

# 太陽能電池產業製程及污染防治簡介

財團法人台灣產業服務基金會 陳子秦工程師

## 一、前言

隨著人類文明發展，地球上各式能源：如石油、天然氣、煤…等將其加工利用後，帶給人類生活很大的享受，卻也因為大量使用結果，除了使這些能源即將消失殆盡，更讓環境面臨超乎預期的嚴重危害。因此國際間日益開始重視起溫室效應、臭氧層破壞、生物瀕臨絕種等環保議題；產業界為了因應產業環境及國際環保趨勢的變化，也開始積極尋找開發新的替代能源。隨著油價持續的攀升，利用太陽能來替代化石燃料的需求和興趣也急遽增加。人類發展太陽能電池的最終目標，就是希望能取代目前傳統的能源。我們都知道太陽的能量是取之不盡用之不竭的，從太陽表面所放射出來的能量，換算成電力約 $3.8 \times 10^{23}$  kW；若太陽光經過 $1.5 \times 10^7$ 公里的距離，穿過大氣層到達地球的表面也約有 $1.8 \times 10^{14}$  kW，其約為全球平均電力的十萬倍。若能夠有效運用此能源，則不僅能解決消耗性能源的問題，連環保問題也可一併獲得解決<sup>[1]</sup>。

## 二、太陽能的利用及對環境的影響

太陽能主要有光能與熱能2種能量形式。利用太陽能發電的技術主要有3種；第一種是利用特殊的半導體材料，製造出太陽能電池，太陽能電池經由光線照射後，把光能直接轉換成電能。第二種方法是把太陽能轉換成熱能，再利用熱能發電。第三種方法則是利用太陽能與化學能間的轉換，把水分解成氫和氧，利用氫來發電<sup>[2]</sup>。就對環境影響而言，太陽熱能於運轉過程中並無污染物排出；在開發裝設時，若開發範圍較大，則需考量環境影響評估法相關規範。

太陽光電能，主要是利用太陽能電池吸收太陽光能，再直接將之轉換成電能，以供需求端應用，其於應用時並無環境污染物排出；若是採集中設立太陽光能電廠的方式開發應用，則需考慮開發面積大小；在汰舊太陽能電池時，亦需考慮廢棄電池的處理與回收利用。此外，在太陽能電池的製造過程中可能需運用一些化學品，此時須符合適用之空污法及水污法規範<sup>[3]</sup>。

### 三、太陽能電池的發電原理<sup>[2]</sup>

太陽能電池是一種能量轉換的光電元件，它是經由太陽光照射後，把光的能量轉換成電能，此種光電元件稱為太陽能電池（solar cell）。太陽能電池的發電原理，可以用一個構造最簡單的單晶矽太陽能電池來說明。所謂的單晶矽，就是指矽原子與矽原子間按照順序規則的排列。矽的原子序為十四，其電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ，其中內層的10個電子( $1s^2 2s^2 2p^6$ )，被原子核緊密的束縛著；而外層的4個電子( $3s^2 3p^2$ )受到原子核的束縛較小，如果得到足夠的能量，則可使其脫離原子核的束縛而成為自由電子，矽原子外層的這四個電子又稱為價電子，而矽的晶體結構是屬於鑽石晶體結構，每個矽原子與鄰近的四個矽原子形成共價鍵，若在純矽中摻入三價的雜質原子，如硼原子，此三價的雜質原子取代矽原子的位置，因硼原子只有三個價電子可與鄰近的矽原子形成共價鍵，所以在硼原子的周圍會產生一個空缺，可供電子填補，此一可填補電子的空缺即稱為電洞。電洞在電學中可視為一可移動且帶正電的載子，因為電洞可以接受一個電子，所以摻入的三價雜質原子又稱為受體，而一個摻入三價雜質的半導體，即稱為p型半導體。

同理，若在純矽中摻入五價的雜質原子，如磷原子，此五價的雜質原子，取代矽原子的位置，因磷原子具有五個價電子，其中的四個價電子分別與鄰近的四個矽原子形成共價鍵，而多出一個自由電子，該電子為一帶負電的載子，因為五價的雜質原子可提供一個自由電子，故稱此五價的雜質原子為施體，而摻了施體的半導體稱為n型半導體。一般太陽能電池是以摻雜少量硼原子的p型半導體當做基板，然後再用高溫熱擴散的方法，把濃度略高於硼的磷摻入p型基板內，如此即可形成p-n接面；p-n接面是由帶正電的施體離子與帶負電的受體離子所組成。在該正、負離子所在的區域內，存在著一個內建電位，可驅趕在此區域中的可移動載子，故此區域稱之為空乏區。當太陽光照射到一p-n結構的半導體時，光子所提供的能量可能會把半導體中的電子激發出來，產生電子-電洞對，電子與電洞均會受到內建電位的影響，電洞往電場的方向移動，而電子則往相反的方向移動。若利用導線將此太陽能電池與一負載連接起來，形成一個迴路，就會有電流流過負載，此為太陽能電池發電原理。

### 四、台灣太陽能電池產業發展

台灣投入太陽能電池的發展啟始於1970年代的石油危機時期，一直到2001年網際網路泡沫化所引起世界性經濟低潮，以及這幾年由於矽晶圓原物料處於供應吃緊，而造成的供需失衡景況，一下子整個產業聚集大量的曝光，成為新一波發展的重點。

根據工研院經資中心分析<sup>[4]</sup>，目前全球太陽能發電容量仍低，不過在主要先進國家政策鼓勵並積極推動下，美國Clean Edge公司預測，全球太陽能發電產業規模(含模組、系統組件、設置施工)將由2003年的47億美元，大幅增長為2013年的308億美元。因此，未來10年內，世界太陽能發電產業將以平均年增率20%以上快速成長，成為眾所矚目具有高度發展潛力的替代能源產業。

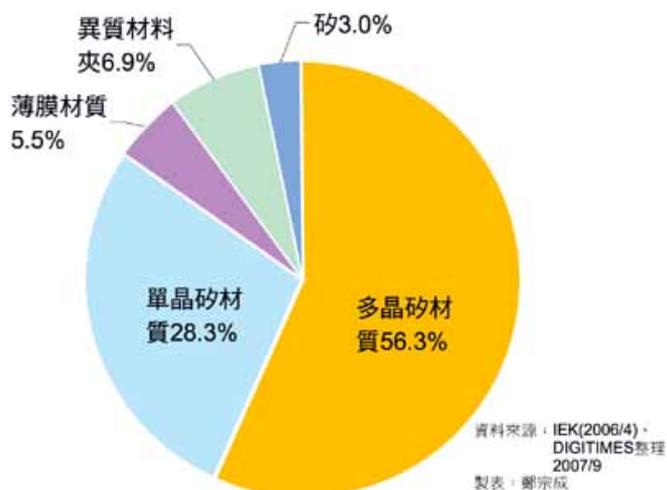
現階段工業等級太陽能電池的發展，已經朝向便宜和效率等兩大主題發展，許多研究團隊不斷推陳出新，期望新的材料可以成為新的光吸收器，並且對電荷載子的蓄集效率能做出更大的貢獻，因而一舉發展出能夠有效的與其他新興能源競爭的裝置。目前所知的太陽能電池的製程種類有下列的區分：

- (1)矽製程(silicon processing)
- (2)薄膜製程(thin-film processing)
- (3)高分子製程(polymer processing)
- (4)奈米粒製程(nanoparticle processing)
- (5)透光導體(transparent conductors)

由2005年太陽能電池的技術市佔率(如圖1)可知，矽製程的產量及成效，遠遠領先其他製程級材料。矽是我們耳熟能詳的半導體材料的主要來源，用在太陽能電池上，可區分成單晶矽、多晶矽及非晶矽。另一個相當被看好，而愈來愈受到重視的主要製程就是薄膜製程。薄膜太陽能電池，乃是在塑膠、玻璃或是金屬基板上形成可產生光電效應的薄膜，厚度僅需數 $\mu\text{m}$ (一般的矽晶圓所需的厚度約為 $200\mu\text{m}$ )；因此在同一受光面積之下，薄膜太陽能電池可較矽晶圓太陽能電池大幅減少原料的用量。目前商品化的太陽能電池元件型態的產品包括：

- (1)矽晶片(silicon bulk)：包含單晶矽、多晶矽。
- (2)非晶矽薄膜(thin film)。
- (3)II-VI族晶片(CIGS，也是多層薄膜組合而成)：其中3~5族包括砷化鎵、磷化銦、磷化鎵；2~6族包括碲化鎘、硒化銦銅等。

2005年太陽能電池的技術市佔率



資料來源：IEK(2006/4) DIGITIMES整理 2007/9

圖1 2005年太陽能電池的市佔率

開發新的替代能源，最令人矚目的不外乎是否能將能量有效地轉換成電力，若轉換效率能提升到足以供應全球一年的電力需求，相信未來不僅能解決能源問題，連環保問題亦可大幅改善。圖2為各種太陽能電池轉換效率，目前比較具有成長潛力的應屬多接面的串疊型太陽能電池；根據美國能源部研究人員的預測，3年後其效率將可達到40%以上。

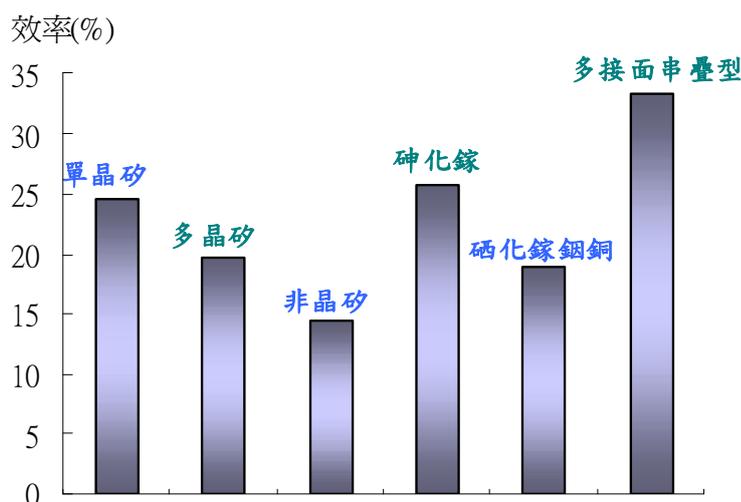


圖2 目前各種太陽能電池轉換效率<sup>[2]</sup>

## 五、台灣太陽能電池產業結構及污染源特性

以台灣目前太陽能電池產業發展現狀來看，主要以矽晶片與非晶矽薄膜製程的產品為主流。非晶矽薄膜製程和液晶面板製程有些相似性，而矽晶圓製程除了沒有半導體製程中的光罩與步進機掃描等前段尖端製程外，其實與半導體製程似乎相似。

台灣太陽能電池產業可以細分為上、中、下游，表1為目前台灣太陽能產業的供應鏈。上游產業以材料的處理為主，多半從國外大廠取得矽晶材料後，透過長晶爐，生成像鑄鐵一樣的晶(ingot)，透過精密切割機，切割成一片片的晶圓；中游則側重於太陽能電池元件(PV cell)；下游則放在應用的產品面，包括太陽能的模板(PV module)及組裝成太陽能系統，其中上、中、下游產業製程設備詳如表2所示<sup>[3]</sup>。

**表1 台灣太陽能產業供應鏈**

產品別	多晶矽材料	矽晶棒、矽晶圓	電池元件	太陽能模板、系統
台灣代表性公司	無	中美晶、合晶、麗晶、綠能	茂迪、益通、大豐、崇越、旺能、昱晶、昇陽、新日光	鼎元、立基、台達電、系統、飛瑞、中興電

資料來源：DIGITIMES，2007年 8月

**表2 矽晶圓上中下游產業製程設備一覽表**

	主要製程設備
上游	長晶爐、切斷機、切方機、切邊機、線鋸切片機、酸鹼清洗槽、晶圓檢測分級機
中游	晶圓檢測機、酸鹼清洗槽、擴散爐、電漿蝕刻機、電漿鍍膜設備、網印機、烘烤爐、紅外線高溫燒結爐、電池檢測與分級設備
下游	電池檢測與分級設備、自動焊接設備、模組疊壓機、電池模組測試機台

資料來源：DIGITIMES, 2007年 8月

## 5.1 上游產業

1. 上游產業製程介紹如圖5，說明如下：

- (1) 拉晶：主要的原料為二氧化矽，利用晶種在拉晶爐中成長出一單晶矽棒。
- (2) 修角：一般微電子產業所用的晶圓，是直接把單晶矽棒切片而成。但對於太陽能電池，通常必須把許多晶片串聯成一方形陣，為了陣列排列得更緊密，大部分都先將單晶矽棒修角成四方形。
- (3) 切割：用切片機將單晶矽棒切成厚度約0.5毫米的晶圓。
- (4) 浸蝕及拋光：浸蝕的目的是去除在切片過程中所造成的應力層。拋光的目的是要降

低微粒附著在晶圓上的可能性。

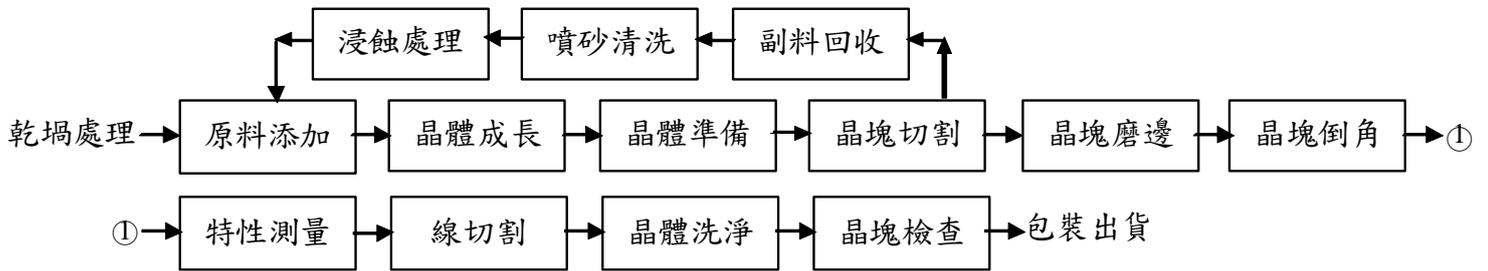


圖 5 上游產業製程

2. 上游產業製程污染源概述如下<sup>[5][6][8]</sup>：

- (1) 廢水污染源：廢水來源主要有切割、浸蝕及洗淨等3股廢水。其中，浸蝕廢水有氟化及硝酸鹽類。
- (2) 廢氣污染源：上游製程為晶圓製造程序，廢氣污染來源主要為蝕刻、清洗製程中所產生之酸鹼氣體；廢氣種類有HF、HNO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>。
3. 廢棄物污染源：主要包括包裝器材(紙箱、木箱、玻璃瓶、塑膠桶)、空氣處理廢料(空氣過濾、吸附廢濾料)、無塵室廢棄物(人員使用後廢棄口罩、手套、鞋套)、廢損晶片、廢水污泥。

## 5.2 中游產業

1. 中游產業製程如圖6所示，說明如下：

- (1) 清洗：用去離子水(DI water)把晶圓表面的雜質污染物去除。
- (2) 擴散：一般太陽能電池均採用p型的基板，利用高溫熱擴散處理，使p型的基板上形成一層薄薄的n型半導體。
- (3) 網印或蒸鍍：將製作完成的晶圓，用銀膠印刷或是用蒸鍍的方法，在晶圓的表面接出導電電極，如此即可完成一個簡單的太陽能電池。
- (4) 薄膜電池製程：矽薄膜層主要是藉化學氣相沉積(簡稱 PECVD)的製程，將非晶型矽(a-Si或a-Si:H)材料附著於玻璃等機板上而成，化學氣相沈積製程需要使用高揮發性碳氫化合物進行氣相沉積，故薄膜電池製程中會產生有機廢氣或特殊氣體。

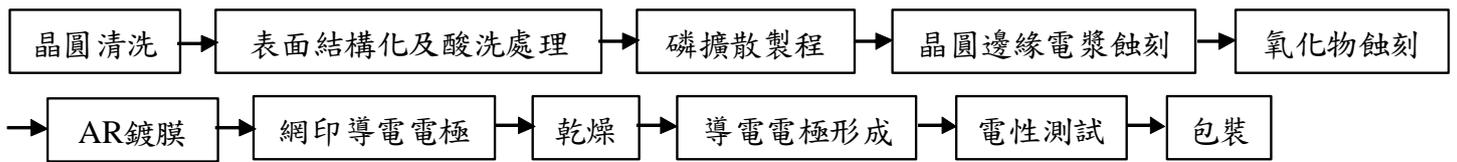


圖 7 中游產業製程

2. 中游產業製程污染源概述如下<sup>[5][6]</sup>：

- (1) 廢水污染源：主要有晶圓清洗、蝕刻、蒸鍍等處理後產生各類酸鹼廢液(氫氟酸、硝酸、硫酸、磷酸、鹽酸及氨等)及酸鹼廢水或氟系廢水。
- (2) 廢氣污染源：製程之廢氣來源來自蝕刻、蒸鍍必須使用IPA或鹵素化合物等氣體，可能產生有機廢氣、無機酸氣及碳氫化合物氣體等。
- (3) 廢棄物污染源：主要包括包裝器材(紙箱、木箱、玻璃瓶、塑膠桶)、空氣處理廢料(毒性氣體吸附塔廢料)、無塵室廢棄物(人員使用後廢棄口罩、手套、鞋套)、廢損晶片、清洗/蝕刻廢液、泵浦廢油、廢水污泥。

### 5.3 下游產業

下游產業主要為模組設計及封裝製程。典型的結晶矽太陽能電池在 MPP 條件下所能提供的電壓僅約為 0.7V，電流約 30mA/cm<sup>2</sup>。因此，使用上必須將數個太陽能晶片串/並聯在一起製成太陽能電池模組形式，以提高其實用性。主要製作過程包括：(1)選擇太陽能晶片及設計模組性能、(2)焊接多個晶片為一模組、(3)真空熱壓封裝晶片模組、(4)模組性能檢測。太陽晶片模組的封裝主收振動的作用。目前較普遍使用的高分子材料有乙烯醋酸乙烯共聚物(EVA)、鐵氟龍和環氧樹脂等 3 種。下基板主要是提供結構的穩定性，常用材料有玻璃、壓克力、金屬或塑膠薄片。目前國內太陽能電池模組之封裝方法多屬玻璃夾層封裝法。

下游產業製程污染源概述如下<sup>[4][5]</sup>：

1. 廢水污染源：廢水來源來自於濕式洗滌塔洗滌廢氣所產生之廢水。
2. 廢氣污染源：廢氣來源來自於模組焊接製程中添加助焊劑及封裝製程中使用黏著劑產生之揮發性有機氣體。
3. 廢棄物污染源：包括包裝器材(紙箱、木箱、玻璃瓶、塑膠桶)、空氣處理廢料(過濾、吸附廢濾料)、無塵室廢棄物(人員使用後廢棄口罩、手套、鞋套)、廢損晶片、廢水污泥。

## 六、太陽能電池產業製程可行之防治技術

太陽能電池產業產生之廢水性質，可分為酸鹼廢水、氟系廢水與廠務廢水；廢氣種類大致可區分為酸鹼廢氣、有機廢氣等；製程中產生之事業廢棄物皆委外處理。以下介紹各製程廢水及廢氣可行之防治技術：

### 6.1 上游產業製程污染可行之防治技術

1. 廢水處理：晶圓製造程序排出之廢水包括酸鹼廢水及含氟廢水。廢水處理流程如圖 6 所示。

- (1) 酸鹼廢水因污染單純，處理方式僅先調勻水質、水量後，再調節pH即可放流。
- (2) 含氟廢水的處理方法有許多種，目前普遍處理含氟廢水之方法包括化學沉澱法、化學沉澱/混凝法、離子交換法、結晶法。因上游製程產生之氟系廢水來自清洗、浸蝕階段，其產生之氟離子濃度較低，離子交換法與化學沉澱法適合處理低濃度含BF<sub>4</sub><sup>-</sup>清洗廢水，離子效換法乃利用陰陽離子交換樹脂吸附去除廢水中之污染物；化學沉澱法，乃利用鈣離子與氟離子發生反應結合成氟化鈣粒子沈澱後去除。

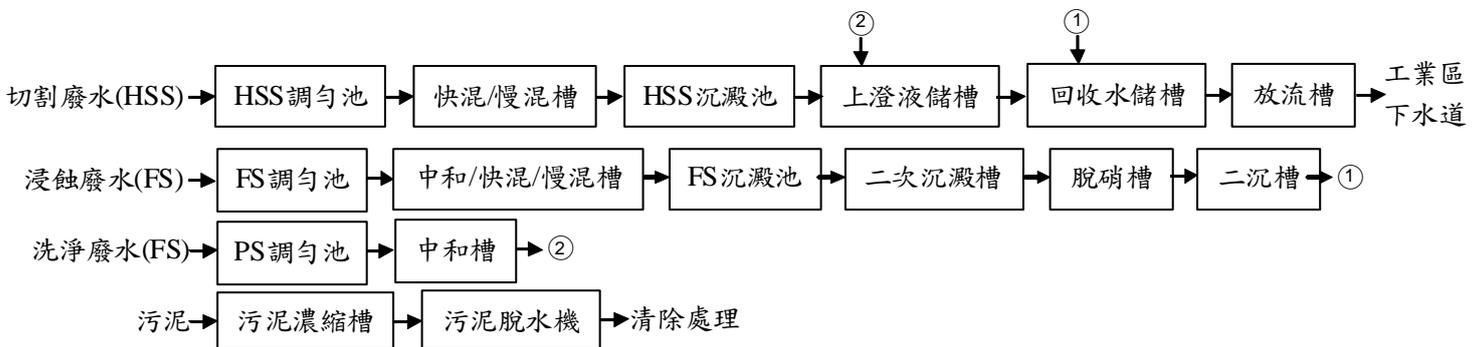


圖6 上游製程廢水處理流程

2. 廢氣處理：製程中廢氣污染來源為蝕刻及清洗製程中所產生之酸鹼氣體。酸鹼廢氣經由排氣系統收集後排至填充式洗滌塔吸收處理，其方法係將洗滌液散佈於裝有隔板、填充料或其他裝置內，使氣體迂迴通過，提供氣體/液體間較大的接觸機會以增加其間的質量傳送速率。廢氣處理流程如圖 7 所示。

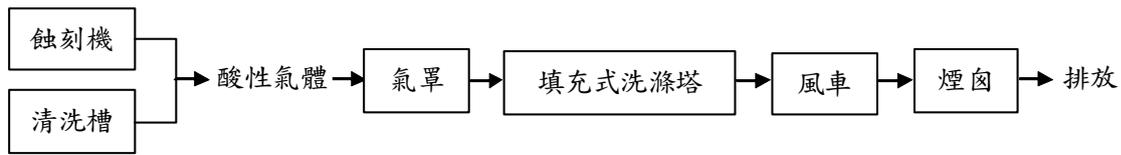


圖7 上游製程廢氣處理流程

## 6.2 中游產業製程污染可行之防治技術

1. 廢水處理：廢水來源主要有晶圓清洗、蝕刻、蒸鍍等處理後產生之酸鹼廢水及氟系廢水。廢水處理流程如圖 8 所示。酸鹼廢水處理方式與上游製程所述相同。由於中游製程產生之氟系廢水量大、濃度高，故適合使用化學沉澱法、化學沉澱/混凝法、結晶法處理之。化學沉澱法為利用鈣離子與氟離子發生反應結合成氟化鈣粒子沈澱後去除；倘為提高處理效果，後續可增加鹽、鋁鹽、高分子凝聚再予混凝沈澱處理。化學處理方法之優點為處理彈性大且能迅速方便完成廢水處理作業，但所需之藥品費多且產生大量污泥。為了減少污泥產生，有研究提出採用流動床式的氟化鈣結晶法，而即加強含氟廢水與一般酸鹼廢水之分流，使氟離子濃度提高，並於鈣離子與氟離子反應時加入晶種，在流動床式反應器中使氟化鈣結晶析出，以去除氟離子，如此可大量降低化學藥劑用量，並減少污泥產生量。結晶法目前應用在半導體廠高濃度含氟廢水的處理上，可有效降低氟離子濃度，其初設成本及操作成本低亦可使廢棄物減量或資源化。

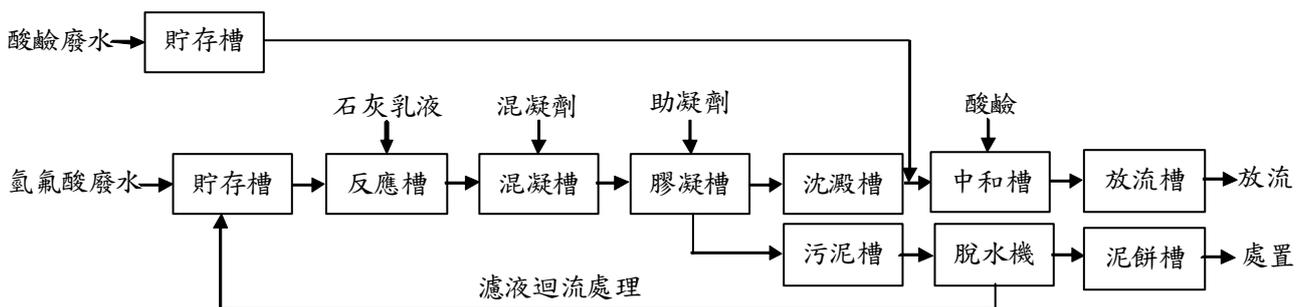


圖 8 中游製程廢水處理流程

2. 廢氣處理：太陽能電池中游產業製程之廢氣來源來自蝕刻、清洗、蒸鍍必須使用 IPA 或鹵素化合物等氣體，其可能產生有機廢氣、無機酸氣及碳氫化合物氣體等。

(1)製程中酸性廢氣處，一般均採用濕式洗滌設備，常用者如隔板式洗滌塔、浮床式洗滌塔及填充式洗滌塔等。國內最常採用填充式洗滌塔吸收污染物質。酸性廢氣處理流程圖如圖9所示。

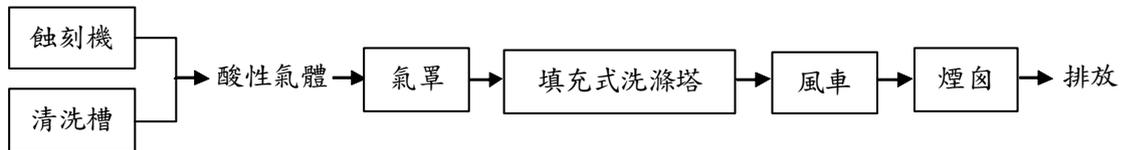


圖9 中游製程酸性廢氣處理流程

(2)製程中產生之VOCs廢氣：常見處理VOCs方法有吸附法、燃燒法及冷凝法。若廢氣特性為小風量低溫低濃度時，可以一般之活性炭吸附處理，效率甚佳。若廢氣為大風量、低濃度時則以濃縮轉輪處理，經由濃縮裝置可濃縮大部份廢氣。焚化法適用於小風量高濃度高溫之廢氣，其可達高效率，幾乎可完全去除VOCs，但需注意含塵濃度高者或會造成觸媒毒化之物質須先行經過前處理設備去除雜質。VOCs廢氣處理流程圖如圖10所示。

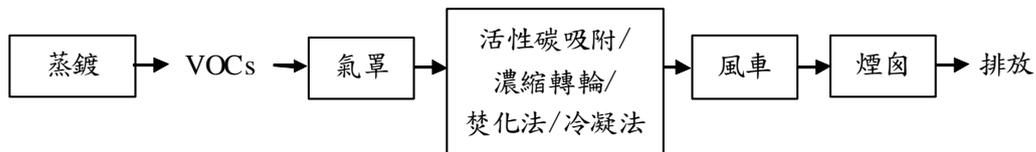


圖10 中游製程VOCs廢氣處理流程

### 6.3 下游產業製程污染可行之防治技術

- 1.廢水處理：下游製程產生之廢水主要為廢氣系統所產生之洗滌廢水。廢水 pH 值約 7~11。處理方法為經過兩次中和處理充分混合，惟廢水達到放流水排放標準即可排出廠外。
- 2.廢氣處理：廢氣來源來自於模組焊接製程中添加助焊劑及封裝製程中使用黏著劑產生之 VOCs。常見處理 VOCs 方法有吸附法、燃燒法及冷凝法；因製程產生之 VOCs 濃

度不高，若可採用活性炭吸附法或濃縮轉輪會較為經濟。若廢氣成份中含有粉塵或水份，須先行去除以提高去除效率。

## 七、結論

太陽光電能，主要是利用太陽能電池吸收太陽光能，再直接將之轉換成電能，以供需求端應用，其於應用時並無環境污染物排出。並由太陽能電池製程可知，太陽能電池製程與半導體製程相似，但太陽能電池製程中少了光罩前段尖端製程，而此前段尖端製程亦為廢氣、廢水產生有毒、致癌性物種之主要區塊<sup>[7]</sup>。由此可知，無論從原料之源頭、製程或管末，都可證明太陽能電池是一項值得推廣的清潔生產之綠色技術

## 八、參考資料

- 1.益通光電網頁：<http://www.e-tonsolar.com/edu.htm#4>
- 2.科學發展專刊，專題報導，2002年1月，349期，  
<http://www.cyut.edu.tw/~typai/ENERGY.pdf>
- 3.經濟部能源局，能源報導，Monthly Report 2001年11月，第21頁  
<http://www.tier.org.tw/energymonthly/outdatecontent.asp?ReportIssue=9011&Page=21>
- 4.DIGITIMES 科技網網頁，  
[http://tech.digitimes.com.tw/print.aspx?zNotesDocId=0000063917\\_A5H4PX8G692JQ546TNGAF](http://tech.digitimes.com.tw/print.aspx?zNotesDocId=0000063917_A5H4PX8G692JQ546TNGAF)
- 5.半導體製程業污染防治技術，經濟部工業局編印。
- 6.揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊(2007年更新版)，經濟部工業局編印。
- 7.林育旨、白曠綾、張豐堂，“半導體及光電產業現行揮發性有機廢氣控制設備之選用評估”，工業污染防治第89期，民國93年1月。
- 8.中華技術電子目錄78期，科學園區空氣污染防制，  
<http://www.ceci.org.tw/book/78/web/94-101.pdf>