材料之自主化是有必要性，可先掌握關鍵技術、整合製程設備、關鍵材料與專利，並配合整合上下游產業材料與製程產業之同步發展，有機會將此產業從基礎深耕到商業化之全面性發展。</p>		
處理意見	<p>1.本院可透過其他所中心以及國內廠商針對晶圓型矽太陽能電池未來技術與材料發展所需晶片薄化之切割線、N 型晶片及具有摻雜導電膠進行合作開發。</p> <p>2.本院新世代能源關鍵技術開發計畫主要以銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽能電池做為發展標的，在未來輕量與可撓式特性需求，將以可撓式 430 不銹鋼製程發展基材，提高 CIGS 薄膜太陽能電池應用價值。</p> <p>3.本院配合經濟部計畫已陸續投入整線捲對捲製程技術開發，同時，藉由技術開發過程中針對線蒸鍍源關鍵組件設計，且本院已有靶材製作能力，未來可將 MoNa 背電極、Zn(S,O)緩衝層等關鍵材料靶材透過自行開發測試線作驗</p>		

	<p>證，也可將氮化物阻障層應用於銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽能電池中試製，有機會將自主量產線達成運轉，並技術移轉產業完成商品化。</p>
--	-----------------------------------------------------------------------

國防部軍備局中山科學研究院
一〇一年度出國報告審查表

出國單位	第五研究所	出國人員 級職姓名	少校技士 梁仕昌
單 位	審 查 意 見		簽 章
一級單位	<p>一、太陽能電池已是未來綠色能源發展中不可或缺的產業，本院轉型在即，未來組織亦將考量推動相關技術能量的整合及加強上下游的合作關係，以提升本院未來競爭力。</p> <p>二、本報告內容均屬公開之技術資訊，未涉本院研發機密。</p>		<p>第五研究所 倪國裕 10110301650</p> <p>中山科學研究院 薄慧雲 第五所副所長 10111021330</p> <p>中山科學研究院 葛平亞 第五所所長 10111060950</p>
計品會	<p>本次公差參加國際性太陽能電池研討會，獲得許多寶貴的資訊，訂於本週開展英文製程 CIGS 很有幫助。</p>		<p>計品會 魏漢東 專任委員 10111081450</p> <p>計品會 萬紹正 策研室主任 10111081500</p> <p>中山科學研究院 鄭明傑 計品會副主委 10111090820</p>
保 防 安 全 處	<p>案內出國報告（CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫）內容已完成保密檢審作業，對於貴單位認定本件以一般資訊發表，本處敬表同意，無附加審查意見。</p>		<p>保防安全處 洪哲惟 保防官 10111121507</p> <p>中山科學研究院 高學文 保防安全處處長 10111187610</p> <p>中山科學研究院 顏永中 保防安全處副處長 10111121600</p>
企 劃 處	<p>一、本案列本院 101 年出國計畫 101029 號，報告內容符合規定架構及核定出國計畫。</p> <p>二、本公差赴德參加「第 27 屆歐洲太陽能研討會與展示會」，蒐集太陽能電池及光伏系統應用等技術，瞭解綠色產業市場趨勢，做為本院能源關鍵技術開發之參考。</p> <p>三、請將奉核報告電子檔及紙本裝訂 5 份送本處續辦。另請於返國後 3 個月內，將報告電子檔登錄行政院資訊網及本院圖書館工作報告資訊網。</p>		<p>企劃處 梁瓊真 科技組秘書 10111181050</p> <p>企劃處 嚴家仁 科技組副組長 10111141100</p> <p>企劃處 吳炳文 科技組組長 10111141610</p> <p>中山科學研究院 葉德華 企劃處副處長 10111150810</p>
批		示	
<p style="text-align: center;">10111161510</p>			

國外公差人員出國報告主官（管）審查意見表

針對梁員赴德參加2012年27屆歐洲太陽能研討會與展示會之建議事項，本院已在開發、整合相關技術，太陽能電池仍為目前綠色產業與市場發展重點，其中，銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽能電池因材料等性質與電池製作特性，將有機會與矽基太陽能電池同步發展，甚至將矽基市場做部分取代。現今本院於CIGS薄膜太陽電池開發係以捲對捲製程設備開發為重點，期以達到高品質、高產出、低生產成本等特質以符合未來技術與市場發展需求。透過測試線之驗證來掌握關鍵技術、整合製程設備、關鍵材料與專利，再加上促進上下游產業材料與製程產業之整合與同步發展，期將自主量產線完成運轉開發，並技術移轉產業完成商品化。

第五研究所
冶金組組長 倪國裕
10110301652

中山科學研究院
第五所副所長 薄慧雲
1011102133045

出國報告審核表

出國報告名稱：**CIGS 太陽能電池關鍵技術開發計畫-太陽能電池等級可撓式金屬箔技術出國報告**

出國人姓名 (2 人以上, 以 1 人為代表)	職稱	服務單位
梁仕昌	少校技士	國防部軍備局中山科學研究院

出國類別：考察 進修 研究 實習
其他 (訪問) (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)

出國期間：101 年 09 月 23 日至 101 年 09 月 30 日 報告繳交日期：101 年 10 月 25 日

計
畫
主
辦
機
關
審
核
意
見

1. 依限繳交出國報告 計管組：
2. 格式完整
3. 無抄襲相關出國報告
4. 內容充實完備
5. 建議具參考價值
6. 送本機關參考或研辦
7. 送上級機關參考
8. 退回補正，原因：不符原核定出國計畫 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 電子檔案未依格式辦理 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔
9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。
於本機關業務會報提出報告
其他 本報告已於 101 年 10 月 26 日完成組內同仁知識分享。
10. 其他處理意見及方式：

第五研究所 計管組資訊員 楊煥煥 10110310830
 第五研究所 計管組技正 王俊傑 10110310840
 第五研究所 計管組副組長 陳彥良 10110310900

敬會：保防官及保防督導官

本件報告僅為赴德國參加 2012 年歐洲太陽能研討會出國報告，經審議內容屬於科專案項目，未涉及科研或國防相關研究，非屬「國家機密保護法」及「軍事機密與國防秘密種類範圍等級劃分準則」等法條所規範時；另報告乃依公開分發之資料撰擬，做為爾後研究或發展方向參考，並無包含本所實質研究成果資料，尚未屬於營業秘密法等相關智慧財產權保護標的，故本案列屬一般性文件。

管主管) 機關首長或其授權人員

第五研究所 孫作堯 10110310930
 中山科學研究院 第五所副所長 陳興民 10110250290

人 第五研究所 洽金組技士 梁仕昌 10110261030
 第五研究所 洽金組組長 倪國裕 10110261050
 中山科學研究院 第五所副所長 薄慧雲 1011021330
 中山科學研究院 第五所所長 葛平亞 1011060910

說明：
 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報 告 資 料 頁

1.報告編號： CSIPW-101Z-H0006	2.出國類別： 其他(訪問)	3.完成日期： 101.10.25	4.總頁數： 57
5.報告名稱： CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池等級可撓式金屬箔技術出國報告			
6.核准 文號	人令文號 部令文號	101.08.28 國人管理字第 1010011352 號 101.8.23 國備科產字第 1010012767 號	
7.經 費		新台幣：110,899 元	
8.出(返)國日期		101.09.23 至 101.09.30	
9.公 差 地 點		德國	
10.公 差 機 構		2012 年 27 屆歐洲太陽能研討會與展示會	
11.附 記			

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池等級可撓式金屬箔技術

出國報告

頁數 57 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

國防部軍備局中山科學研究院/梁仕昌/03-4712201-357219

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊 振/國防部軍備局中山科學研究院/五所冶金組/少校技士/03-4712201-357219

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他(訪問)

出國期間：101.09.23~101.09.30 出國地區：德國

報告日期：101.10.25

分類號/目：

關鍵詞：矽基太陽能電池、CIGS 太陽能電池、捲對捲製程

內容摘要：(二百至三百字)

太陽能電池目前綠色產業與市場發展重點，矽基太陽能電池終將以晶圓型矽太陽能電池為主來發展，可藉由晶片薄化、使用 N 型晶片及具有摻雜導電膠來達到超高效率與降低成本，而銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽能電池因材料等性質與電池製作特性，將有機會與矽基太陽能電池同步發展，甚至將矽基市場做部分取代，目前本院利用捲對捲製程設備達到高品質、高產出、低生產成本，將是 CIGS 薄膜太陽能電池未來市場重要發展，可先掌握關鍵技術、整合製程設備、關鍵材料與專利，並配合整合上下游產業材料與製程產業之同步發展，達到自主量產線之運轉及技術移轉商品化之可行性。

目 次

壹、目的.....	10
貳、過程.....	10
參、心得.....	20
肆、建議事項.....	56

CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池等級可撓式金屬箔技術出國報告

壹、目的

為執行「CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫-太陽電池級可撓式金屬箔技術」，擬赴德參加「27 屆歐洲太陽能研討會與展示會」，蒐集新材料研究暨設計概念及超高效率原理與最新的晶圓型矽太陽能電池及材料技術，並研討銅銦鎵硒薄膜太陽能電池及光伏系統、組件相關應用技術，同時，因應計畫朝向連續式銅銦鎵硒太陽能電池之產製(R2R-CIGS)建置，於展示會中參觀國外公司最新的產品資訊，汲取目前製程、材料與技術發展現況，俾利後續計畫執行與規劃作業。此次公差目的如下：

- 1、蒐集新材料研究暨設計概念及超高效率原理與最新的晶圓型矽太陽能電池及材料技術，瞭解未來太陽電池材料發展趨勢。
- 2、研討銅銦鎵硒薄膜太陽能電池及光伏系統、組件相關應用技術，瞭解銅銦鎵硒薄膜太陽能及光伏系統應用的發展潛力。
- 3、參觀參展廠商最新的產品資訊，汲取目前捲對捲連續式銅銦鎵硒太陽能電池之產製(R2R-CIGS)製程、材料與技術發展現況，俾利後續計畫執行與規劃作業。

貳、過程

歐洲太陽能研討會與展示會起於 1977 年，至今已有 30 年歷史，是全球相當具規模的太陽能領域專業盛會，全球各技術環節的研究人員、技術專家、產業分析代表、公營機關以及民生用戶將共聚一堂，分享彼此經驗，齊為未來全球太陽能源系統的進步而努力。近來年主要於德國舉辦，第 27 屆歐洲太陽能會議和展示會於德國法蘭克福舉行，透過舉行的研討會樹立了太陽能光電研究領域的里程碑，集合來自一百多個國家、一千五百多名與會人士，共同發表超過一千多篇的研究報告，針對太陽能電池效率提升、穩定性與使用壽命、太陽能發電理論之基礎研究、功率計算與實驗操作、標準釐定與新式設備介紹；展示會部分有超過 530 家的廠商，包括晶片製造商、太陽能電池與模組研發單位與供應商、經銷商、工程技術顧問

公司等，展示獨樹一格的太陽能光電產品。研討會將包括先進技術介紹課程、專題演講與海報展覽、專案計畫展示、PV 市場應用與產業發展可行性介紹、各國研發產品博覽會、工作會報與論壇、以及實地技術示範廠參觀。研討會共分六大主題：

1.材料研究、新概念及超高效率

T1.1 基礎材料研究

T1.2 新材料、元件與模組

T1.3 太陽能元件、模組及太空用太陽能系統

T1.4 地面聚光系統

2.晶圓型矽太陽能電池及材料技術

T2.1 矽原料，結晶和矽片切割

T2.2 矽太陽能電池的改良

T2.3 矽太陽能電池的特性與模組

T2.4 生產議題及製造

3.薄膜太陽能電池

T3.1 薄膜型單晶矽太陽能元件

T3.2 非晶與多晶矽太陽能元件

T3.3 銻化鎘、銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件

T3.4 有機太陽能電池

4.光伏系統的組件

T4.1 太陽能電池模組

T4.2 平衡系統組件

T4.3 標準化

5.光伏系統

T5.1 大型光伏電站和分佈式光伏：系統方面和電網一體化

T5.2 光伏與建築

T5.3 離網應用

6.光伏 - 主要電力來源

T6.1 市場

T6.2 光伏電混合

T6.3 經濟的可持續發展

T6.4 光伏全球化，政策和行政障礙

研討會與展示會議程表

2012/9/24(星期一)

時間	議程內容				
0830~1000	報名與大會開幕(材料研究、新概念及超高效率會議研討)				
1000~1030	國際學者、專家交流				
1030~1200					
1200~1330	午餐				
1330~1500	T2.2 矽太陽能 電池的改 良	T3.2 非晶與多 晶矽太陽 能元件	T1.2 新材料、元 件與模組	T5.1 大型光伏 電站和分 佈式光 伏：系統方 面和電網 一體化	T2.1 矽原料，結 晶和矽片 切割
1500~1515	休息				
1515~1645	T2.2 矽太陽能 電池的改 良	T3.2 非晶與多 晶矽太陽 能元件	T1.2 新材料、元 件與模組	T5.1 大型光伏 電站和分 佈式光 伏：系統方 面和電網 一體化	T2.4 生產議題 及製造

1645~1700					
1700~1830	T2.2 矽太陽能電池的改良	T3.2 非晶與多晶矽太陽能元件	T1.2 新材料、元件與模組	T1.3 太陽能元件、模組及太空用太陽能系統 T1.4 地面聚光系統	T2.3 矽太陽能電池的特性與模組

2012/9/25(星期二)

時間	議程內容					展示會
0830~1000	晶圓型矽太陽能電池及材料技術會議研討					
1000~1030	休息					
1030~1200	T3.2 非晶與多晶矽太陽能元件	T2.1 矽原料、結晶和矽片切割	T1.1 基礎材料研究	T5.2 光伏與建築 T5.3 離網應用	T2.3 矽太陽能電池的特性與模組	
1200~1330	午餐					
1330~1500	T3.4 有機太陽能電池	T2.2 矽太陽能電池的改良	T1.3 太陽能元件、模組及太空用太陽能系統	T4.1 太陽能電池模組	T2.2 矽太陽能電池的改良	
1500~1515	休息					
1515~1645	T3.4	T2.2	T1.4	T4.1	T1.2	

	有機太陽能電池	矽太陽能電池的改良	地面聚光系統	太陽能電池模組	新材料、元件與模組
1645~1700	休息				
1700~1830	T3.4 有機太陽能電池	T2.2 矽太陽能電池的改良	T1.4 地面聚光系統	T4.2 平衡系統組件 T4.3 標準化	T1.2 新材料、元件與模組

2012/9/26(星期三)

時間	議程內容						展示會
0830~1000	T3.1 薄膜型單晶矽太陽能元件	T5.1 大型光伏電站和分佈式光伏：系統方面和電網一體化	T4.1 太陽能電池模組	T2.3 矽太陽能電池的特性與模組	T3.3 銻化鎘，銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件	T2.2 矽太陽能電池的改良	
1000~1030	休息						
1030~1200	薄膜型單晶矽太陽能元件會議研討						
1200~1330	午餐						
1330~1500	T3.3 銻化鎘，銅銦硒及其相關三元與四元	T5.1 大型光伏電站和分佈式光伏：系統	T4.1 太陽能電池模組	T2.3 矽太陽能電池的特性與模組	T3.1 薄膜型單晶矽太陽能元件	T2.2 矽太陽能電池的改良	

	薄膜太陽能元件	方面和電網一體化					
1500~1515	休息						
1515~1645	T3.3 銻化鎘, 銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件	T5.1 大型光伏電站和分佈式光伏: 系統方面和電網一體化	T4.1 太陽能電池模組	T2.1 矽原料, 結晶和矽片切割	T6.1 市場 T6.2 光伏電混合	T2.2 矽太陽能電池的改良	
1645~1700	休息						
1700~1830	T3.3 銻化鎘, 銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件	T5.1 大型光伏電站和分佈式光伏: 系統方面和電網一體化	T4.3 標準化	T2.1 矽原料, 結晶和矽片切割	T6.3 經濟的可持續發展 T6.4 光伏全球化, 政策和行政障礙	T1.1 基礎材料研究	

2012/9/27(星期四)

時間	議程內容			展示會
0830~1000	晶圓型矽太陽能電池及材料技術會議研討	T6.3 經濟的可持續發展	T3.2 非晶與多晶矽太陽能元件	
1000~1030	休息			

030~1200	光伏系統的組件會議研討 光伏系統會議研討				
1200~1330	午餐				
1330~1500	T2.4 生產議題 及製造	T4.2 平衡系統 組件	T5.2 光伏與建 築	T6.1 市場	T3.2 非晶與多 晶矽太陽 能元件
1500~1515	休息				
1515~1645	T2.4 生產議題 及製造	T4.1 太陽能電 池模組	T2.2 矽太陽能 電池的改 良	T6.2 光伏電混 合	T3.3 銻化鎘,銅 銻硒及其 相關三元 與四元薄 膜太陽能 元件
1645~1700	休息				
1700~1830	T2.3 矽太陽能 電池的特 性與模組	T4.1 太陽能電 池模組	T5.3 離網應用	T3.3 銻化鎘,銅 銻硒及其 相關三元 與四元薄 膜太陽能 元件	T3.4 有機太陽 能電池

2012/9/28(星期五)

時間	議程內容				展 示 會
0830~1000	T6.3 經濟的可 持續發展	T2.2 矽太陽能 電池的改良	T4.1 太陽能電 池模組		
1000~1030	休息				
1030~1140	光伏 - 主要電力來源會議研討				
1140~1200	休息				
1200~1330	研討會結束				
1330~1500					
1500~1515					
1515~1645					
1645~1700					

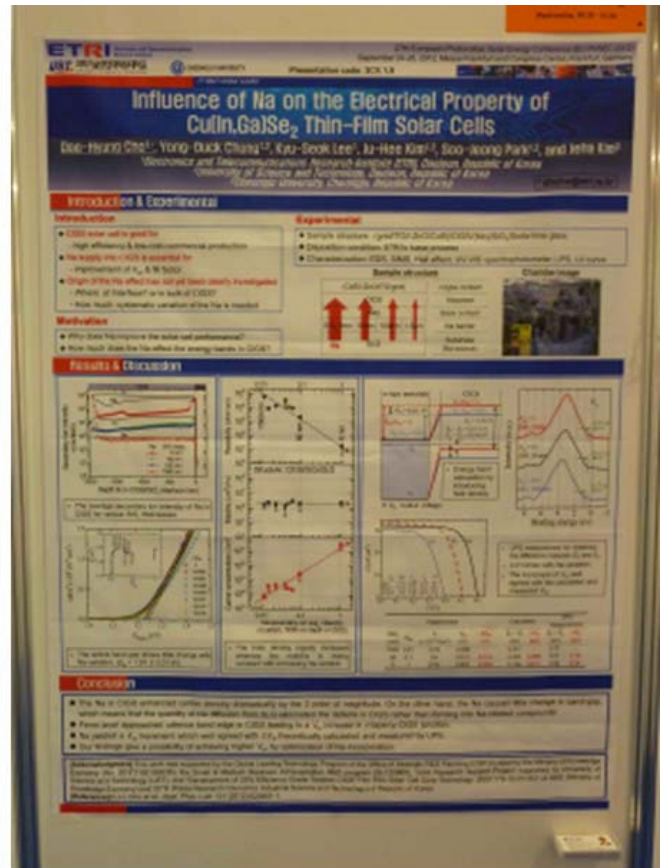
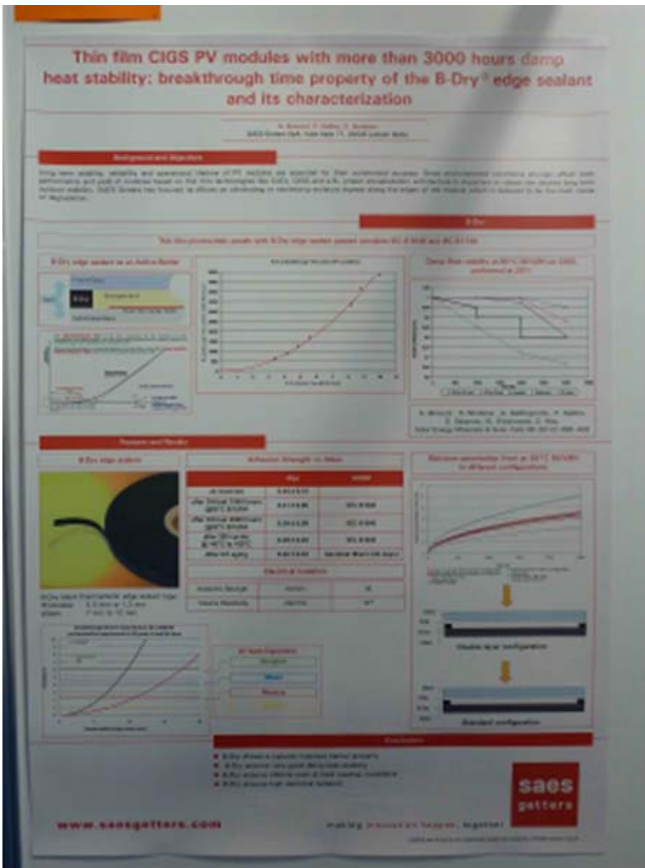
本次研討會內容相當豐富，參與研討會及出席人數仍相當踴躍，圖一為演講者精彩的演講情況與會學者交流討論實況，展示場中相關 CIGS 太陽能廠商，如圖二，及不同研究主題論文發表海報，如圖三。



圖一 演講者精彩的演講情況與會學者交流討論實況



圖二 展示場中相關CIGS太陽能廠商



論文題目: Thin film CIGS PV modules with more than 3000hures damp heat stability: breakthrough time property of the B-Dry edge sealant and its characterization

論文題目: Influence of Na on the electrical property of Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells

圖三 不同研究主題論文發表海報

每日工作行程內容

日期	星期	行程		公差地點	工作項目
		出發	抵達		
101.09.23	日	桃園			去程
101.09.24	一		法蘭克福	德國 法蘭克福	1.辦理註冊報到。 2.參加材料研究、新概念及超高效率會議，並與國際學者、專家交流新材料計設原理。 3.研討新材料、元件與模組技術，可做為瞭解未來太陽電池材料發展趨勢之參考。
101.09.25	二			德國 法蘭克福	1.參加晶圓型矽太陽能電池及材料技術會議，瞭解未來發展趨勢。 2.蒐集太陽能元件、模組及太空用太陽能系統等應用技術。 3.研討新材料、元件與模組技術，可做為瞭解未來太陽電池材料發展趨勢之參考。
101.09.26	三			德國 法蘭克福	1.參加薄膜型單晶矽太陽能元件會議。 2.蒐集大型光伏電站和分佈式光伏：系統方面、電網一體化和標準化等應用技術。 3.研討銻化鎘、銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件之最新發展技術，可作為計畫後續建案之規劃參考。
101.09.27	四			德國 法蘭克福	1.參加晶圓型矽太陽能電池及材料技術、光伏系統與組件技術會議，瞭解未來太陽市場及離網應用。 2.研討銻化鎘、銅銦硒及其相關三元與四元薄膜太陽能元件之最新發展技術，可做為計畫執行參考。 3.參觀參展廠商最新的產品資訊，汲取目前製程、材料與技術發展現況。
101.09.28	五			德國 法蘭克福	1.參加光伏 - 主要電力來源會議，瞭解未來太陽電池之經濟的可持續發展方向。 2.參觀參展廠商最新的產品資訊，汲取目前連續式銅銦鎳硒太陽能電池之產製(R2R-CIGS)製程、材料與技術發展現況，俾利後續計畫執行與規劃作業。
101.09.29	六	法蘭克福			回程
101.09.30	日		桃園		回程

參、心得

一、概述

因應全球氣候變遷、溫室效應日益嚴重，煤、石油和天然氣等能源供應日趨短缺，世界各國皆積極發展替代能源，替代能源約分為太陽能、風力、水力、地熱與生質能等五大類型，其中以太陽能最受各國發展矚目，而太陽能電池技術演進可分為三個世代，第一代太陽能電池為矽晶太陽能電池，其技術發展較為成熟，目前市場占有率將近八成，第二代太陽能電池為薄膜太陽能電池包括矽薄膜技術（非晶矽（a-Si, Amorphous Silicon）、微晶矽（ $\mu\text{-Si}$, Micro-crystalline Silicon）及薄膜多晶矽）、化合物半導體薄膜技術（銅銦鎵硒型（CIGS, CuInGaSe_2 ）、III-V族及碲化鎘（CdTe, Cadmium Tellurid））以及新興材料技術（如染料敏化、奈米技術等），目前市場占有率將近二成，第三代太陽能電池為利用奈米結構、結合有機或高分子材料，開發出來的先進太陽能電池，仍以實驗室發展中為主，距離商品化仍有一段差距。

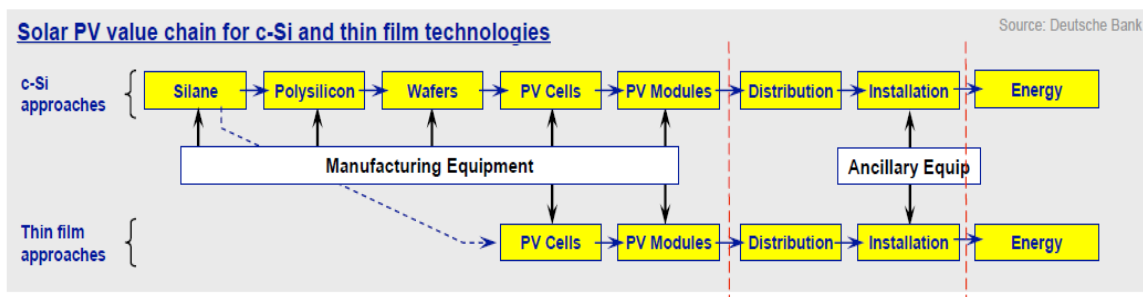
目前太陽電池市場雖仍以矽晶為主，但薄膜太陽電池仍具備市場的實用性與競爭力條件為：1.材料成本較低：相較於單晶與多晶矽太陽電池來說，薄膜太陽電池所使用材料厚約3 μm 以內，為其單晶與多晶矽太陽電池1/100；2.製程相對簡化：矽基與薄膜式太陽能電池之製造流發現投入薄膜式太陽電池產業垂直整合度高，製造流程短，整體薄膜式太陽電池產業鏈短，太陽能轉換效能提升律動快，且投資回收期短；3.能源消耗較少：雖然太陽能電池係屬無污染能源發電系統，但其投入生產太陽能電池中仍需消耗能量去製作，經國外評估矽基太陽能電池從原物料到模組過程中之單位產生面積需耗電約薄膜式太陽能電池三倍左右，也就是說大部份矽基太陽能電池需選擇電力便宜且供電無虞地區生產；4.日照有效發電量高：在相同發電條件下，薄膜式太陽能較不受日照環境影響，均能為維持良好發電效能，具高應用性。

二、超高效率晶圓型矽太陽能電池及材料技術之發展趨勢與現況

參與 27 屆歐洲太陽能展示會中發現矽基型太陽能電池主要以晶圓型為主，對於多晶矽基型太陽能電池以及非晶型太陽能電池幾乎看不到，且 n-type 晶圓型太陽能電池與超薄型晶圓型也是會場展示詢問度最高展品之一，依矽基型太陽能電池演進，主要分幾個方面討論：

1.製程成本

因未來對於太陽電池每瓦發電成本需降到 0.5 美元/瓦，在近年矽基原料成分降低需多，但整個矽基太陽能電池生產流程包含矽純化提煉、晶棒製作、切割成晶片、電池製作、模組封裝以及後續銷售與安裝(如圖四所示)，其生產流程較薄膜式太陽能電池長，基於製程成本考量，除了必須整個矽基太陽能電池生產流程做垂直整合來控制生產成本外，在矽純化提煉、晶棒製作技術非常成熟而降低生產成本有限情況下，另一個降低生產成本考量就是減少切割成晶片所造成材料損失，同時達到晶片薄化(如圖五所示)，展示場中晶片可薄化至 40um，相較目前晶片厚度 200~300um 間，可以大幅降低材料 80~90%使用率，同時，因晶片薄化後，可以減少電洞在塊狀矽基材傳導路徑，有助於晶圓型太陽電池效率提升。



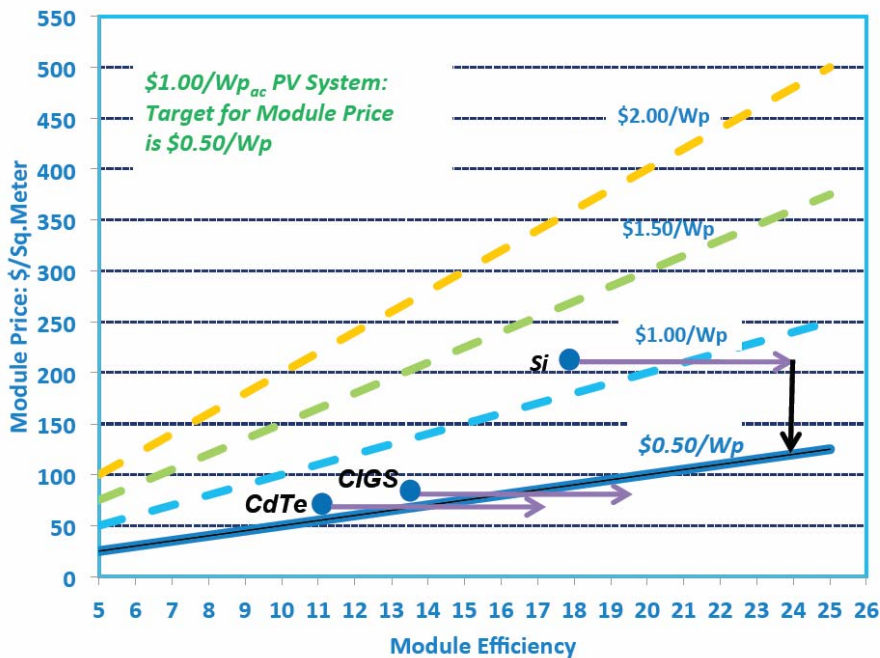
圖四 矽基與薄膜式太陽能電池之製造流程示意圖(資料來源：Deutsche Bank)



圖五 超薄型矽基太陽能電池模組

2.超高效率晶圓型矽太陽能電池之技術與材料發展

如上述製程生產成本考量外，太陽能電池效率也是成本考量之一，如圖六所示，在相同生產瓦數下，在太陽能電池效率轉換效率提升 1%，其生產之總發電量可提升 6%，也就是說在單位模組成本可降低 6%或單位發電瓦數可提高 6%，整體效益均可以 6%複合式成長，未來矽基太陽能電池效率要達到每瓦發電成本低於 0.5 美元以下，其生產效率必須往 20%以上發展，這也是展示場中主要晶圓型矽太陽能電池為主，其他多晶型太陽能電池等幾乎展出很少。



圖六 各式太陽能電池之模組效率與售價比較(資料來源：Current Trends in Photovoltaics Santa Barbara Summit on Energy Efficiency)

展示會中有光電轉換效率達 20%以上之高效率晶圓型矽太陽能電池模組展示(如圖七所示)，為達超高效率晶圓型矽太陽能電池之技術與材料發展會有幾個重點，第一改變目前所選用矽基材料半導體本質，從固態物理角度來說，電子遷移速率遠大於電洞(兩者相差 100 倍以上)，其主要載子復合速率之特性會決定產品設計應用，半導體選用 n-type 晶片當作邏輯 IC 晶體材料，主要可透過電子高速復合電洞而作為通路開關用，相對於太陽能選用 p-type 晶片，主要把光電效應下產生電子與電洞導出，進而減少復合機率，但從半導體本質上來說，矽基

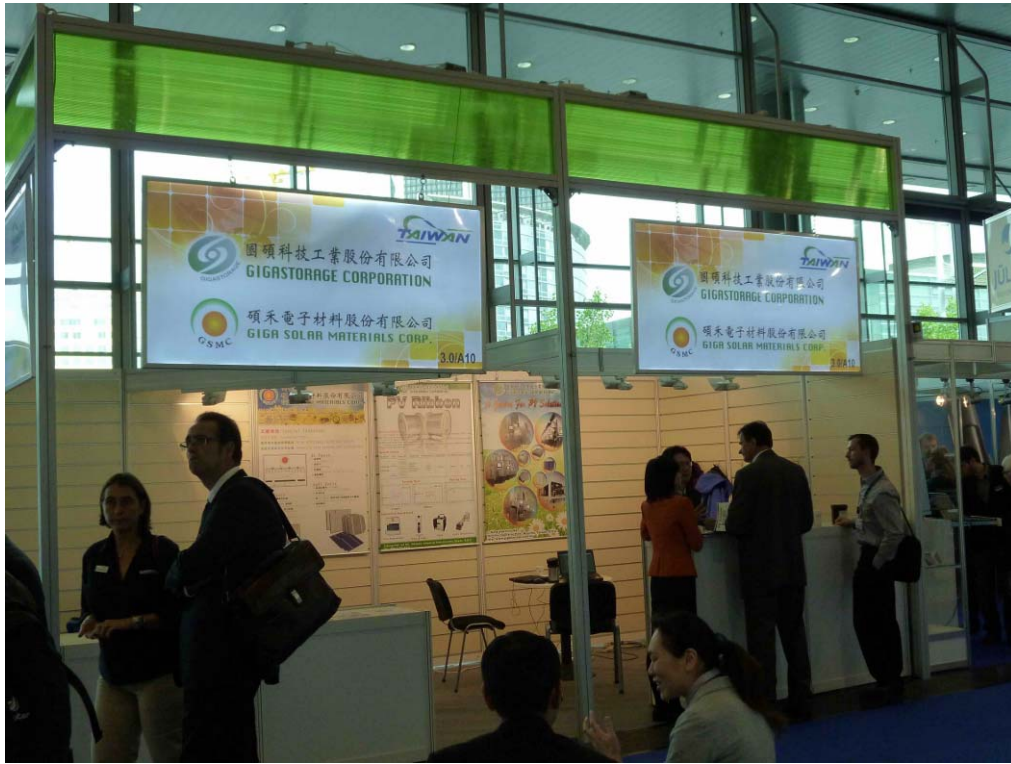
屬於非直接能隙材料，加上晶片厚度約 200~300um 間，很容易造成復合機率提高，若能以 n-type 晶片為主要電池生產材料，可以克服此問題；第二就選用 p-type 晶片製作電池而言，一般僅將 p-type 晶片置換成約 100~200nm n-type 表面，因此，發生復合機率最高位於下電極 Al 與矽基塊材界面，所以改善方式係將 Al 擴散至 p-type 晶片表面，使表面形成 P⁺狀態，就半導體真空能帶來說，p-type 晶片表面會形成退化型半導體，進而形成背電場效應(Back Surface Field, BSF)，可提高光電流產出以及降低復合，同樣的概念，上電極與光窗層部分也是主要發生復合機率高地方，因此，導電銀膠也扮演很重要腳色，展示會台灣碩禾公司為目前這方面產品佼佼者(如圖八所示)，後續研究發展可藉由導電銀膠內參雜磷等材料，使得上電極與光窗層接觸部分之光窗層表面形成 n⁺狀態，也可達到上述相同效果，可使模組電流提高；第三電極位置改善，因為目前所有上電極都位於入光面，會有遮光效應，造成光線進入半導體前就會有光損失，也同樣造成太陽能電池效率降低。因有上述幾個因素限制，單就以往矽基結構生產條件下，單晶矽元件效率約 18~18.5%(模組約 16~16.5%)、多晶矽元件效率約 16~16.5%(模組約 14~14.5%)，量產矽基太陽能電池效率很難超過 20%。

為克服上述問題，現今有三種高效率晶圓型矽太陽能電池之主要量產發展，分別是指插型、異質型與溝槽型，以指插型晶圓型矽太陽能電池為目前量產效率最高，主要發展公司為美國 Sunpower 公司，該公司採取從上游到下游之一條鞭垂直整合來控制成本外，其晶片採用 n-type，同時將電極製作於同一側，來避免金屬遮罩產生光損問題，且採用許多網印技術來製作電池，近年台灣友達公司與該公司合資，於馬來西亞設廠投資製作電池，同時，友達の子公司-精材公司進行 n-type 晶片生產，供應給 Sunpower 公司，但 n-type 晶片生產難度相當高，對於少數載子生命週期要求須接近 200ms 左右，若無法達到高品質晶片，會產生嚴重復合現象，進而使太陽能電池降低許多；另外，異質型太陽能電池為目前量產效率次高，主要由日本 Sanyo 公司主導發展，該公司也跟 Sunpower 公司一樣，以垂直整合來控制成本，除了與 Sunpower 公司選用相同 n-type 晶片外，但其整個製程有別於 Sunpower，Sanyo 公司主要藉由化學氣向沉積法(CVD)來製作太陽能電池膜層，來製作高效率太陽能電池；溝槽型太陽能電池以中國孚日光電公司為主要發展者，其仍採用 p-type 晶片生產，但該公司利用雷射進行晶片刻劃，將電極埋入晶片中，也可以生產出效率超過 20%電池。台灣茂迪公司與益通公司還是以傳統生產電池方式為主 (如圖七-左上圖)，就生產太陽能電池效率而言，會比上述三種型

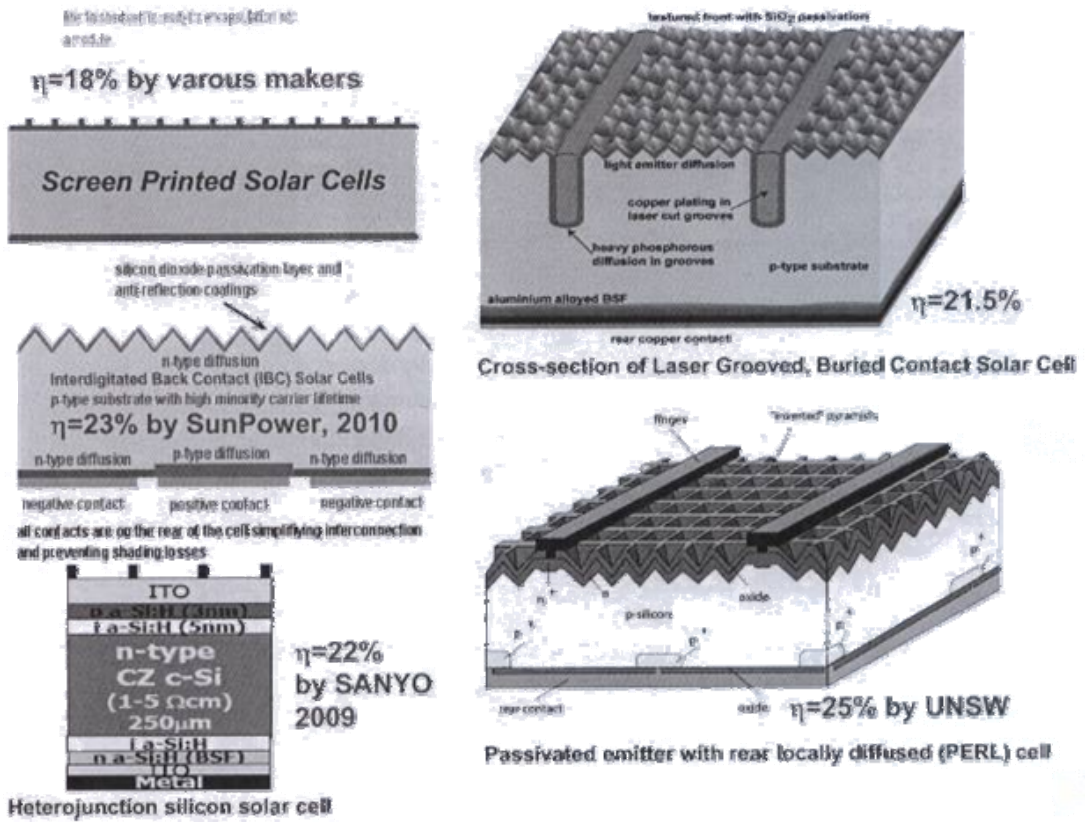
態太陽能電池效率低約 2~6%以上，相對競爭力會比較弱，目前若還維持傳統生產電池方式，僅能利用導電銀膠內參雜磷等材料，利用後退火擴散方式，來使上電極與光窗層接觸部份有局部重摻雜，來使效率再往上提高一些，不過藉由導電銀膠內參雜磷擴散較難控制，目前此種方式尚未達到生產量化，仍屬於研究階段。



圖七 高效率晶圓型矽太陽能電池模組



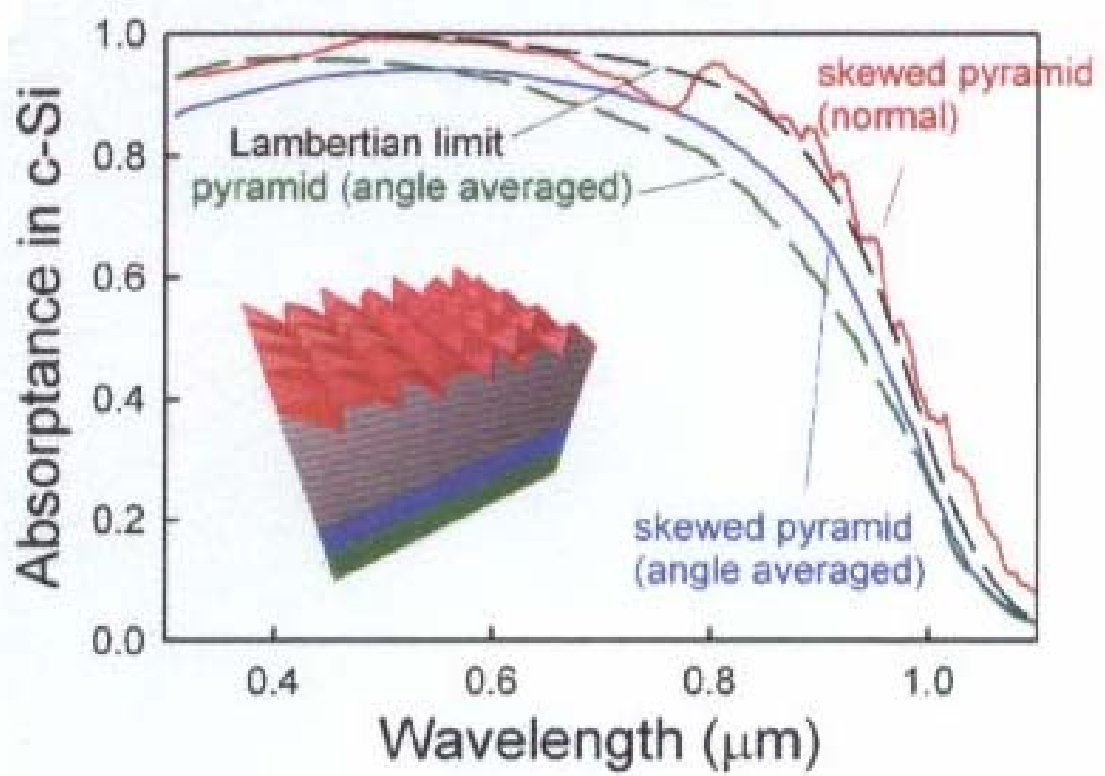
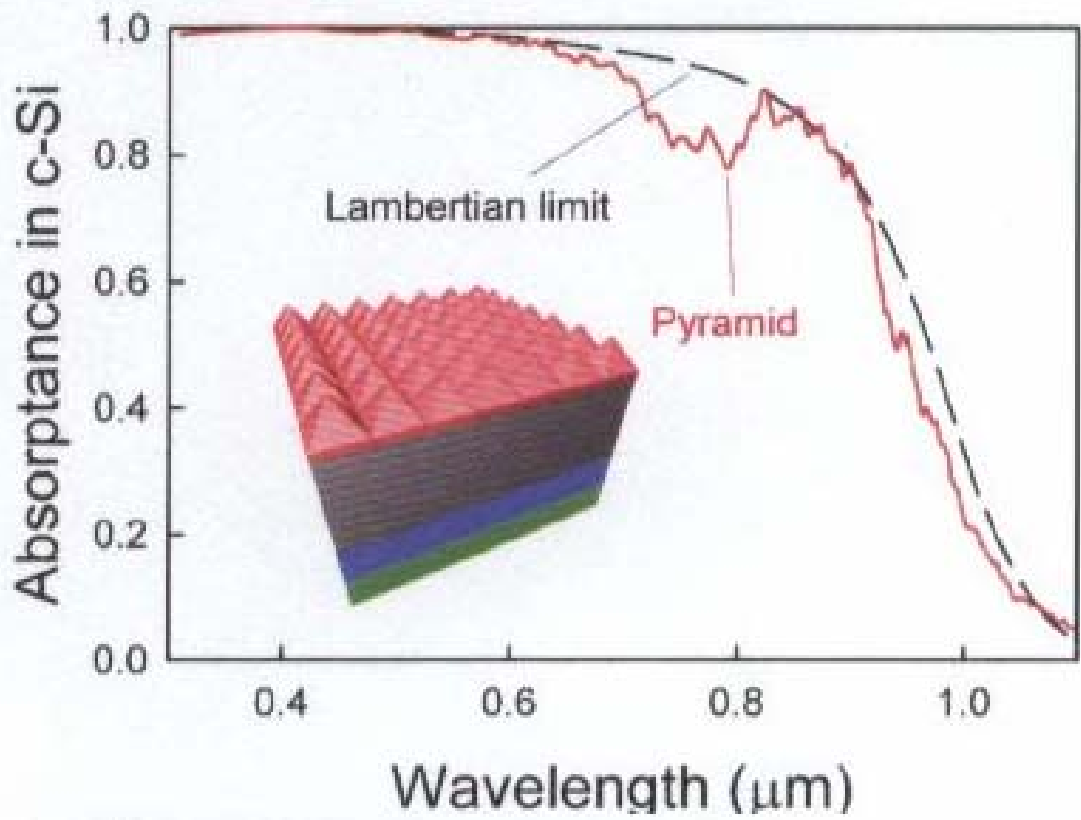
圖八 台灣碩禾公司



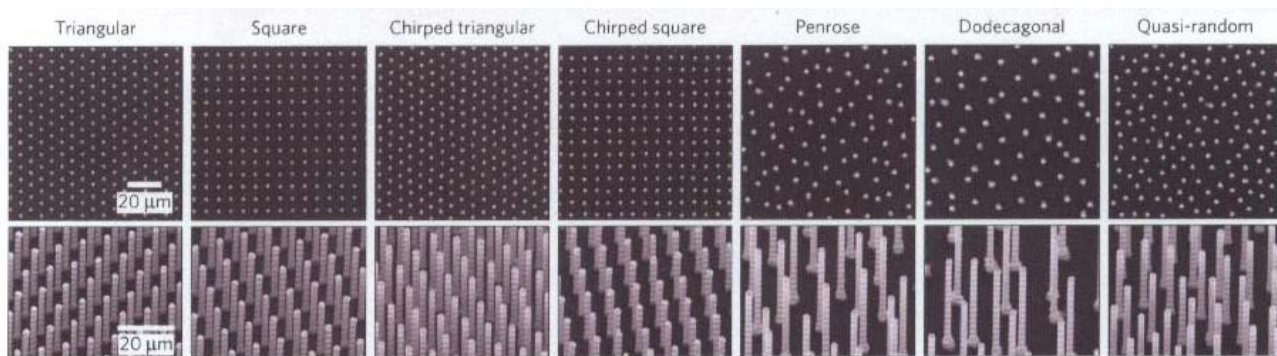
圖九 高效率晶圓型矽太陽能電池結構圖

此外，因矽基太陽電池半導體本質吸收係數 α 約為 10^3 cm^{-1} 左右，原則上需要 100~200um 之厚度才能將 99%以上之入射太陽光吸收，且本身為非直接能隙性質的半導體，晶片表面需要圖形化，如表面形成金字塔結構狀態，來增加入射太陽光漫射或散射現象(或稱光陷效應,light trapping effect)，使得光行進路徑加長，進而提升效率，在目前光陷效應研究學理上，另有提出幾種方式來提升矽基本質之光的吸收係數，進而使效率提升或是降低材料使用率，其機制包含電漿散射(plasmonic scattering)、繞射光柵(diffraction grating)以及奈米結構陣列散射(nano-structure arrays scattering)。

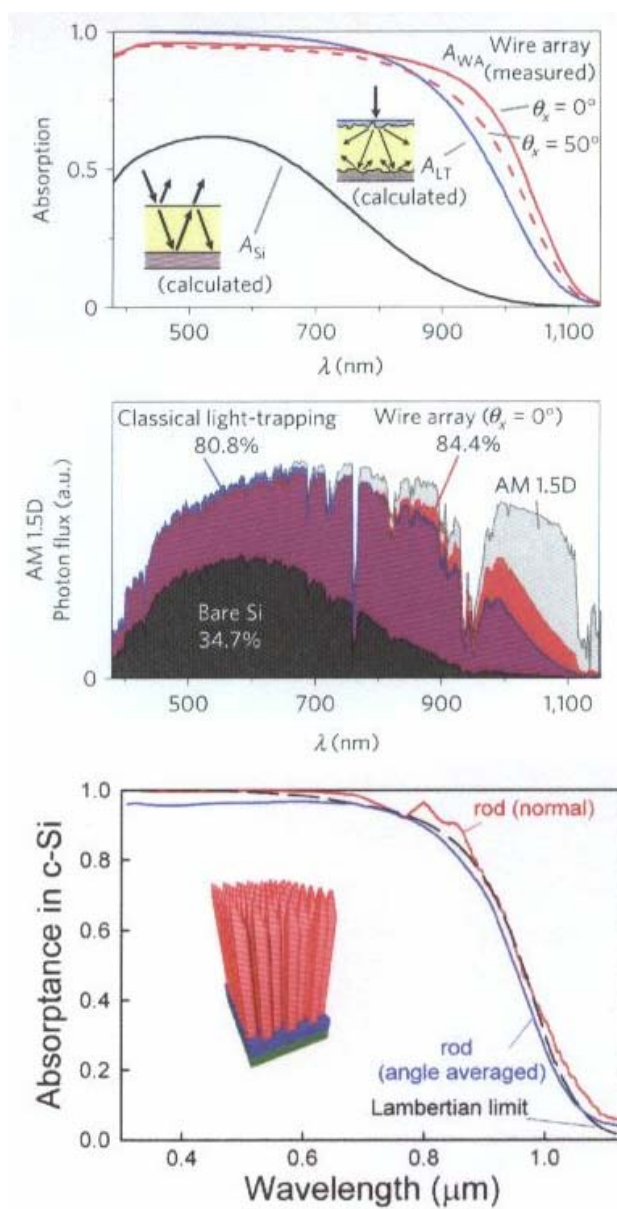
在幾何光學範疇中，表面結構吸收特性會根據藍柏亭光陷效應(Lambertian light trapping effect)來決定整個材料在熱動力學上之最大吸收係數(如圖十所示)，其效應類似黑體，藉由表面不同幾何結構來增加光行進路徑，而將入射太陽光完全吸收，目前可由固液氣成長方式製作(Vapour-liquid-solid grown process)不同幾何形狀矽基結構，如圖十一所示，特別矽基柱狀結構對於入射太陽光吸收在近紅外光區吸收特性比較好(如圖十二所示)，其中，吸收特性與藍柏亭極限(Lambertian limit)之 $4n^2/(\sin\theta)^2$ 成正比關係，其中 n 為材料折射係數， θ 為入射太陽光角度，而矽基材料折射係數為 3.5，當 $\theta=90^\circ$ (平面法向量)時，藍柏亭極限在 $4n^2$ 乘積下，光行進路徑可比原本達 50 倍，因整體對於光之吸收係數提高，可將原本 100~300um 晶片厚度減為 1~3um，同時提高其理論效率(如圖十三所示)。



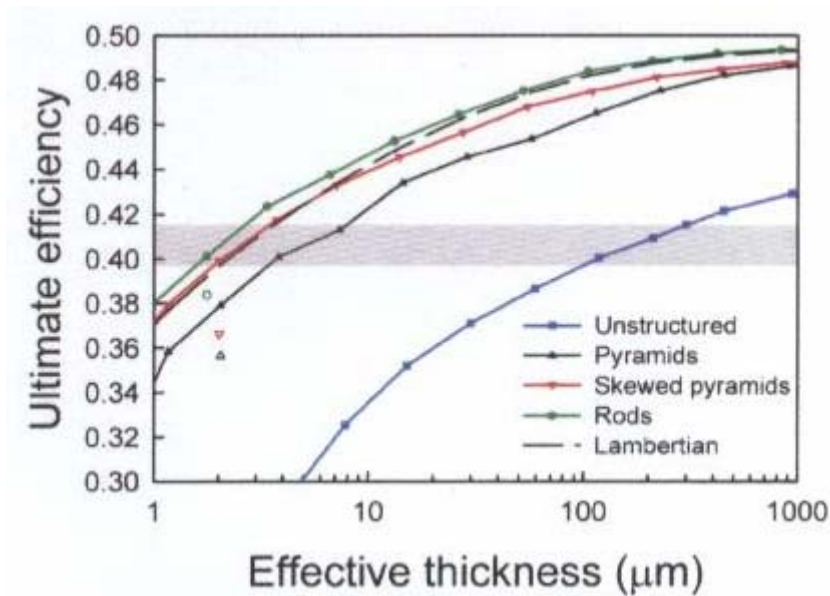
圖十 不同幾何結構之藍柏亭光陷效應



圖十一 不同幾何形態之矽基柱狀結構

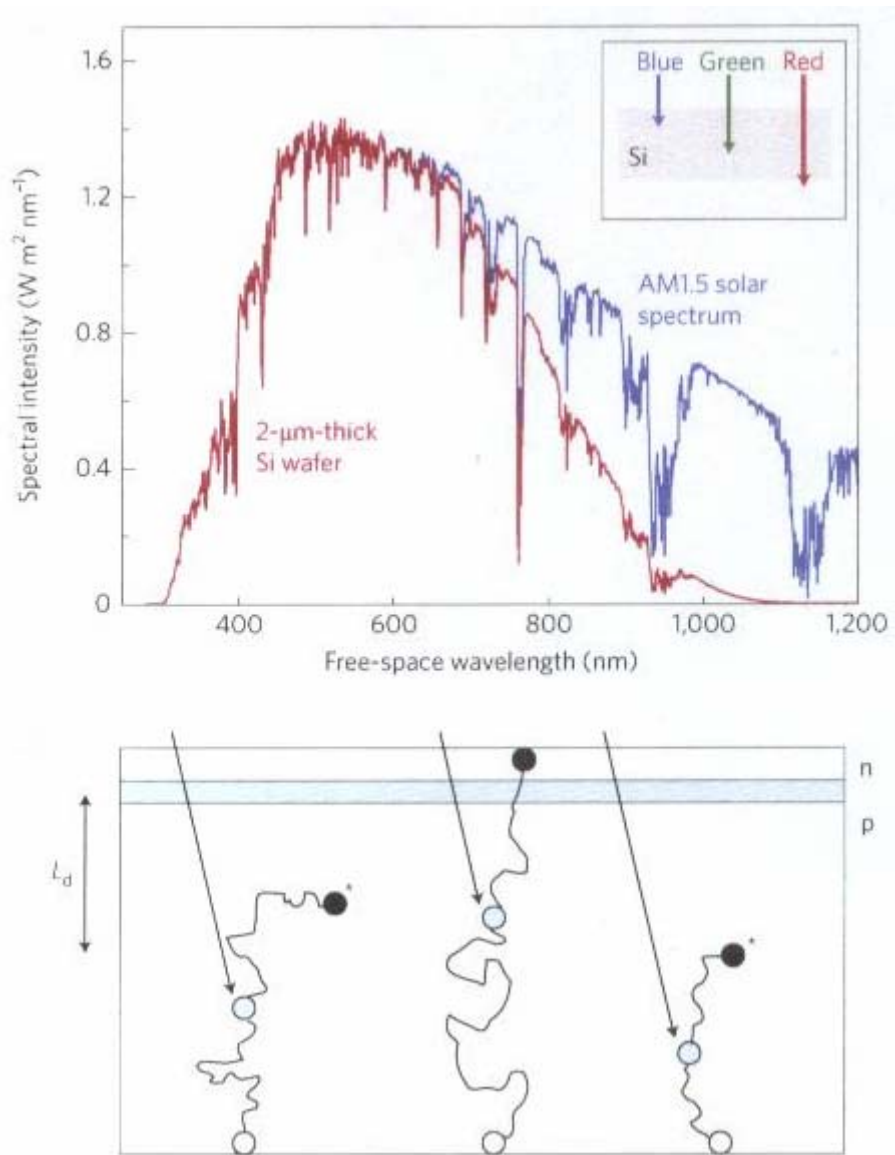


圖十二 矽基柱狀結構之吸收特性

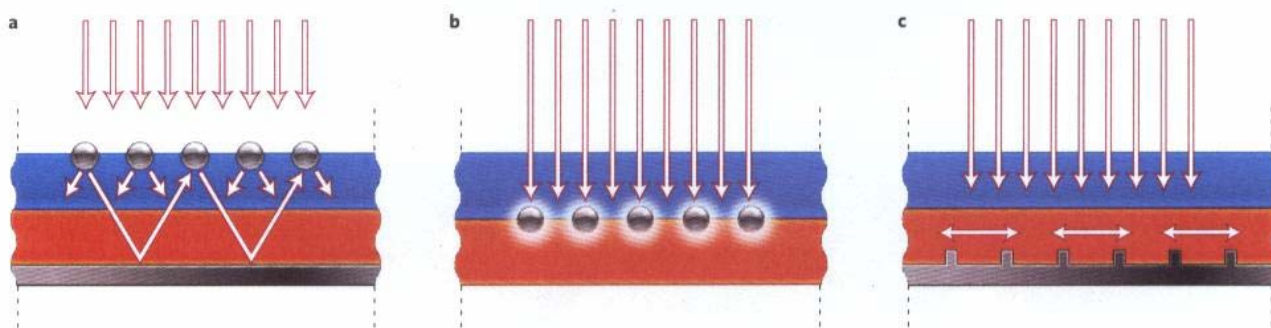


圖十三 不同厚度對於不同表面結構條件下之效率關係圖

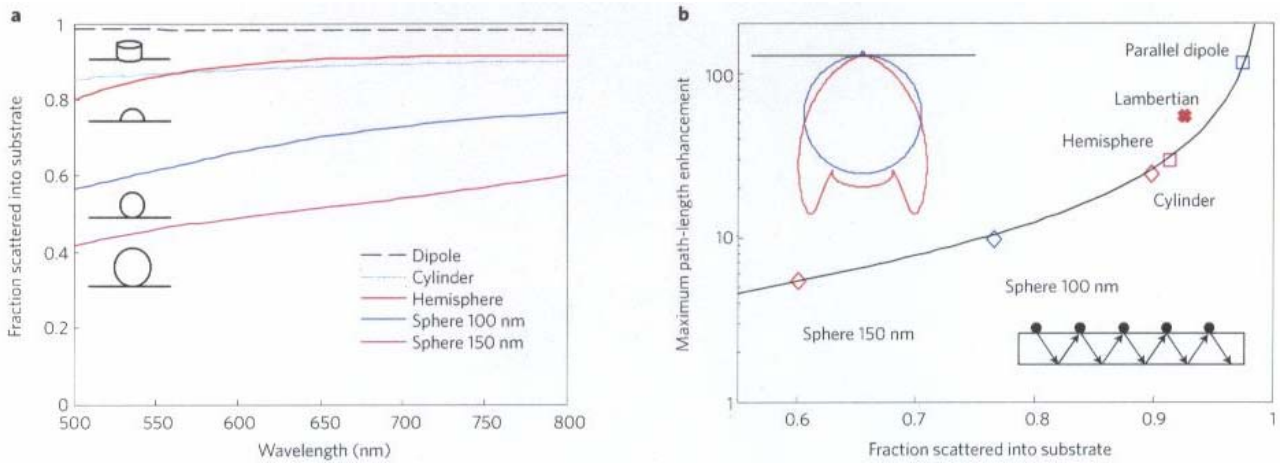
此外，不同光波對於矽基材料有不同光電轉換效率(如圖十四所示)，較短波長光進入具有 PN 特性之半導體中，因其穿隧深度較淺，所以產生光電子、電洞可以比較有效率導入導帶與價帶中，相對於長波長光之光電轉換效率因行進路徑較長而光電轉換效率較低，因此，另有別於上述改變表面結構之電漿散射光陷特性被提出，仍從固態物理中切入說明，一般定義金屬導電特性有其本身價帶、導帶重合與費米能帶位於導帶之兩種說法，當奈米等級之金屬在照光時，光會與金屬表面電子雲產生激發現象，將激發電子從導帶進行傳導，若奈米等級之金屬與半導體進行組合(如圖十五所示)，則從金屬表面激發電子會傳入半導體材料中，進而達到光電轉換，其中，當金屬粒子尺寸越小，在電漿散射光陷特性越佳，且金屬粒子屬於奈米方塊結構，可以提高光側向散射，其吸收特性可以突破藍柏亭效應(如圖十六所示)。目前近年研究上對於在電漿散射、繞射光閘以及奈米結構陣列散射之光陷效應投入很多研究，主要目的除了為提高矽基材料本身對於光吸收特性而增加理論光電轉換效率外(目前塊狀矽基理論效率 25%)，另外就是為達到減少材料使用率之成本考量。



圖十四 不同光波對於矽基材料有不同光電轉換效率



圖十五 奈米等級金屬與半導體之不同組合

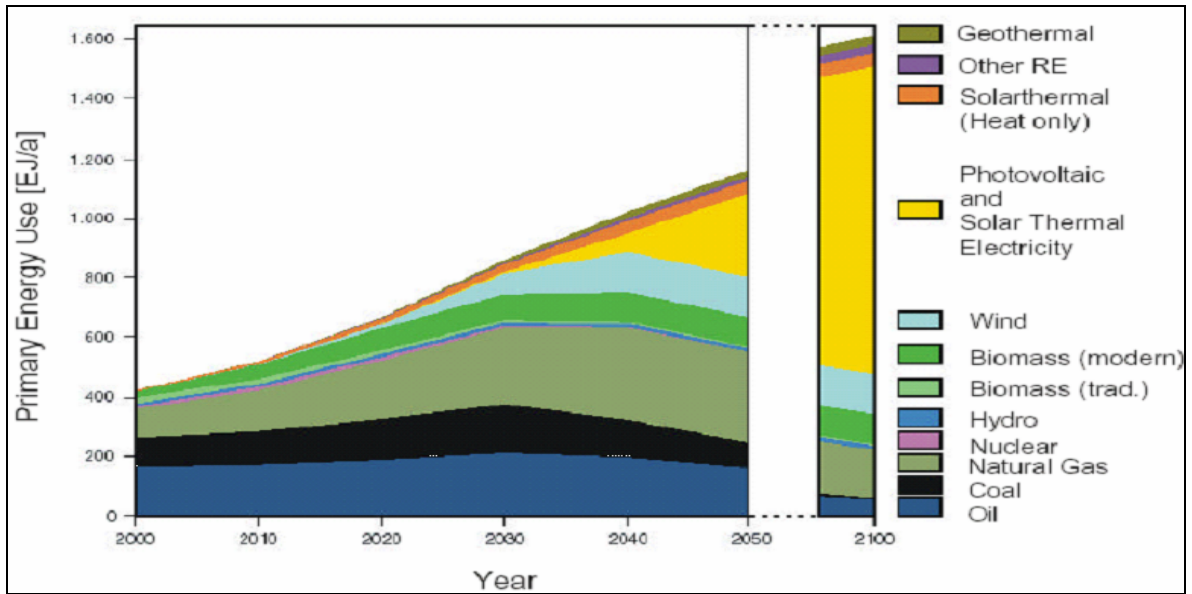


圖十六 不同奈米幾何形狀結構對於不同波長之散射特性

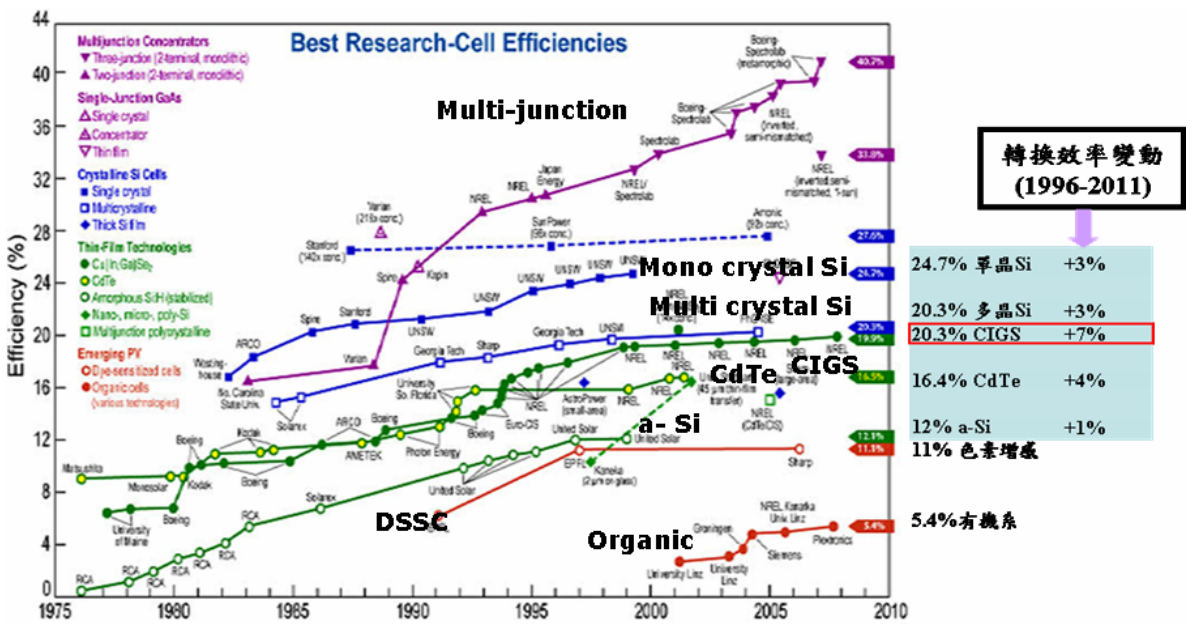
三、薄膜式 CIGS 太陽能電池之未來趨勢對其材料及製程技術發展

1. 薄膜式 CIGS 太陽能電池未來趨勢

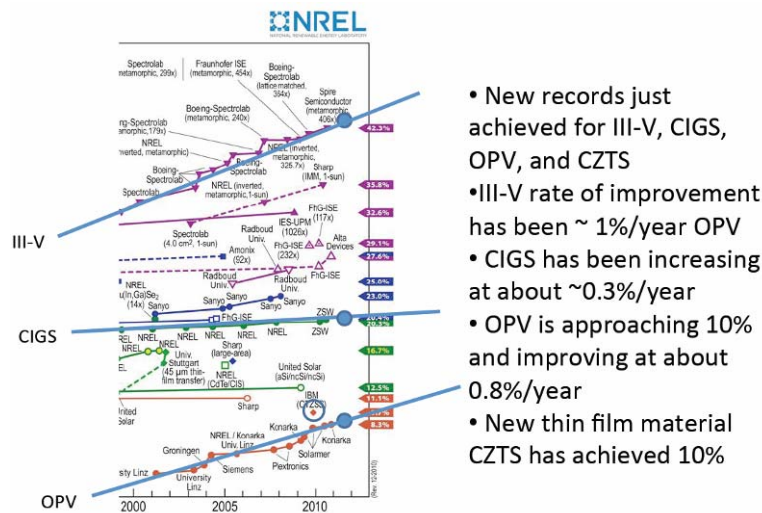
在世界各國皆積極發展替代性之綠色能源中，預估至 2100 年全球能源使用太陽能的利用率將達 60%(如圖十七所示)，在種類眾多太陽能電池中，CIGS(銅銦鎵硒)薄膜太陽能電池擁有高轉換效率及發展潛力而受到矚目，目前 CIGS 薄膜太陽能電池最高轉換效率由德國 ZSW 所創造，其效率已達 20.3%。從圖十八可以看到各式太陽能電池轉換效率之發展，其中 CIGS 從 1995 年發展至今轉換效率已經提高足足有 7%之多，相較於同樣時間內 CdTe 的 4%、單晶矽與多晶矽各為 3%以及非晶矽的 1%，足以看出 CIGS 在轉換效率上的發展潛力，且 NREL 於 2011 年評估報告顯示，CIGS 在轉換效率上會以每年 0.3%往上成長，如圖十九所示，同時，CIGS 屬於 I-III-VI 族的多晶黃銅礦結構 (Chalcopyrite) 化合物，是一種由 II-VI 族化合物閃鋅礦結構 (Zinc-Blend Structure) 所衍生而來的半導體材料，由兩個閃鋅礦之單位晶胞堆疊而成，原屬 II 族元素之晶格位置由 I 族及 III 族所取代而形成，而黃銅礦內部 In 所處晶格位置則可為所添加之 Ga 元素取代。CIGS 具有直接能隙(Direct band-gap)性質的 P-type 半導體特性，並且有相當高的光吸收係數 $\alpha(\alpha=10^4\sim 10^5 \text{ cm}^{-1})$ ，是單晶矽的 100 倍，可涵蓋大部分的太陽光譜，與其他太陽能電池相比，故僅需 $1\mu\text{m}$ 的厚度，即可吸收 99%以上的入射太陽光。



圖十七 德國政府諮詢委員會所預測至 2100 年全球能量供給量分佈圖(資料來源：German Advisory Council on Global Change(WBGU))



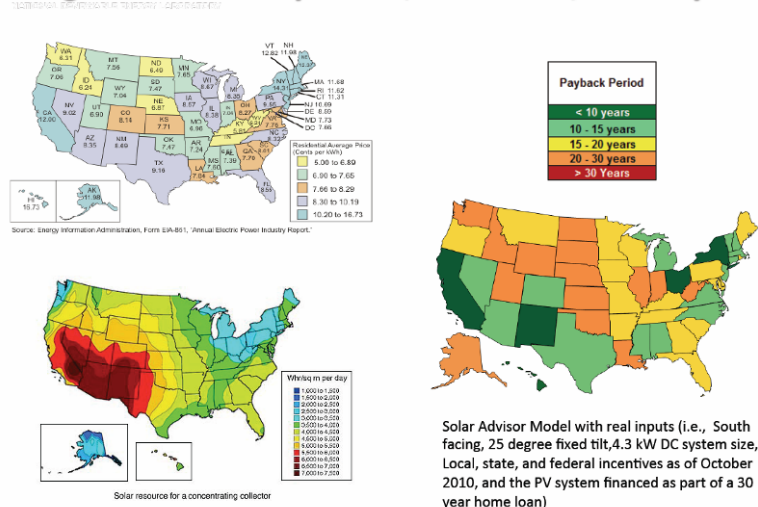
圖十八 各式太陽能電池轉換效率之發展(資料來源：NREL 2011)



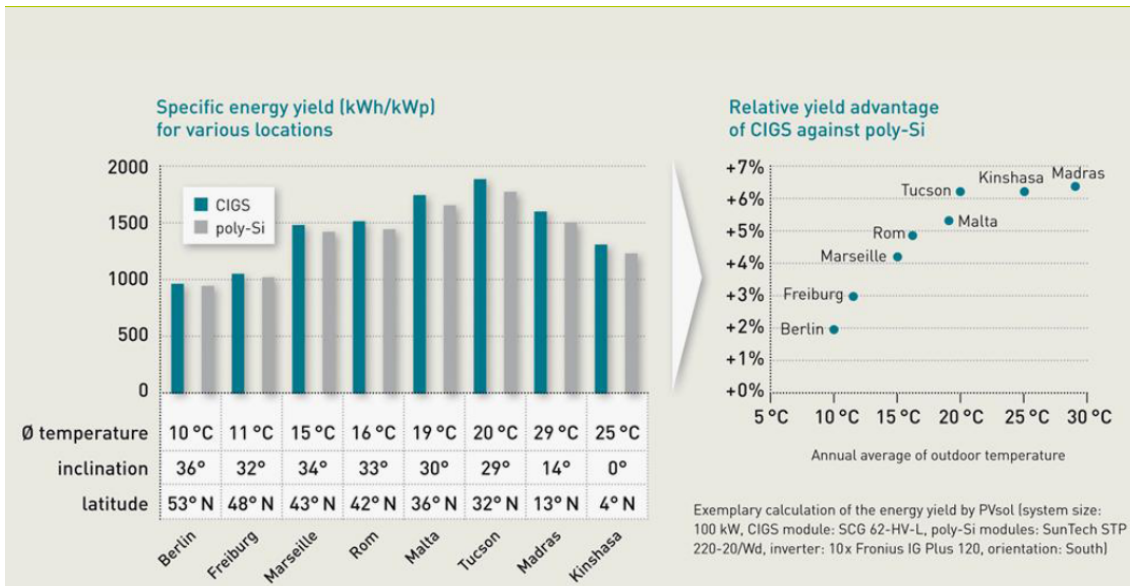
圖十九 不同種類型太陽能電池每年效率提升預估圖(資料來源：NREL 2011)

若從每日日照有效發電量考量來說，矽基太陽電池需要有較多光源的地方，加上矽基太陽電池本身不管單晶或是多晶等結構，由於半導體本質為非直接能隙特性，當日照不足時，幾乎無法產生電力，在經濟上考量就是日照電力轉嫁成實際發電價格時，投入太陽電池生產與安裝成本回收期會有很大不同，如圖二十所示，而在相同發電條件下，CIGS 薄膜太陽電池所產生電力比矽基太陽電池多 2~7%(如圖二十一所示)，CIGS 薄膜式太陽能較不受日照環境影響，不同緯度區域均能為維持良好發電效能，具高應用性，也就是在矽基照度不足區域是未來 CIGS 太陽能電池亟欲開發的市場。

Regional Electricity Prices, Insolation, and Payback



圖二十 投入太陽電池生產與安裝成本回收期會 (資料來源：Current Trends in Photovoltaics Santa Barbara Summit on Energy Efficiency)



圖二十一 矽基與 CIGS 薄膜式太陽能電池之有效電力產能比較(資料來源：Nikolaus Meyer | SNEC PV Power Expo)

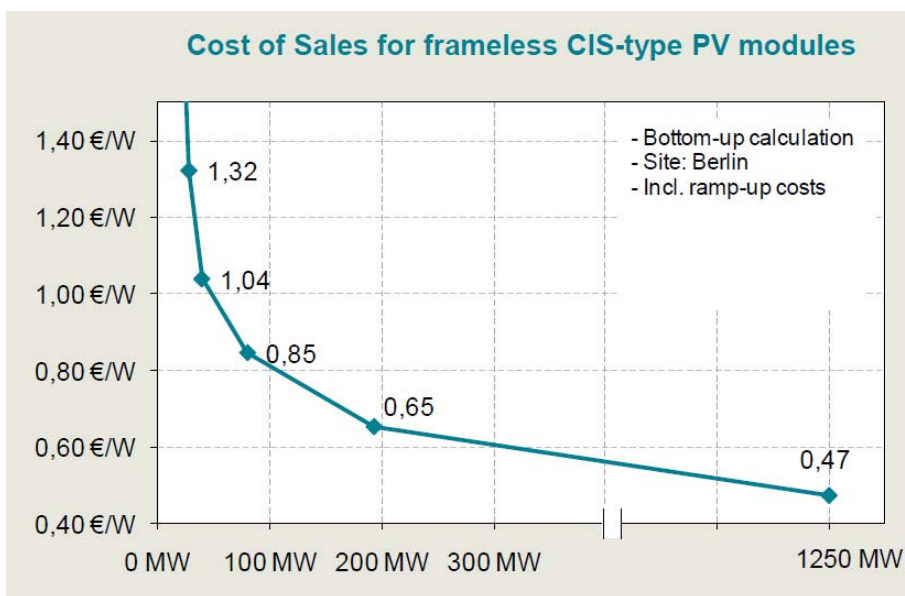
因銅銦鎵硒(CIGS)薄膜型太陽電池具有諸多優點而且在歐美日受到極大的矚目及大量的投資，唯其吸收層尚未有成熟的標準製程，各國研究單位及業界大廠製程上都採自行研發，大致整理歸類製備吸收層方式共分兩大類：1.真空製程(高效率製程方式)，包含共蒸鍍及濺鍍前趨物與硒化製程(大面積量化)；2.非真空製程，包含電鍍及塗佈等。現階段已有德國ZSW在小面積(0.41cm²)達到轉化效率20.3%，美國Global Solar大面積(8,709 cm²)達10.2%、德國Wurth Solar公司大面積(6,507 cm²)達13%，近期德國manz公司、Wurth Solar公司、ZSW之技術合作，可以蒸鍍在玻璃基板上之模組效率達14.6%，(如圖二十二所示)。

然而，根據圖二十三資料顯示CIGS太陽能電池發電市場價格需求往每瓦一美元趨勢下需要幾個條件：1.模組效率須達13%以上；2.產能須達100MW以上；顯示以真空法製作方式有機會達到由上述條件，非真空製作方式雖然製程投資成本較低，因其效率低而為達相同發電瓦數需要更多太陽能板的組合，後續衍生材料成本與生產成本提高甚多，非真空製備CIGS太陽能模組未來投入市場應用端機會不大，另一個考量方向，元件轉換效率提升1%，其總生產量發電量可提升6%，也就是說在單位模組成本可降低6%或單位發電瓦數可提高6%，整體效益均可以6%複合式成長，當CIGS薄膜式太陽能電池模組效率達13%以上(接近多晶矽模組效率14.5%)，整個矽基太陽能市場將會由CIGS薄膜式太陽能電池取代，由此可知未來CIGS

薄膜式太陽能電池將會以真空製程作為主要生產方式。

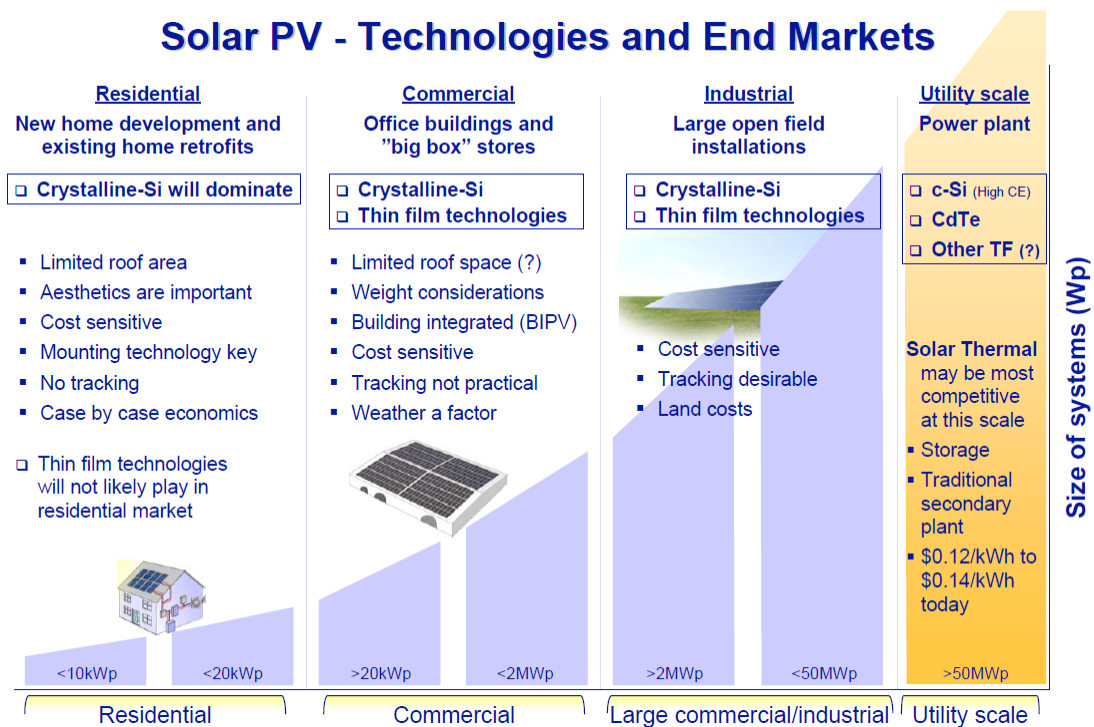


圖二十二 德國manz公司展示CIGS太陽能模組

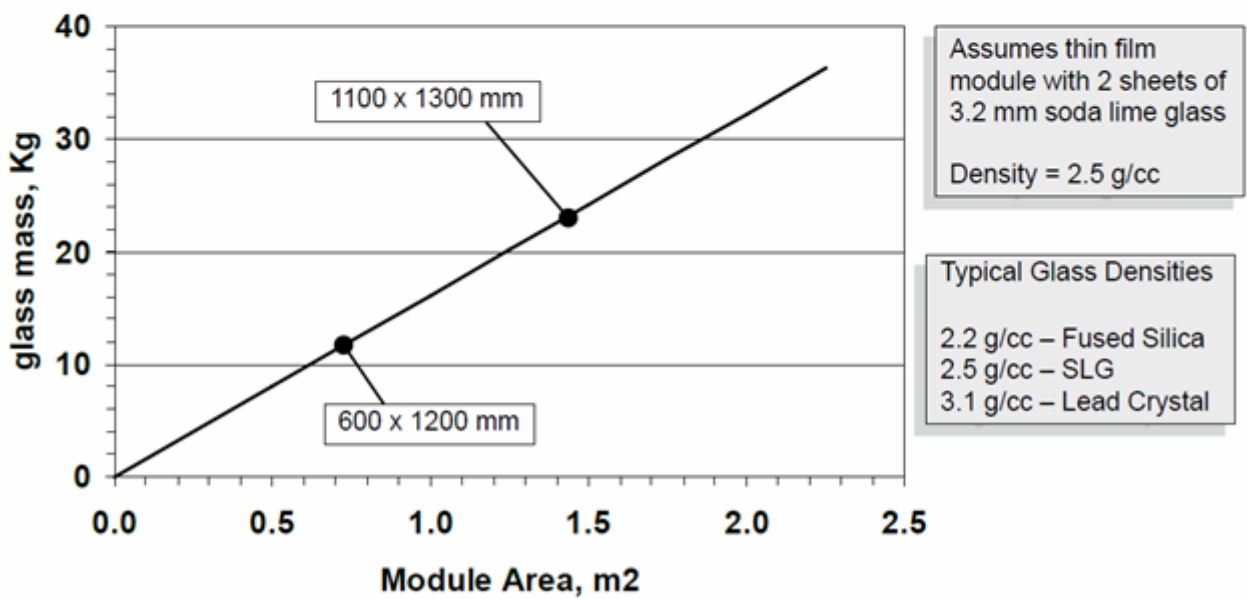
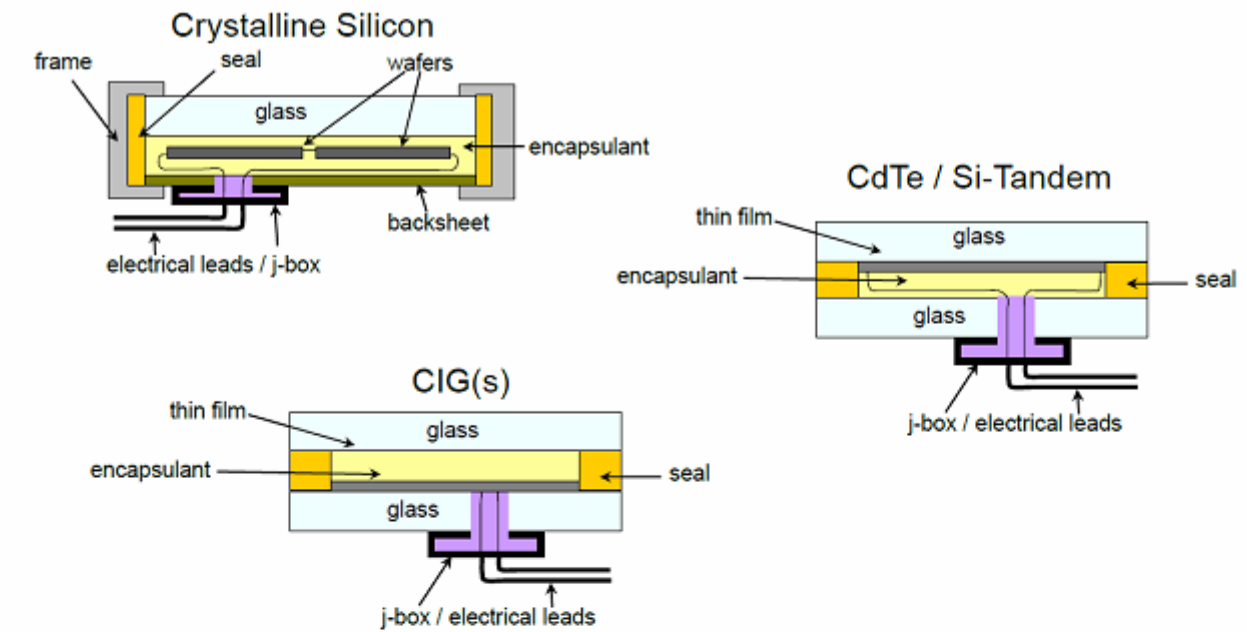


圖二十三 CIGS太陽能生產瓦數與市電價格趨勢圖

另外，太陽能電池之發電需求與應用端大致可發為四類(如圖二十四所示)：1. $\leq 20\text{KWp}$ ：住家用、2. $20\text{KWp}\sim 2\text{MWp}$ ：商業用、3. $2\text{MWp}\sim 50\text{MWp}$ ：工業用或大型商業用、4. $> 50\text{MWp}$ ：公共用，但圖二十五可知模組需用兩片玻璃，1KW模組重量約達260公斤(不含框架及變壓器等組件)，加上近年地震頻傳，輕量化、可折化、可撓化、可攜式為市場應用需求會逐漸成長，甚至有機會取代現有玻璃基材應用市場(如圖二十六所示)，以蒸鍍製程作為主要生產方式中，可應用於硬板玻璃與可撓式金屬基材，未來採用蒸鍍方式製作CIGS薄膜式太陽電池比重可預期增高，因此，CIGS薄模式太陽電池用捲對捲製程設備、蒸鍍源關鍵組件開發、關鍵材料之自主化是有必要性，且需同時考量製造成本、設備稼動率與產品良率及效率，亦是市場是否接受之關鍵，目前國外系統商在CIGS太陽能電池製造技術上尚未取得獨占之統一標準，但近年仍以整廠生產設備線輸入做為商業模式，因台灣設備商規模小，面對大型化量產線設備之投資風險高，未來該產業整體發展，將先以掌握關鍵技術、整合製程設備、關鍵材料與專利，透過先導測試線之驗證，以保證自主量產線之運轉及技術移轉商品化之可行性，並同時配合整合上下游產業材料與製程產業之同步發展，有機會將此產業從基礎深耕到商業化之全面性發展。

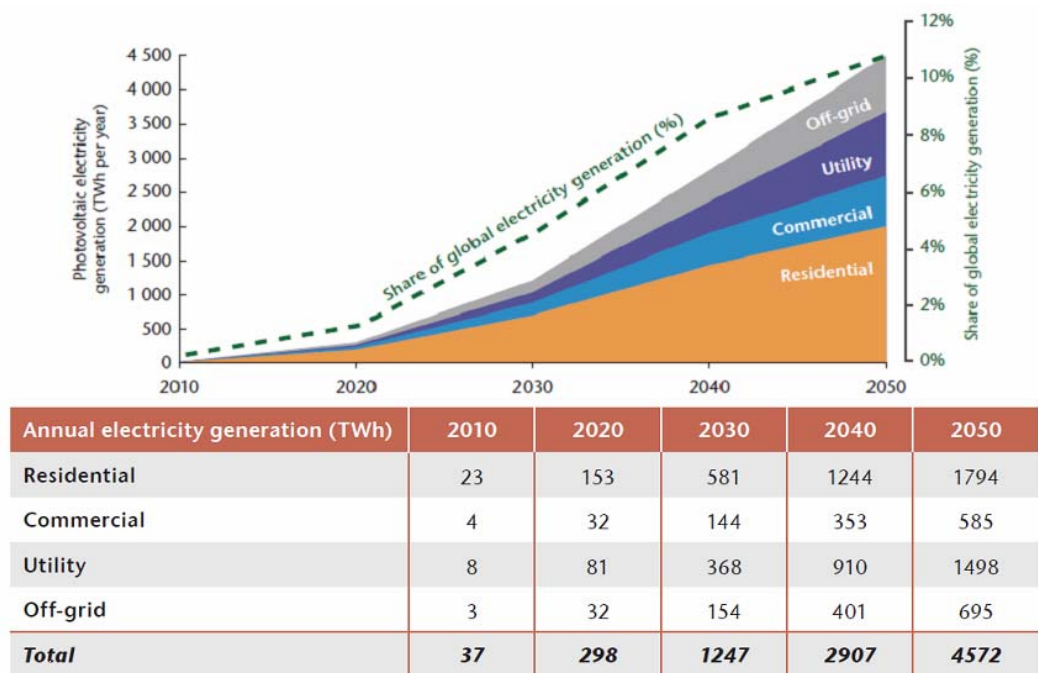


圖二十四 太陽能電池之發電需求與應用端(資料來源：Deutsche Bank Securities)



Thin glass and glass density can decrease module weight

圖二十五 太陽能電池模組結構圖及不同面積玻璃重量示意圖(資料來源：2011 NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop)



圖二十六 市場應用需求(資料來源：IEA analysis based on survey reports of selected countries)

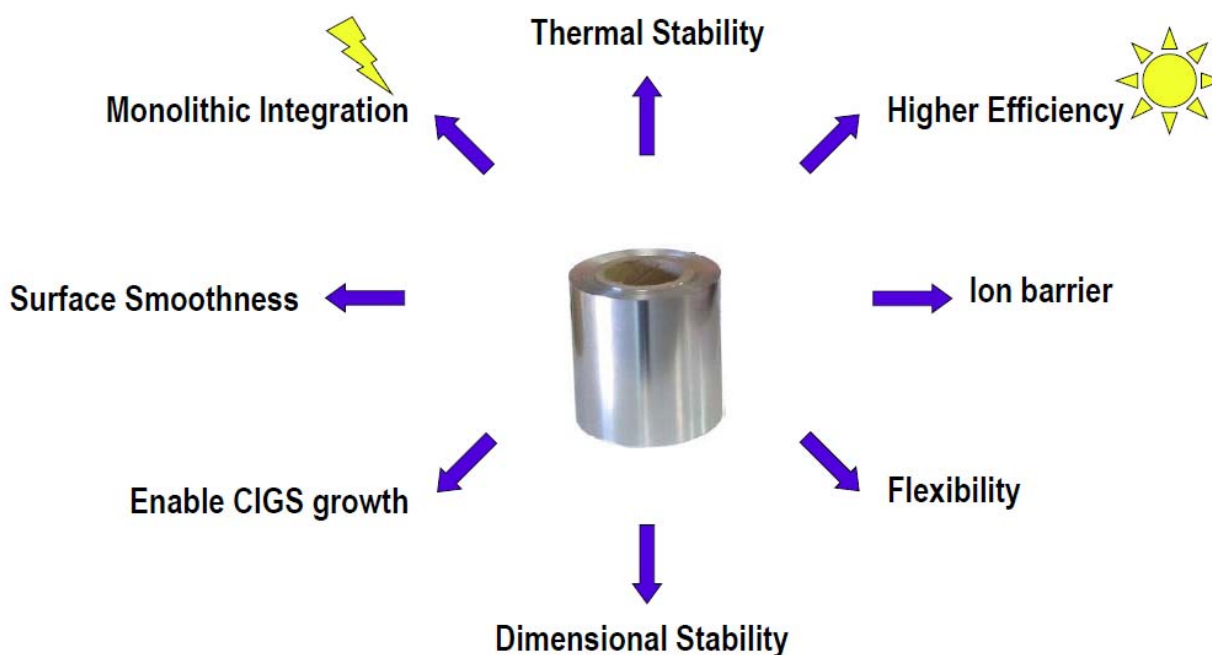
2. 薄膜式 CIGS 太陽能電池之材料及製程技術發展

因應 CIGS 薄膜式太陽電池朝向高效率、高產能與低生產投資成本下，捲對捲製程方式將成為未來重要生產方向，其對於未來 CIGS 薄膜式太陽電池在材料與製程技術之選擇上有必要性發展需求，這裡彙整研討會重點，逐一說明如下：

(1) 阻障層

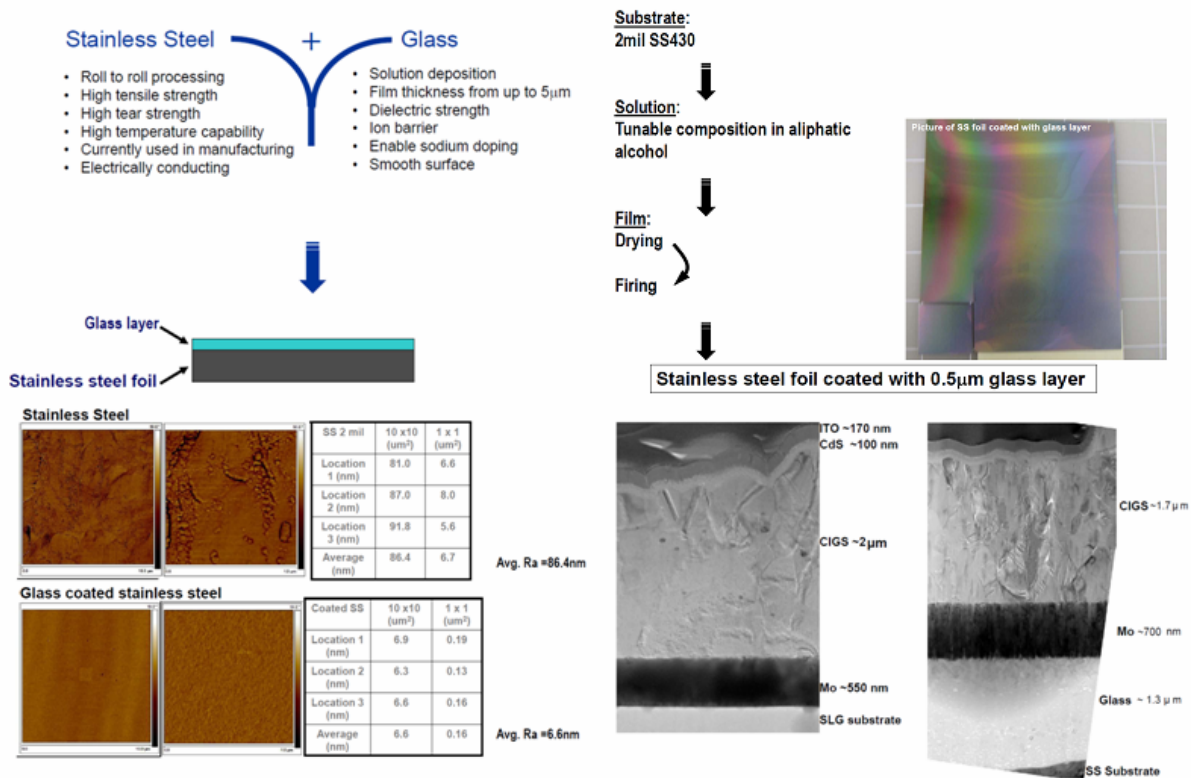
捲對捲製程方式會以可撓式基材為主，其基本特性要求有真空中的適合度(Vacuum compatibility)、熱穩定度(Thermal Stability)、適當的熱膨脹性質(Suitable thermal expansion；CTE of CIS $11.2\sim 11.4\times 10^{-6} K^{-1}$ direction at $20^{\circ}C$)、化學安定性(Chemical inertness)、足夠的濕度隔絕性質(Sufficient humidity barrier)、表面平滑度(Surface smoothness)、重量(Weight)、雜質(Impurity)，常用的可撓式基材有 Ti ($8.6\times 10^{-6} K^{-1}$ 、 $D=4.5 g/cm^2$ 、 $W=118 g/m^2$)、NiCr-steel ($12\sim 17\times 10^{-6} K^{-1}$ 、 $D=7.9 g/cm^2$ 、 $W=205 g/m^2$)、Kovar、Mo ($4.8\times 10^{-6} K^{-1}$ 、 $D=10.2 g/cm^2$ 、 $W=259 g/m^2$)、Polyimide foil ($12\times 10^{-6} K^{-1}$ 、 $D=1.47 g/cm^2$ 、 $W=41 g/m^2$)。因 CIGS 薄膜式太陽電池之吸收層最佳成長溫度約為 $500\sim 550^{\circ}C$ ，在成本與製程需求考量下，圖二十七所示可撓式太陽能電池的製作上基材多使用 430 不銹鋼金屬薄板之基本特性及需求，製作過程中多需要在基材上加溫，此時，基材內材料獲得能量後，會擴散至薄膜內造成影響，故需要一擴散防止層避

免擴散的發生。尤其使用於輕量化之可撓式太陽能電池上，擴散阻障層 (diffusion barrier) 必須依製程選擇，其需具有極佳的化學穩定性不易與其他材料發生反應，此外其薄膜結構緻密，擴散之原子不易通過，阻止生成之載子飄移至金屬基材避免造成載子流失等特性，常見阻障層材質有氧化矽、氧化鋁等氧化物或是鉻等金屬材料。



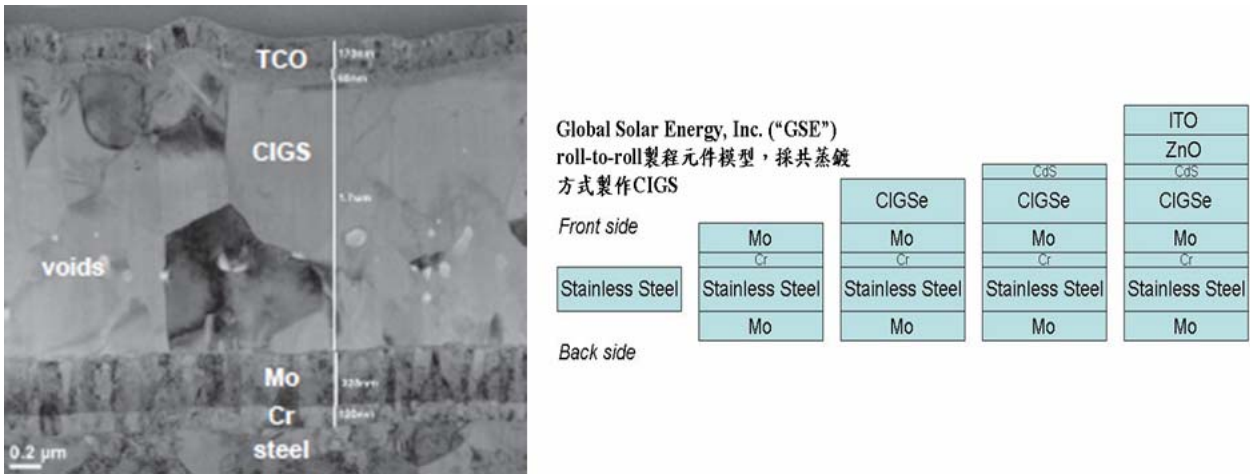
圖二十七 可撓式基材基本特性及要求

氧化物阻障層會以氧化矽為主，主要原因材料成本較為便宜，且其熱脹係數與 430 不銹鋼金屬薄板、吸收層相近，同時，氧化矽結晶結構上容易以非晶狀態呈現，阻障不銹鋼中的金屬擴散之性質是非常優異，在製作氧化矽阻障層方式可分為真空濺鍍、非真空熱壓膠合方式，從一些文獻資料顯示氧化矽厚度須達 1 μ m 比較有阻障效應，且可減少不銹鋼表面粗度所造成製程失效之離散度，但因採真空濺鍍製程時間較長，較不合製程成本，目前製作方式會採捲對捲非真空熱壓膠合方式(如圖二十八所示)，現階段具有此製造能力為美國杜邦及日本新日鐵這兩家公司，可以透過不同捲速控制，快速生產具有不同厚度氧化矽阻障層之不銹鋼薄板，且粗度可以從原本不銹鋼表面粗度 86.4nm 降到 6.6nm，所製作出 CIGS 太陽能電池元件與玻璃上差異不大。



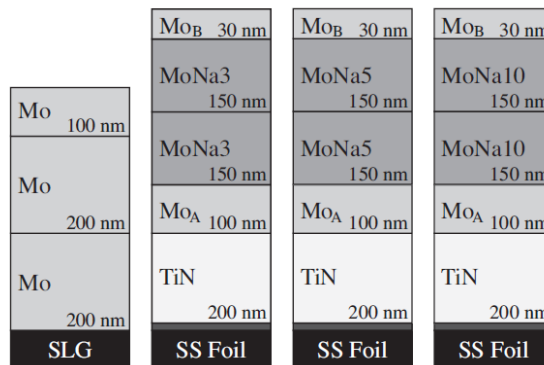
圖二十八 氧化矽阻障層製作方式(資料來源：Systems Approach to High Performance CIGS Material Set Including Flex Ultra-Moisture Barrier and Hi-Temp MLI Substrate PVMR Workshop)

從圖二十九 Global Solar Energy, Inc. (“GSE”) 捲對捲製程模型發現有些許與玻璃基材薄膜堆疊方式不同，首先 Mo 背電極部分，其採取前端(Front side)與後端(Back side)鍍製 Mo 背電極，其因有二：1.可與前端薄膜應力平衡，2.可以防止製程中 Se 與不銹鋼反應，造成基材快速老化。此外，Global Solar 所選阻障層非上述氧化物，而是金屬 Cr。由此可以得知 Global Solar 製程考量目的，若選擇氧化物，其性質與玻璃基材幾乎無異，製程上前端需以鍍製雙層 Mo 方式增加附著性，增加工程控制困難度。因此，Cr 當作阻障層具有幾個優勢，以濺鍍系統來說，濺鍍金屬的製程時間比氧化物來得快也較易控制，金屬在不銹鋼基材的附著性也比氧化物來得高，同時可與 Mo 背電極有良好接觸、薄膜所形成應力控制較易，可以迅速達到量化效果，同時，因採用金屬阻障層，會以單片電池進行串並聯進行模組化。



圖二十九 Global Solar 捲對捲製程元件結構模型

除了上述所說阻障層材料外，近期也掀起另一種氮化物材料的新應用，氮化物原本用於半導體銅製程中阻障層材料，其本身也具有相當良好的阻障能力，於本次研討會中瑞士 EMPA 研究機構就使用 TiN 做為阻障材料選擇(如圖三十所示)，在阻障層厚度約為 200nm，元件效率可以達到 14.4%，選用氮化物材料作為阻障層有幾個優勢，第一可利用真空濺鍍製程快速製備，目前 CIGS 太陽能電池元件之所選用製程多為真空方式，為達到製程一致化，降低不同製程間轉換鍍率，選用氮化物材料作為阻障層，在製程上可提高製程運輸效能，且氮化物材料之濺鍍率比氧化物材料高，生產率比較高；第二是氮化物材料特性介於金屬與氧化物之間，大多數氮化物材料具有半導體特性，且本身具有相當良好的阻障能力，可以減少阻障層厚度，也兼具金屬材料導電特性，可避免選用較厚氧化物材料，造成可撻使用上的物理受限，以及金屬材料之阻障能力不足之處，現今氮化物材料製程技術非常成熟，未來可以作為可撻式 CIGS 太陽能電池阻障層用之重要材料選擇與製程考量。



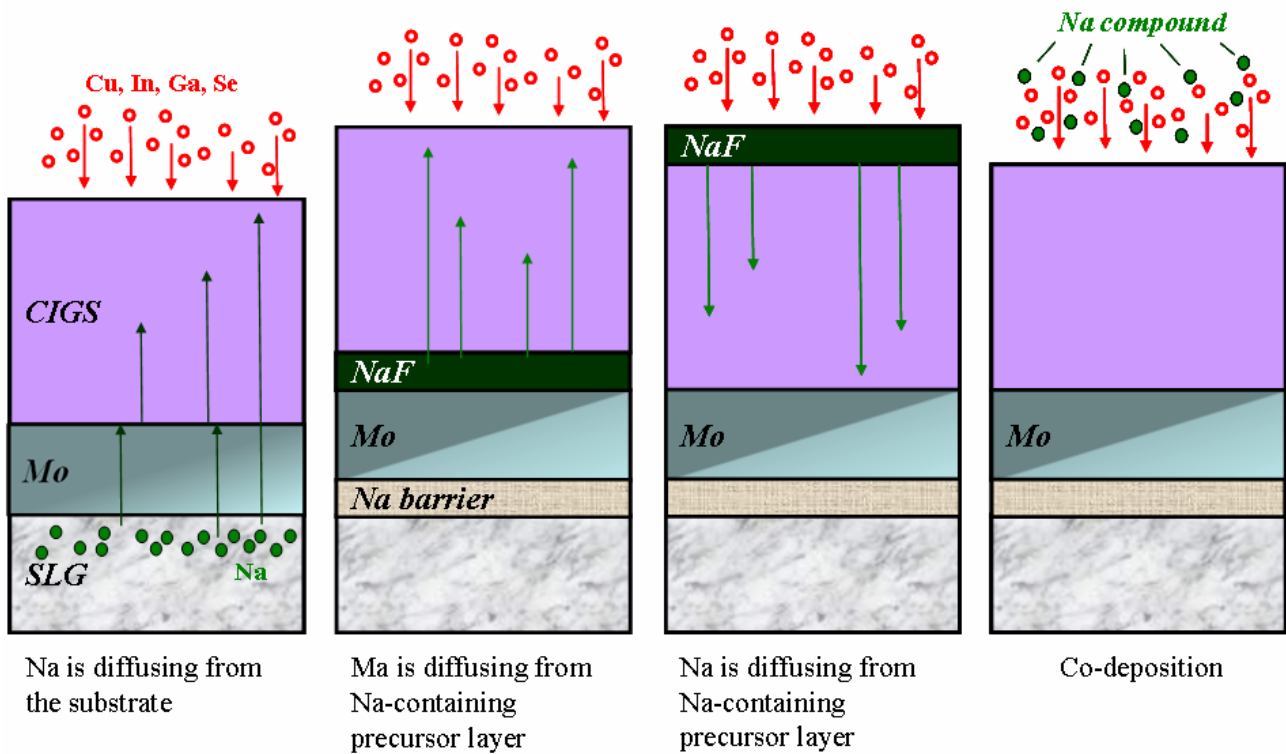
圖三十 瑞士 EMPA 研究機構可撻式 CIGS 太陽能電池元件結構

(2) 背電極與鈉來源

CIGS 薄膜太陽電池之背電極(back contact)材料對 CIGS 太陽能電池有很大的影響，包括 Mo、Pt、Au、Al、Ni、Nb、V、Ag 和 Cu 在內的金屬都被嘗試用來作為背電極材料。許多研究指出在 CIGS 太陽能電池中，Pt、Ni、Au 與 Mo 都是不錯的低電阻金屬背電極材料，然而在製作 CIGS 薄膜的過程，Pt 與 Au 會與 CIGS 薄膜產生不同程度的相互擴散。在高溫下，Mo 有著比 Ni 更好的熱穩定性，不會與 CIGS 薄膜內的 Cu、In 產生相互擴散。綜合比較，一般對背電極有以下要求：(1)能阻止來自基板不必要的雜質原子進入吸收層、(2)與 CIGS 之間為歐姆接觸(Ohmic contact)、(3)對於少數載子(minority carrier)要有較低的復合率、(4)高的光學反射能力和極小的光學穿透率。另外也需注意薄膜應力、熱膨脹係數(coefficient of thermal expansion)、表面平整度(surface roughness)及黏著性(adhesion)，這些因素對於元件製程及效率都有不可忽略的影響。特別的是，CIGS 薄膜在 Mo 薄膜成長的過程中，會有較大的晶粒，並且藉由生成的 MoSe_2 薄膜層形成歐姆接觸。

捲對捲製程方式在選用可撓式基材為主下，對於鈉來源必須額外提供，圖三十一為目前常見鈉來源四種方式，鈉對於獲得目前高效率元件扮演一個很重要角色，高效率元件均成長在蘇打玻璃上(soda-lime glass)，藉由比較高溫成長(500~600 °C)，鈉的擴散會從鉬背電極進入 CIGS 吸收層中，這個擴散現象會使元件效率與鉬背電極特性具息息相關，至於量產 CIGS 主要製備鈉的需求為：精準的、可製造化及可控制具一定濃度範圍的鈉，一個具可靠度之鈉源的添加可提高 CIGS 元件效能的再現性。因此，製備於不銹鋼或高分子等無鈉來源基材都需要在製程中有鈉的供給，所以有一種以 NaF 作為添加鈉的方式。然而，CIGS 元件成長在有 NaF 基材上會有附著性問題，同時，特別當製程溫度低或高含量的 NaF 下，會造成 NaF 殘留現象，且因附著性問題會使得 NaF 提供含量低於蘇打玻璃。

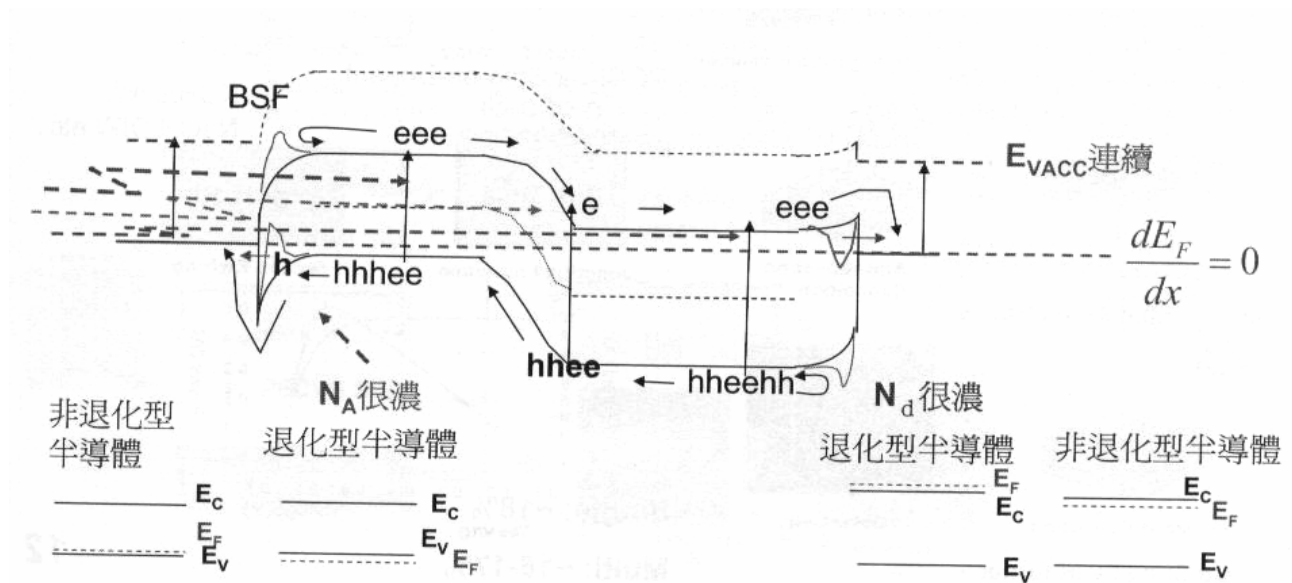
Methods for Na incorporation into CIGS



圖三十一 鈉來源方式

這裡就會衍生第五種加鈉方式，此方式就是將原本製程使用材料中添加鈉，如在背電極、吸收層、前驅層等材料中添加，目前以背電極所選用 Mo 靶材中添加鈉在研究上與具備大面積穩定生產上最為矚目，這裡藉由文獻報導說明為何鈉從基板擴散效率最高，第一是鈉元素添加主要是提高吸收層中載子濃度，改善吸收層電性，從背電極往光窗層方向來看，其載子濃度會依序遞減，也就是靠近背電極附近的載子濃度較高，使得費米能階慢慢往價帶靠近，使得整個吸收層能帶有向上偏移現象，形成背電場特性(BSF)，如圖三十二所示，可以有效降低載子復合機率，並使得在吸收層內部產生光電效應的電子往光窗層方向進行擴散，進而讓元件短路電流提高；第二是硒、鈉彼此交互作用及含量對於吸收層特性、 MoSe_2 生成有相當影響性，從圖三十三可知鈉本身陰電性對於氧、硒、硫元素等有很好的親合性，且在鈉硒相圖中，鈉與不同比例之硒化合，因此，鈉擴散、硒含量、吸收層特性及 MoSe_2 生成機制可以用圖三十四、圖三十五來說明，一般不管蒸鍍或硒化製程中，多會給與較為過量的硒，在圖三十四中以不同硒分壓條件下分析，可以發現低硒分壓下所生成 MoSe_2 較少，而在高硒分壓下則會有另一種 Na_2Se 生成，可知鈉擴散與硒含量息息相關，鈉要擴散需要藉由硒當作引媒

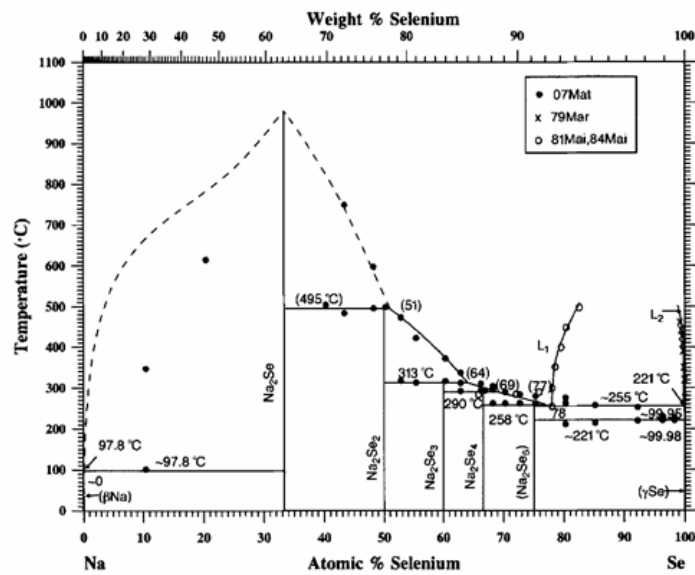
作為驅動力，會沿著背電極鉬薄膜晶界擴散至表面，加上鈉可以抓更多硒之結合下，鉬薄膜表層進行較容易形成 MoSe_2 ，而 MoSe_2 會與 Mo 背電極及吸收層間形成六方最密堆積(H.C.P) 結構之半導體特性(能隙 1.4eV)，可消除金屬與半導體間之蕭特基效應，也可形成背電場而有助於提升元件短路電流，同時，其結構 C 軸方向會平行 Mo 背電極，提高電洞傳導速率，降低背電極與吸收層晶格結構匹配問題，增加界面附著性；在圖三十五同樣鈉擴散效應也會發生於吸收層，鈉本身也可以部份帶氧條件下，經由吸收層晶界進行擴散，與硒做結合後，附著於吸收層表面上，這過程會持續不間斷進行，其結果有助於獲得較大晶粒之吸收層，改善吸收層膜質，由於上述結果，使得採用鈉後擴散方式備受矚目之因。



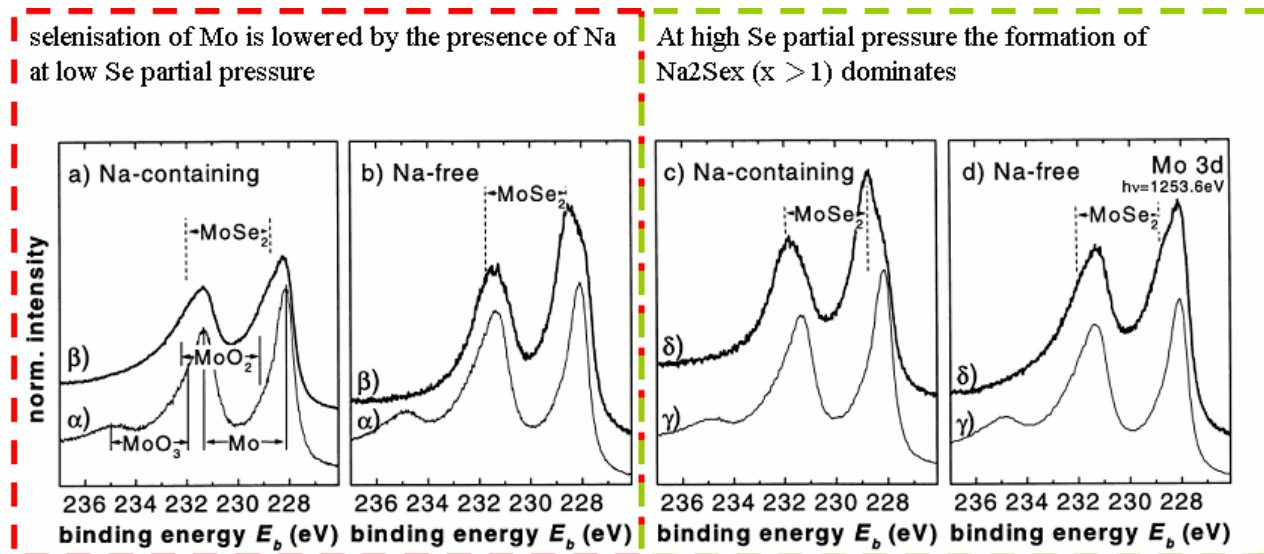
圖三十二 半導體能帶圖

Na trends to make bond with Se preferentially

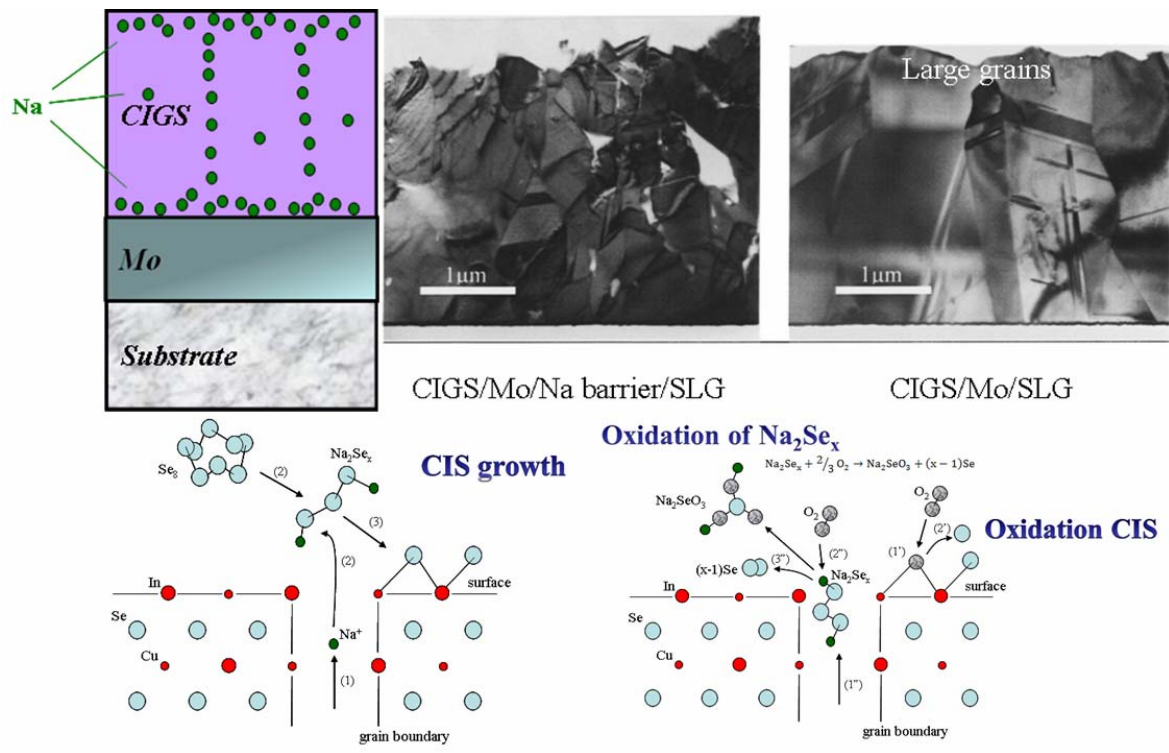
Compound	Electronegativity
Na	0.93
Cu	1.90
In	1.78
Ga	1.81
Se	2.55
O	3.44



圖三十三 鈉對不同元素陰電性與鈉硒相圖



圖三十四 在不同硒分壓、有無鈉條件下之 MoSe_2 生成狀況



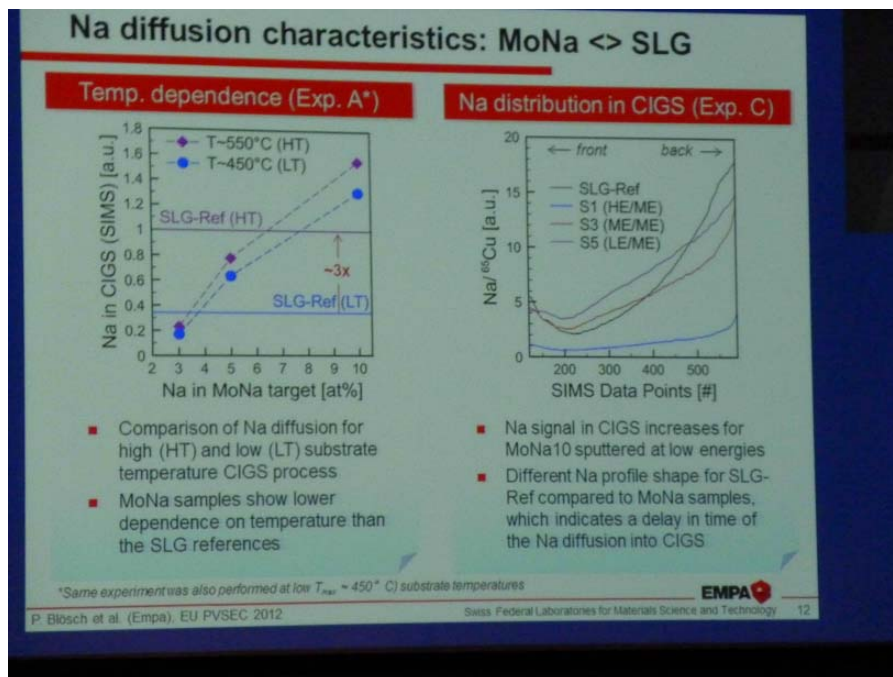
圖三十五 吸收層之鈉擴散機制與效應

因此，可以藉由靶材製作方式，將鈉添加於 Mo 靶材中，不僅可以減少額外製程設備投入，另可作為鈉添加來源，成為背電極及鈉來源，使得 MoNa 靶材在未來捲對捲製程方式中，為必須發展關鍵材料，目前所提到利用鈉添加於鉬靶材中，當作為鈉添加來源，由奧地利 Plansee 公司為主要發展者，且該公司也是唯一能生產此種靶材公司，如圖三十六該公司展示 Mo 旋轉靶，該公司所選用鈉的添加來源為 Na₂MoO₄ (熔點~687 °C)，其靶材製程採用粉末冶金，製作過程為：混料、膠模封罐、水壓 CIP(俗稱鉬磚，達到理論密度 60%)、Hot-rolling(達到理論密度 99%以上)、polish、加工，商品化的 MoNa 靶材中鈉含量有 3at%、5at%、10at% 三種成分，其中又以 10at%之未來需求更為重要，主要原因是 Mo 本身為體心立方結構(B.C.C)，屬於比較脆性材料，靶材添加了 Na₂MoO₄ 粉末做成 MoNa 薄膜後，會比較呈現脆性，同時，MoNa 薄膜厚度決定鈉含量，此厚度需求要接近原本玻璃基材所能提供鈉含量，Plansee 公司與瑞士 EMPA 研究機構於研討會中發表，他們發現當 10at%MoNa 薄膜在 200nm 左右厚度，可以提供與蘇打玻璃一樣的鈉含量，如圖三十七所示，其效率可以達到 15%左右，在比較脆性之 MoNa 薄膜減薄後，可以避免使用上的撓曲而造成脫膜現象，更適合應用於可撓式

太陽能電池元件中。



圖三十六 奧地利 Plansee 公司所展示靶材



圖三十七 瑞士 EMPA 於研討會中發表 MoNa 薄膜簡報

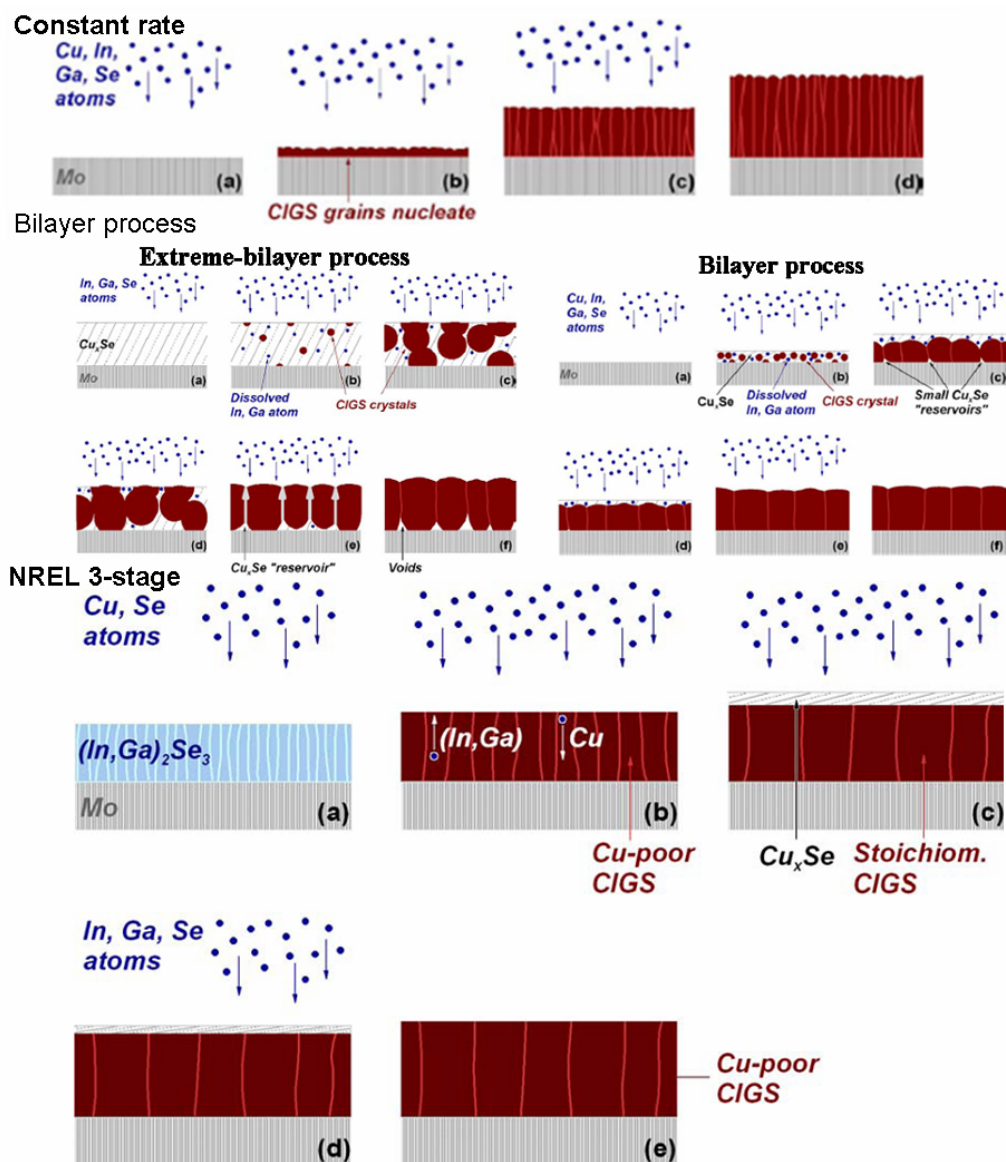
(3) 吸收層

CIGS 吸收層材料的光學吸收係數為直接能帶半導體材料中最佳的，由於高吸收係數，及材料本身 n 和 p 型的高利用性，使其成為熱門的薄膜太陽能電池材料選項，蒸鍍法是高效率 CIGS 太陽能電池中的主要吸收層之鍍膜方式，而其成膜的方法除了著名的波音雙層製程外，美國國家再生能源實驗室(NREL)所開發的三階段程序(three stage process)是目前可製作高品質吸收層及達到量產之成膜方法，在加入鎘會改變材料的能帶寬，可利用鎘的含量，來調整太陽電池中主要吸收層的能帶寬變化，故研究材料能帶寬之調整對 CIGS 太陽能電池而言有其很大的影響。

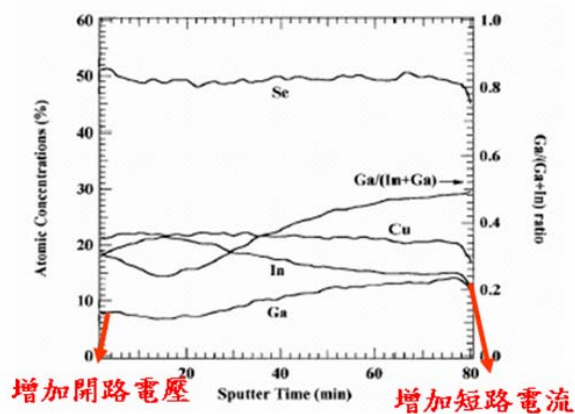
簡易說明三種方式蒸鍍製備吸收層薄膜與其成長機制，如圖三十八所示，Constant rate 整個製程成分控制在 Cu-poor 條件下成長，其成長速率較 Cu-rich 條件下慢許多，加上多元素同時化合成 CIGS，在同樣能量提供下，其結構較為纖細，多為針狀之柱狀晶結構；Bilayer process 早期以先形成銅硒化合物為第一層，第二層再以銻鎘硒蒸鍍直接化合成 CIGS，因銻鎘硒物理特性，在銅硒化合物中擴散速度非常快，成長 CIGS 相對也快，同時這擴散成長過程中，缺銅之銅硒化合物在 523°C 會有初熔現象出現，再加上 CIGS 快速成長，抑制了銻鎘硒擴散，造成許多孔隙，為解決此問題，Boeing 公司第一階段採取整個成分在 Cu-rich 條件下，銅銻鎘硒同時進行 CIGS 製作，Cu/In 比值約為 1.02 左右，製程溫度為 400°C，此階段因在 Cu-rich 條件成長，相對於 Cu-poor 之成長較快，且晶粒較為粗化，所產生孔隙也較小，其第二階段採整個成分在 Cu-poor 條件下，Cu/In 比值約為 0.66 左右，製程溫度為 500°C，此條件下成長 CIGS 晶粒較為細緻，有助於整體 CIGS 表面平坦化，同時，因為銻鎘比較高，可以有效擴散第一層結構內部消除孔隙。

NREL 3-stage 可進一步修正上述所有產生問題以及獲得較完整結構，第一階段採銻鎘硒化合物製作，製程溫度約為 260°C~340°C，第二階段銅硒在 550°C 直接與銻鎘硒化合物進行化合成 CIGS，因材料物理特性關係，銅硒擴散速度較於銻鎘硒來得慢，可以避免孔隙產生，同時，在銅硒不斷補充下，會由 In-rich 之 CIGS 漸變成 Cu-rich 之 CIGS，此作法在結構有幾個助益：一可避免孔隙產出、二來由 In-rich 轉變 Cu-rich 有助於整體晶粒成長粗化、三來靠近 Mo 背電極所形成之 CIGS 是符合化學計量比之高品質結構，可減少材料本質內部缺陷產出，降低內部電子電洞復合，第三階段銻鎘硒在 550°C 直接與 Cu-rich 之 CIGS 及表面銅硒進行反

應，此做法可以消除表面銅硒二次相，也能達到表面平整化之效果，此製程另一特性為可以利用鎘濃度分布調整能帶(V 型曲線)，提高元件開路電壓與短路電流，如圖三十九所示，在靠近背電極部分的鎘比例接近 0.4，而在緩衝層附近會接近 0.3 左右，如前所述，鎘可以調整個吸收層的能帶變化，同時在其本身具高光吸收係數下，可以增加不同波長光之光電轉換效率提高，另外，因為接近背電極部分的鎘比較高，同樣也可以形成背電場效應，因此，這裡可以針對背電場效應做一些彙整，在 CIGS 太陽能電池元件中構成背電場效應有三個成因：鎘梯度、MoSe₂ 生成以及鈉擴散，這三個扮演腳色與功能也些微不相同，背電場效應僅是這三個成因之共同效應而已。



圖三十八 三種方式蒸鍍製備吸收層薄膜與其成長機制

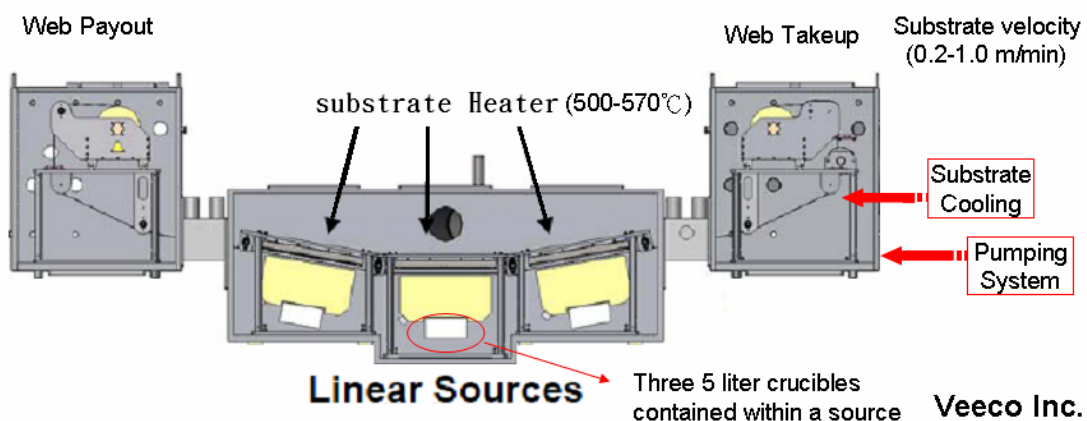


Layer	Property	Value	Units	Measurement Technique
Mo	Sheet Resistance	< 0.24	Ω/sq	Four-point probe
CIGS	Thickness	2.2	μm	Mechanical profilometer
CIGS	Ga ratio	0.28 / 0.20 / 0.40 notch	unitless	Auger profiling
CIGS	Lifetime	~200	ns	Time-resolved photoluminescence
CIGS	Carrier density	2×10^{16}	cm ⁻³	Capacitance-voltage
CdS	Thickness	50	nm	Mechanical profilometer
ZnO bi-layer	Sheet Resistance	69	Ω/sq	Four-point probe
ZnO bi-layer	AM1.5 Absorption	1	mA/cm ²	Transmission spectrophotometry
ZnO: Al	Carrier density	5.6×10^{20}	cm ⁻³	Hall Effect
ZnO: Al	Mobility	13	cm ² /V-sec	Hall Effect
ZnO: Al	Thickness	120	nm	Mechanical profilometer
Grid finger	Sheet resistance	0.009	Ω/sq	Resistance test structure
Grid finger	Contact resistance	4.5×10^{-7}	Ω/sq-m ²	Resistance test structure
Grid finger	Minimum width	45	μm	Mechanical profilometer

Proc. SPIE 7409 (2009) 74090M

圖三十九 三階段製程之吸收層成分變化

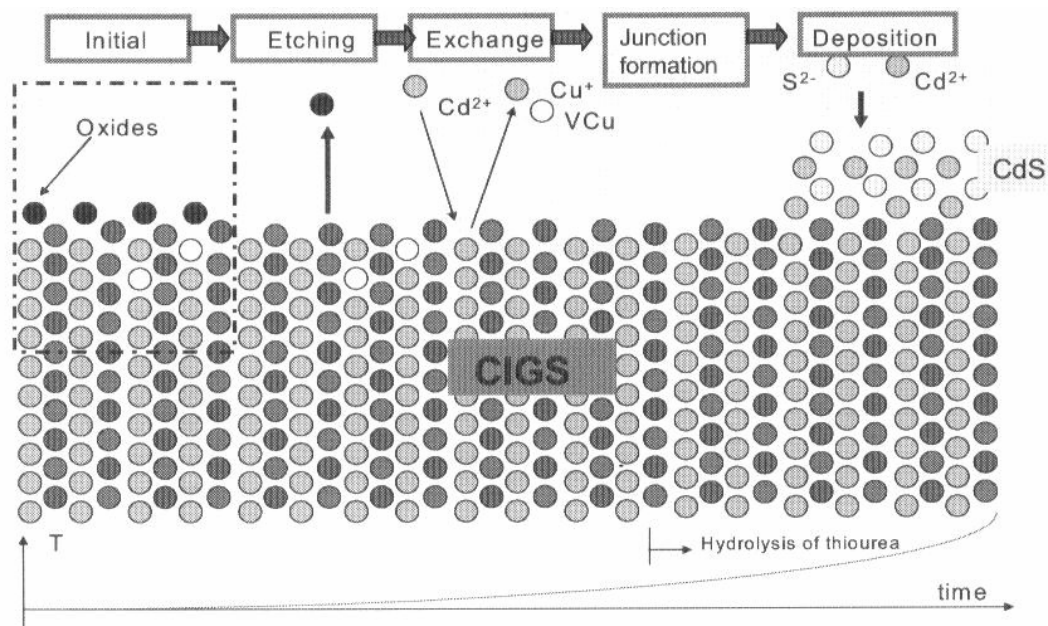
因為三階段製程係屬於利用材料間之熱擴散相變化而成，三階段製程是很適合用於未來採用捲對捲生產方式，如圖四十所示，可以參照三階段分為三區鍍區來完成製作，同時在達到大面積化部份，則需要藉由線性蒸鍍源完成薄膜，其中線性蒸鍍源由點蒸鍍源衍生而出，目前國內點蒸鍍源均為透過國外進口，這些蒸鍍源原本適用於超高真空分子束磊晶方式 (MBE)，主要由逸氣率低材料組裝，如利用鉬燈絲纏繞方式進行加熱器製作，然而，製作吸收層時，其真空度要求比超高真空分子束磊晶條件還要低兩數量級下，這些組件比較容易造成損壞，需要重新考量整個蒸鍍組件所選用材質，推動國內在製程技術自主化的同時，也需透過蒸鍍源等關鍵組件往本土化方向進行，對於未來發展量產蒸鍍製程與設備時，可以不受限於國外，有助於國內產業能在較低投資風險下發展。



圖四十 捲對捲蒸鍍生產方式

(4) 緩衝層

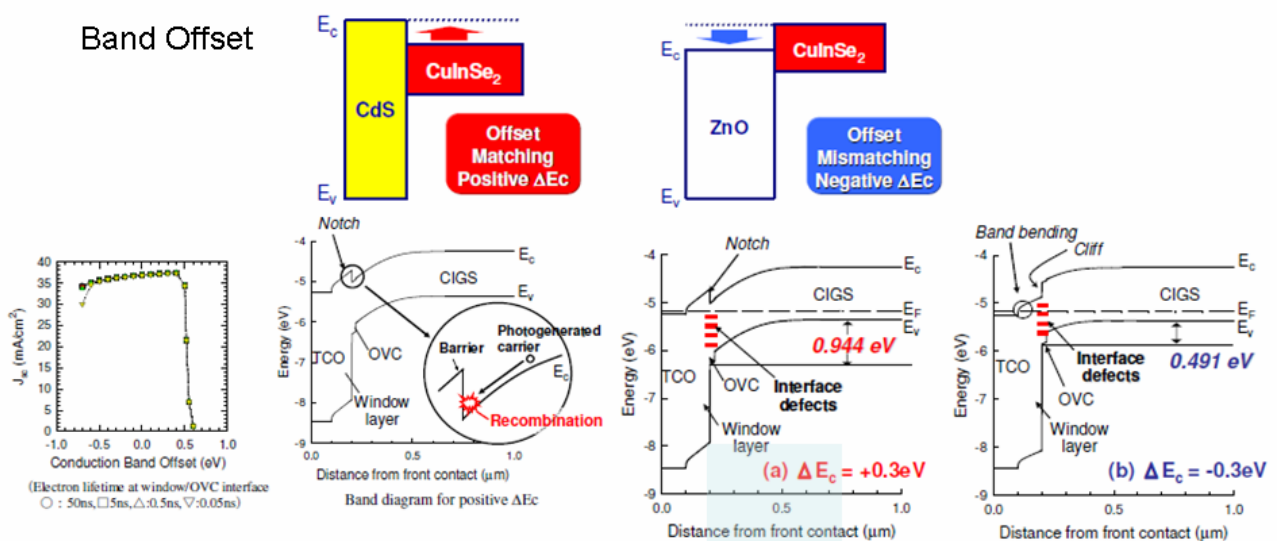
目前常用緩衝層為 CdS 材料，係屬於 N-type 的直接能隙半導體材料，主要功用在於與 CIGS 吸收層形成 p-n 接合，可避免直接在 CIGS 吸收層上沉積光窗層，可能會由於製程關係導致吸收層毀損，並且可降低 ZnO 與 CIGS 吸收層間能隙的不連續性(band discontinuity)。CdS 的製備一般使用化學水浴沉積法(chemical bath deposition, CBD)，如圖四十一所示，原因在於製備 CdS 的化學溶液呈鹼性，可侵蝕 CIGS 吸收層而解決吸收層表面不平整的問題，且以化學溶液浸泡的方式更可達到徹底的覆蓋吸收層的目的。由於 Cd 金屬對於環境有其傷害，且在所有元件各膜層製程中，化學水浴沉積法係唯一屬於非真空法，要達到 CIGS 太陽電池生產一慣性，發展真空方式製作緩衝層也是趨勢之一，另外 CdS 材料能隙約為 2.4eV，對於高透光性之緩衝層材料也是受矚議題之一。



圖四十一 CdS 緩衝層化學水浴沉積法之成長機制

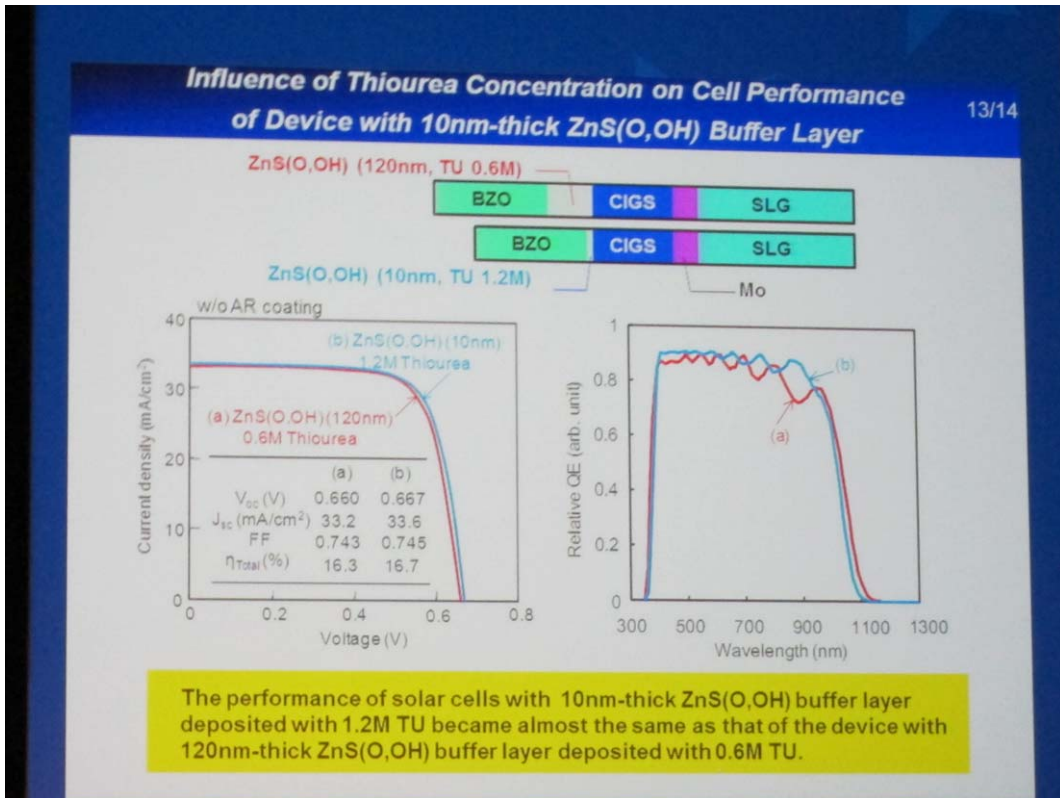
此次研討會中以 Zn(O,S,OH)緩衝層研究最為重點，除了 Zn(O,S,OH)緩衝層屬於較低污染性材料外，此材料可以藉由陰離子比例的不同而去改變能隙及能帶接合，現今高效率 CIGS 太陽能電池之吸收層能隙約為 1.1~1.2eV，係屬於較低能隙的太陽能電池，PN 界面能帶工程考量希望緩衝層導帶要比吸收層高約 0~0.4eV(如圖四十二所示)，其中 CdS 約高出 0.2eV 左

右，在兩者間導帶會有槽口現象(Notch)，這樣 PN 導帶有兩個優勢，第一可以低能隙緩衝層在照光下所產生光電流不會往吸收層移動，可降低復合機率，第二就是 PN 銜接時所建立的內電場會比較大，同樣也有助抑制載子復合，但是若是緩衝層導帶要比吸收層高出 0.4eV 以上，反而使吸收層產生光電子無法躍遷至緩衝層導帶中，則有產生會不好復合效應出現，目前利用此緩衝層材料做出世界最高效率太陽能電池為日本中田(Nakada)實驗室，採用化學浴沉積 120nm 的 ZnS(O,OH)之最高元件效率均可達 18.6%，這次大會演講中他們又進一步在製程有所突破，可以做出厚度約 10nm ZnS(O,OH)的緩衝層，其效率仍可達到 16.7%(如圖四十三所示)，另外德國 HZB 能源材料中心與德國 BOSCH 公司也是針對 Zn(O,S)發表(如圖四十四所示)，小面積效率可以達到 16.9%，30cm*30cm 模組可以達到 11.3%。

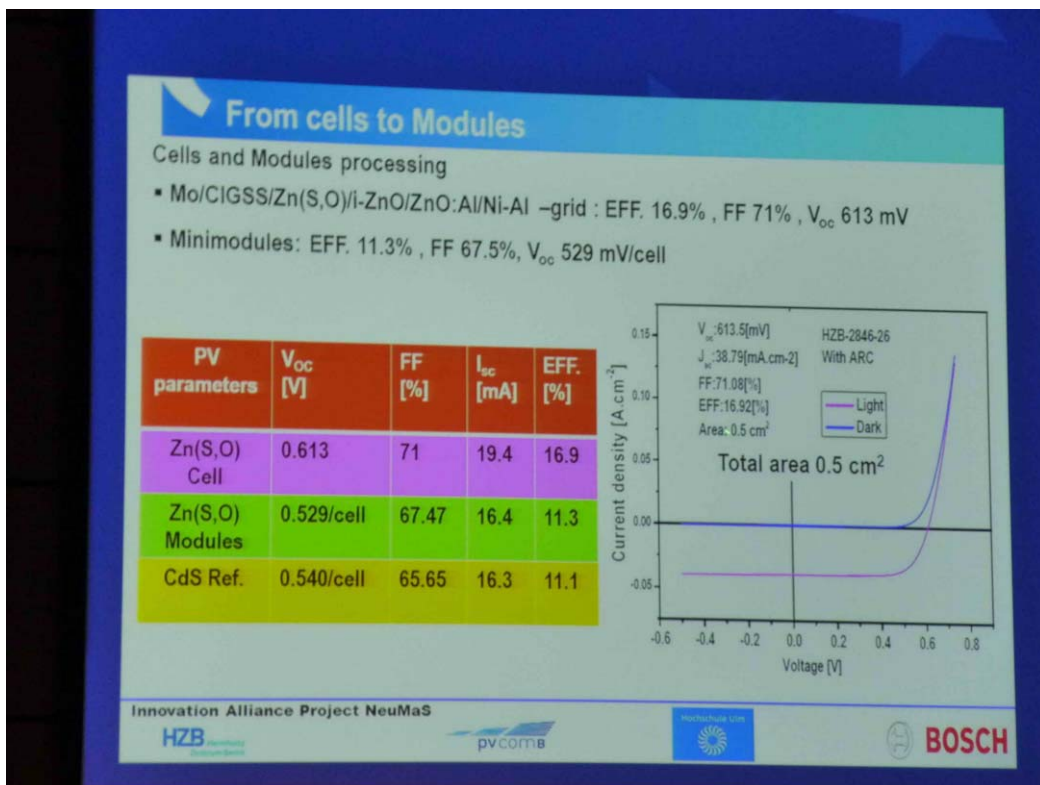


**Positive ΔE_c increases built-in voltage in CIGS
Recombination of injected carrier at window/OVC
interface is suppressed**

圖四十二 PN 能帶工程圖



圖四十三 日本中田(Nakada)實驗室研討會發表



圖四十四 德國 HZB 能源材料中心與德國 BOSCH 公司研討會發表

圖四十五為緩衝層製程方式優劣比較，一般傳統認知以化學水浴沉積法製程投入成本較低，但實際上用於量產時，考量高低濃度廢液回收、藥劑濃度控制、反應液體穩定注入及緩衝劑回收，其投產成本約為真空設備成本 6~7 成間，且廢液處理佔很大生產成本，因此，去發展真空製程製作緩衝層更為重要，現今真空法中包含蒸鍍、原子級磊晶及濺鍍，其中，仍以濺鍍方式成本較為便宜及大面積化可行性最高。

	CBD	Evap	ALD	Sputter
Advantage	<ol style="list-style-type: none"> 1. Clean 2. Avoid plasma damage 3. Comfortable coverage 	<ol style="list-style-type: none"> 1. In vacuum 2. Large area 	<ol style="list-style-type: none"> 1. In vaccum 2. High Quality 	<ol style="list-style-type: none"> 1. In vacuum 2. Large area
Disadvantage	<ol style="list-style-type: none"> 1. Soltion pollution 2. Unstable 	<ol style="list-style-type: none"> 1. High substrate temp 2. Source control 	<ol style="list-style-type: none"> 1. High cost 2. Small area 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Poor coverage 2. Damage

圖四十五 緩衝層製程方式優劣比較

濺鍍製備 Zn(O,S)緩衝層材料，主要利用通入氣體或是不同材料靶材製備出陰離子比例不同，就可以製作出不同能隙的 Zn(O,S)，如圖四十六所示，其能隙可以從 3.3eV(ZnO)到 3.8eV(ZnS)，當氧與硫比例接近 1:1 時，其能隙接近 2.5eV~2.6eV，此時氧硫比與日本中田(Nakada)實驗室所做同類緩衝層材料成份相類似。

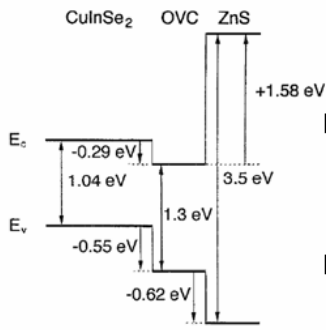


FIG. 10. Graphic representation of conduction-band and valence-band offsets for the OVC/ZnS heterointerface.

D. Schmid et al. / Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42 (1996) 281-294

$$E_{ZnOS}(x) = x E_{ZnS} + (1-x)E_{ZnO} - b(1-x)x$$

Table 3 Bowing Parameters of the Zn-chalcogenes in electron volts (* values taken from [29,55,56]; other values were taken from the compilation in [54]).

	ZnO	ZnS	ZnSe	ZnTe
Electronegativity of the anion	3.44	2.58	2.55	2.1
Atomic radius of the anion (Å)	0.75	1.02	1.16	1.36
Lattice constant (Å)				
zinc blende (a_0)	-	5.409	5.669	6.104
wurtzite (c_0)	5.207	6.256	6.54	-
(a_0)	3.25	3.819	4.013	-
Bowing b (eV)				
ZnO*		~3.0	~7.0	~2.7
ZnS			0.43-0.6	2.4-3.0
ZnSe				1.23-1.28

Progress in Solid State Chemistry 37 (2009) 153-172

- Volume deformation of the band structure due to the replacement of the lattice constants of the binary constituents by that of the alloy,
- Chemical-electronegativity contribution due to charge exchange in the alloy relative to its constituent binary subsystem
- Structural contribution due to the relaxation of the anion cation bond lengths in the alloy.

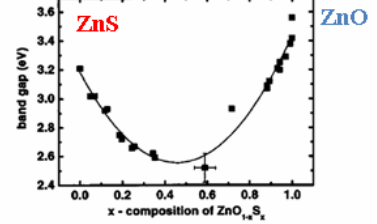


FIG. 6. Band gap energy of ZnO_{1-x}S_x films as a function of the composition x.

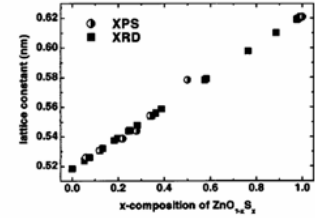


FIG. 4. The change in the c-axis lattice constant of ZnO_{1-x}S_x films as a function of the sulfur content calculated using XRD results and the correlation with the composition as determined by XPS.

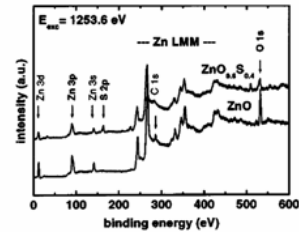


FIG. 3. A comparison of XPS spectra of ZnO and ZnO_{0.4}S_{0.4}. The composition of the ZnO_{1-x}S_x layers were calculated using the O 1s, S 2p, and Zn 3p signals.

圖四十六 不同能隙變化之 Zn(O,S)緩衝層

在研討會前，以濺鍍方式發表利用雙靶混鍍控制 Zn(O,S)緩衝層材料成分比例(如圖四十七所示)，當 S 值接近 0.18 時，會有 11.1%最高效率出現，當 S 值接近 0.34 時吸收層與緩衝層間導帶接合會出現槽口，但是利用雙靶混鍍很難有大面積化可行性，因此，今年研討會中，德國 ZSW 研究中心提出另一種量化想法，利用單靶 ZnS 通氧去製備 Zn(O,S)緩衝層，其效率可以達到 13%以上，目前真空法製備緩衝層效率無法比化學水浴沉積法高，主要原因是化學水浴沉積法可將吸收層表面氧化物去除，同時，Zn 與 S 會擴散至吸收層表層約 10~20nm 間，將表面吸收層 P 型特性置換成 N 型特性，而形成同質界面半導體，可以降低 PN 異質界面復合，但真空法就無法像化學水浴沉積法一樣效應，其異質界面半導體特性比較強，同時，在 CIGS/Zn(O,S)/TCO 界面間，Zn(O,S)/TCO 因屬性相近，比較傾向彼此在半導體能帶之電子親和性的構裝，而在 CIGS/Zn(O,S)相較就會弱些，使得開路電壓與短路電流比較低，但只要適當改變吸收層表面特性，有機會將其效率接近化學水浴沉積法，同時，鍍膜材料朝向單靶或是合成靶在未來發展真空法製備緩衝層將為必備關鍵性材料之一。

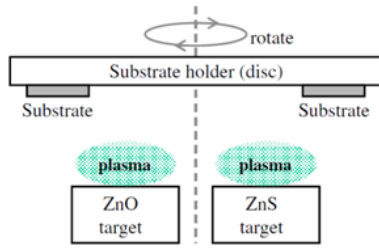


Fig. 1. Schematic diagram of the configuration of co-sputtering of ZnO and ZnS targets for $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ film deposition.

Deposition conditions	
Process parameter	Values
Working pressure	2×10^{-4} , 2×10^{-1} Pa
ZnO power	33~84 w
ZnS power	10~37 w
Target size	2 inch
Working distance	90mm
Deposition temperature	Room temperature

- Maximum efficiency of 11.1% was obtained at $x=0.18$, which is 90.5% that of the CdS/CIGS solar cell

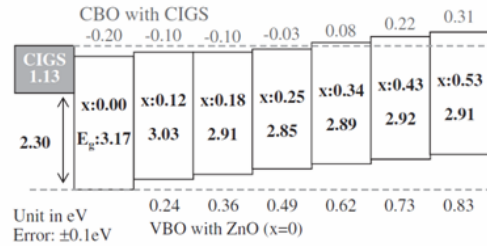


Fig. 5. Predicted band alignment of CIGS and $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ with various sulfur contents x .

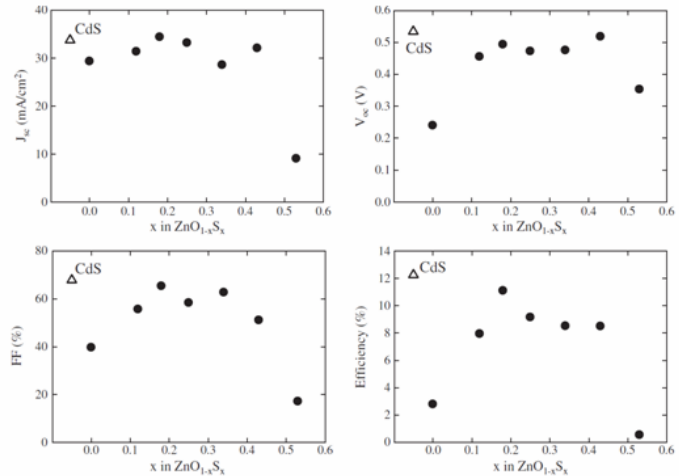


Fig. 4. Solar cell parameters of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ /CIGS solar cells as a function of sulfur content x . The parameters for the CBD-CdS buffer layer are also shown (triangles).

圖四十七 雙靶混鍍控制其 Zn(O,S)緩衝層材料成分比例變化圖

圖四十八 德國 ZSW 研究中心利用單靶 ZnS 通氧去製備 Zn(O,S)緩衝層海報圖

參、建議事項

依職赴德參加 2012 年 27 屆歐洲太陽能研討會與展示會所獲之心得有幾點可作為未來考量發展之目標：

- 1.矽基太陽能電池為達到超高效率與降低成本，將會以晶圓型矽太陽能電池做為主流發展，其中，晶片薄化所使用切割線、N型晶片及具有摻雜導電膠是未來技術與材料發展標的。
- 2.銅銦鎳硒(CIGS)薄膜太陽能電池因材料使用量低、可利用吸光範圍最廣、具有大面積化的可行性、較不受日照環境影響而均能為維持良好發電效能等材料性質，以及具有因應輕量化、可折化、可撓化、可攜式市場需求之電池製作特性，將有機會與矽基太陽能電池同步發展，甚至將矽基市場做部分取代。
- 3.利用捲對捲製程設備達到高品質、高產出、低生產成本將是未來銅銦鎳硒(CIGS)薄膜太陽能電池技術發展趨勢，且輕量化太陽能電池也將成為未來重要產品，其中，整線製程技術、線蒸鍍源關鍵組件開發、阻障層、含鈉背電極、多階段吸收層及緩衝層等關鍵材料之自主化是有必要性，可掌握關鍵技術、整合製程設備、關鍵材料與專利，並同時配合整合上下游產業材料與製程產業之同步發展，有機會將此產業從基礎深耕到商業化之全面性發展。

附件：無