

太陽能板的製程對於環境的衝擊

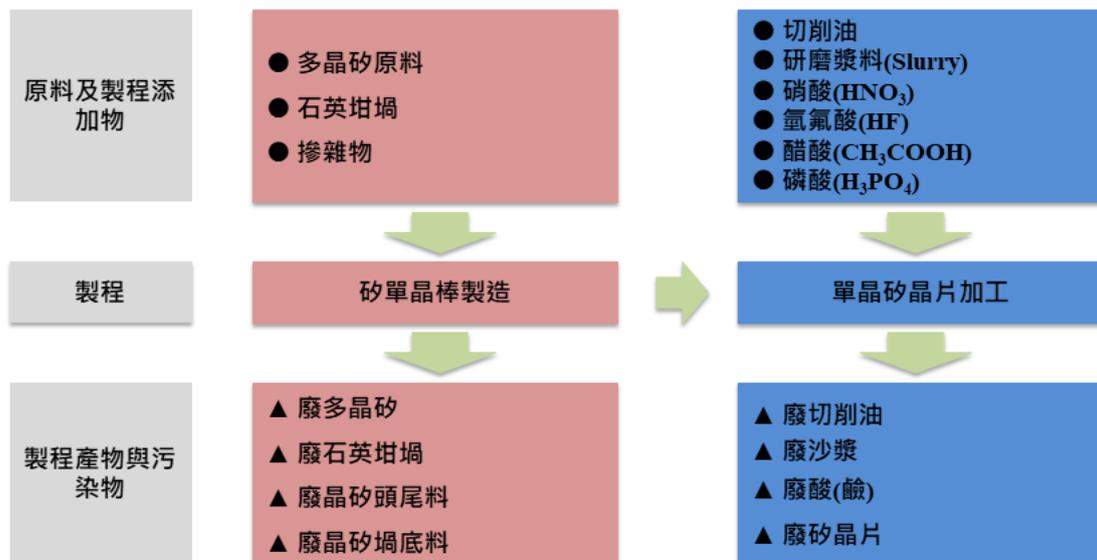
張耀仁
核能研究所

一、太陽電池製程的環境衝擊

太陽光電(Photovoltaic, 簡稱 PV)電池是一種將光的能量轉換成電能的光電元件，而用於製造 PV 的材料種類繁多，目前市場上以單晶矽與多晶矽兩種矽基材料的產品為主，市場佔有率高達 93.35%(工研院，2017)。眾所皆知，矽為地球上含量排名第二的元素，本身並不具有毒性，所以對環境的危害基本上是來自製造矽晶材料過程中添加的各種物質與其衍生物造成的。因此，談論 PV 產業對環境的影響就必需從矽晶材料製程著手。PV 單晶矽材料與半導體晶矽材料製程相似，製程相關資料較為完整，因此本文以單晶矽材料進行說明。

1. 製造單晶矽晶需投入的原料有哪些？

製造 PV 所需的矽晶材料與半導體的矽晶圓製程相似，只是製造 PV 所需的矽晶材料純度不需像半導體產業那麼高，產業的技術門檻也相對較低。製造矽晶材料的製程主要為矽晶棒製造與矽晶片加工(如圖 1)，矽晶棒製造又分為多晶矽原料熔化、晶頸成長、晶冠成長、晶身成長、尾部成長等五項程序，該製程主要投入為多晶矽原料及各種摻雜物。



註：本文參考文獻資料進行繪製

參考資料：經濟部工業局，矽晶圓製造業資源化應用技術手冊，中華民國96年8月。

林明獻，太陽電池技術入門(第三版)，全華圖書股份有限公司，中華民國101年8月。

圖 1 單晶矽晶片製程之原料投入、產物與污染物

矽晶片加工為 PV 產業中較為複雜的製程，包括：矽晶棒開方、切片、矽晶片蝕刻清洗等程序。首先，矽晶棒需要經過開方程序將其修邊成四方圓柱，方可使切片後的矽晶片為四方型。傳統切片程序是採用內徑切割機進行切片，切割過程中需添加切削油進行降溫，但因傳統切割技術易造成矽晶片破損，因此目前漸漸被線切割技術取代，線切割技術所使用的鋼線本身不具切割能力，過程需加入由碳化矽(SiC)與油混和的研磨漿料(Slurry)，此種漿料不但是良好的研磨劑，也可用於製程進行降溫。

完成切割之矽晶片表面會形成一層因機械應力所造成損傷層，該層結構會影響 PV 的效率。因此，需使用化學蝕刻技術進行清洗，蝕刻液通常是由硝酸(HNO₃)與氫氟酸(HF)所調配出的混酸，蝕刻清洗時，硝酸會使矽晶片表面形成二氧化矽(SiO₂)，此層氧化物可被氫氟酸溶解而去除，過程中有時會加入醋酸(CH₃COOH)或磷酸(H₃PO₄)當作緩衝劑，蝕刻完成之矽晶片再運用去離子水進行清洗(林明獻，2012)。

2. 製造單晶矽晶材料的產物或污染排放那些具有毒性？

矽單晶棒製程會產生各種廢餘料，例如：廢多晶矽原料、廢石英坩堝、非晶矽頭尾料及坩堝底料，如圖 8-1 所示。廢多晶矽原料與產出矽晶棒之特性相似，通常可以再投入矽單晶棒製程，重新長晶成為單晶矽晶棒。廢石英坩堝之成分為高純度的石英，高純度石英可再利用成次級石英或玻璃原料，而廢晶矽頭尾料與坩堝底料與矽晶棒成分相似，可重新投入長晶爐進行再利用(工業局，2007)。

矽晶片加工過程之毒性物質產生主要來自切割與蝕刻清洗，矽晶材料切割所添加的切削油主要由多種碳氫化合物混和而成，以乳化型切削油為例，該類切削油廢水之污染強度約 40,000~250,000mg/L(工業局，2007)，我國半導體產業污水排放標準目前為 100mg/L(環保署，2007)，若要處理如此高濃度的有機廢水需要投入龐大的成本，因此增加了處理廠商可能隨意傾倒的動機，間接危害環境生態與人體健康的風險。

矽晶片加工過程另一項有害產物為廢酸，為蝕刻過程廢硝酸、氫氟酸及緩衝液之混和物，其中，氫氟酸是急毒性化學品，最主要毒性是來自於氟離子(F⁻)，嚴重會危害人體心血管與神經系統(台中榮總，2005)。硝酸為腐蝕性化學品，有工業之母的稱號，若皮膚接觸或呼吸道吸入仍會影響人體健康，但硝酸可透過稀釋降低其危害性，對人體危害不如氫氟酸嚴重。矽晶片切割過程易造成破損或良率不佳之而產生廢矽晶片，廢矽晶主要成本仍是矽(Si)，可回收再利成長晶原料，無危害人體健康之疑慮。

3. 接觸有毒物質後的影響？

矽單晶棒製程所產出的廢餘料或廢棄物基本都是含矽的物質，本身並不具毒性，且大多可以被再利用，所以該製程產物較無明顯的毒性危害特性。矽晶片加工製程需經過切片及蝕刻清洗，過程中會加入各種化學物質，可能會產生較多危害環境生態及人體身體健康的物質，如圖 8-1 所示。若人體接觸切削油會造成溼疹性皮膚炎、毛囊炎、粉刺、膿皰及黑變病等皮膚疾病，若長期吸入可能會引起纖維瘤、脂質性肺炎、脂質性肉芽腫等疾病；皮膚接觸可能引起皮膚脫脂、皮膚炎和急毒性相同症狀；眼睛接觸可能引起結膜炎(台灣中油，2018)。

氫氟酸的傷害與其接觸途徑、濃度、時間長短及接觸到的組織穿透力與抵抗力有關。氫氟酸比其它類的酸穿透力更強，氟離子甚至能深入到骨頭和循環系統內。氟離子對於鈣和鎂有很強的親和力，結合後形成難溶的鹽，導致血鈣過低、血鎂過低和血鉀過高，接著會影響神經和心臟血管兩系統。影響神經受損會導致靜態膜電位下降，引起自發性放電、興奮、抽搐、肌肉顫抖和手足搐搦等，而心臟血管危害可能會引發致命性心律不整(台中榮總，2005)，因此小說裡將氫氟酸稱為化骨水。

4. 製造過程中有毒物質是否會釋出？

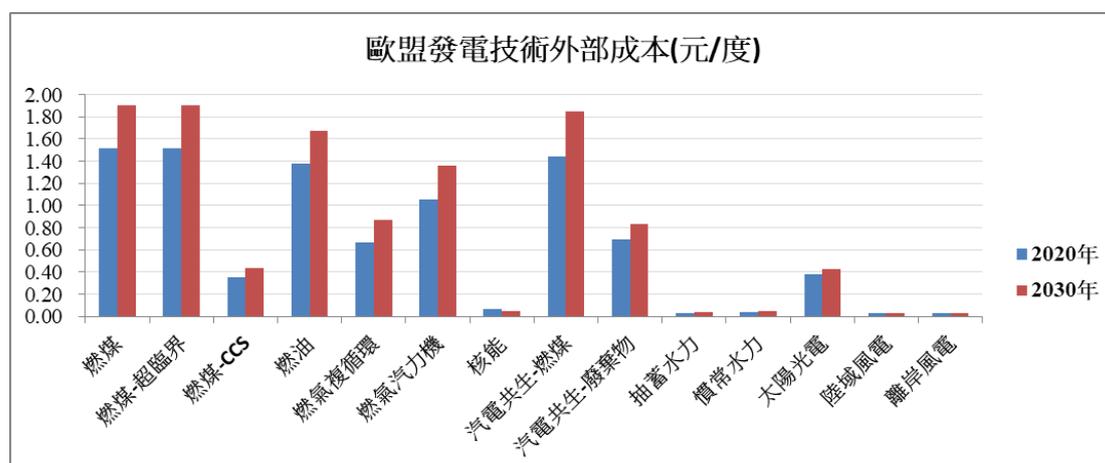
廢切硝油與切割過程產生矽晶微型顆粒會形成的廢沙漿，但這些廢沙漿通常需要委託合格之廢棄物處理機構處理或再利用，但根據媒體 TVBS 報導，我國 PV 產業每年約產 3,000~4,000 噸廢沙漿，但約只有 1 成的產量受到合法且妥善的處置，大部分非法傾倒於桃園、苗栗、彰化、雲林、高雄、屏東、台東等 7 個縣市，但這也只是媒體引述業者的說法，目前尚無法證實其可信度。矽晶片加工過程所產生的廢硝酸或氫氟酸目前皆可在廠內進行再利用，可減少製程投入的成本及後續的處理費用，此類有毒的酸類不需再委託處理機構處理，因此被非法棄置的可能性較低，影響人體健與環境生態的機會較小，但仍對於參與製造人員仍存在一定程度的健康風險。

二、太陽光電產品相較於半導體產品

我國經濟部標檢局針對 PV 產業分別制定了「台灣高效能太陽光電模組技術規範」及「太陽光電模組自願性產品驗證工廠檢查特定規範」，兩規範除了擬定了 PV 的規格、效能及可靠度，更針對 PV 產品碳足跡制定認證規範，但目前尚屬自願性申請認證階段，對於 PV 產業尚無強制約束力。很多人可能會覺得我們

都可以接受大量發展半導體產業，而半導體產業同樣會產生各種與 PV 產業相同的環境影響或危害，那是否該一視同仁呢？若從這個角度來看，我們是不應該將 PV 這項綠色產業給汙名化。有國內研究也提出此論點，該研究說 PV 與半導體製程雖相似，但太陽能電池製程中因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，說明 PV 是一項值得推廣的清潔生產之綠色技術(陳子泰，2008)。而該比較的結論是不嚴謹的，嚴格來說，只能說 PV 產業相對半導體產業乾淨，並無法證明 PV 產業是乾淨的。

若從兩種產業的產品可取代性來看，我們現在若沒有半導體產業的話，可能沒手機或電腦可用，以及沒有各種便利的電子產品可用，世界可能瞬間變回原始時代。但若沒有 PV 這項產業呢？了不起只是少了太陽能帶來的電力，但我們還有其它電力可選擇，世界並不會受到毀滅性的影響。所以我們不應該用其他產業的缺點來掩飾 PV 產業的缺點，我們必須認清一個事實，沒有一種能源或電力是完美無缺的。歐盟於 2008 年曾針對各種發電技術進行 2020 與 2030 年的外部成本評估，該研究外部成本計算是從每樣發電技術生命週期對人體健康、環境多樣性損失、農業損失、資源消耗、空氣汙染、輻射危害、氣候變遷等之衝擊影響進行評估，因此評估方法之客觀性相當充足。評估結果顯示：太陽光電之外部成本雖低於燃油、燃煤、燃氣等傳統火力發電，但卻是所有再生能源中，外部成本最高的，甚至高於核能發電(當年尚未發生 311 福島核災)，如圖 2 所示。歐盟研究顯示：PV 在製造、建造、營運到廢棄的過程中對於人體健康的衝擊危害相當大，此部分所造成的外部成本約占整體 PV 發電技術外部成本的 64%(European Commission, 2008)。從歐盟外部成本分析來看，PV 並非是對環境最有善的再生能源或低碳發電技術，真的值得我們如此努力去追求嗎？



資料來源：European Commission, 2008

圖 2 歐盟發電技術外部成本分析

PV 產業所產生的相關環境危害是否能被控制?從半導體產業的經驗來看,相關製程的環境危害是可被控制的,因為製程相關產物或廢棄物是可被資源化再利用的,例如:廢矽晶圓、廢酸鹼、廢溶劑、無機性污泥、廢切削油等,相關再利用技術皆相當成熟(工業局,2007),而 PV 產業大部分皆適用。因此,PV 產業若能妥善利用這些廢棄物資源化技術,不僅可減少廢棄物對環境的危害,更可使資源永續再利用。另外,我國未來將建置大量的 PV 發電設備(2025 年 20GW 的目標),未來勢必未產生很多的廢棄 PV 面板,政府相關單位應及早建置廢棄 PV 面板的處理或回收制度,以防廢 PV 面板對環境造成危害。建議政府相關單位應將 PV 面板公告為應回收廢棄物,從生產或進口源頭收取回收基金,用於補助廢 PV 面板廢棄後的處理或再利用,促使生產或進口商可自發性回收廢 PV 面板。

參考文獻

- 工業技術研究院(2017), 太陽光電產業概況。
- 林明獻(2012), 太陽電池技術入門, 全華圖書股份有限公司, 台灣臺北。
- 工業局(2007), 矽晶圓製造業資源化應用技術手冊, 經濟部工業局, 台灣臺北。
- 環保署(2007), 水污染防治法(排放標準), 行政院環保署, 台灣臺北。
- 台中榮總(2005), 化學品氫氟酸使用安全小手冊, 台中榮民總醫院, 台灣臺中。
- 台灣中油(2018), 國光牌切削油安全資料表, 台灣中油股份有限公司, 台灣臺北。
- 陳子泰(2008), 太陽能電池產業製程及污染防治簡介, 環保技術 e 報, 台灣臺北。
- European Commission (2008), Cost Assessment for Sustainable Energy System (CASES), Available: <http://www.feem-project.net/cases/index.php>.