

廢氣處理

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

林育旨*、白曉綾**、張豐堂***

摘要

本研究針對目前半導體及光電產業所使用之揮發性有機廢氣(volatile organic compounds, VOCs)控制設備（包括沸石吸附濃縮焚化系統、固定式活性碳吸附塔、流體化活性碳吸附冷凝系統、生物濾床、濕式洗滌高級氧化系統等），進行各設備設置及運轉成本分析、實廠運作現況與效能比較，以及適用對象評估；此外亦逐一探討各設備之主要操作問題，並提出適切解決對策，冀望提供半導體及光電產業選擇及操作 VOCs 廢氣控制設備時之評估參考。

【關鍵字】1. 挥發性有機廢氣 2. 半導體 3. VOCs 廢氣控制設備

*國立交通大學環境工程研究所博士候選人

**國立交通大學環境工程研究所教授

***國立清華大學系統與工程科學系博士候選人

一、前　　言

隨著高科技工業之快速發展，其製程所產生之污染物質如何能有效獲得控制，是目前刻不容緩、需要解決之問題。半導體常見之製程^[1]為晶圓被研製成積體晶片過程中，需依產品功能要求進行氧化多次反覆、化學氣相沈積(chemical vapor deposition)、磊晶沈積(exitaxial deposition)、離子植入/ion implantation)、以及濕式蝕刻(Wet Etching)等步驟，判斷^{[2]、[3]}該產業之揮發性有機廢氣(volatile organic compounds, VOCs)來自於光罩(photomask)、顯影(development)所使用之光阻劑、顯影液與蝕刻液，以及後續晶圓清洗所使用之丙酮、異丙醇、乙二醇等有機溶劑。

目前國內主要之光電製程為液晶顯示器(liquid crystal display, LCD)及發光二極體(light emitting diode, LED)之生產。光電製程所使用一連串之光蝕刻與顯影製造技術與半導體製程相近，該產業之 VOCs 廢氣據分析為來自清洗與化學處理所使用之丙酮、異丙醇，以及曝光程序時所使用之二甲苯、醋酸丁酯等^[4]。

為使該相關產業之空氣污染物能獲得有效管制，行政院環保署除於民國 88 年 1 月公佈「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」^[5]外，「光電製造業空氣污染管制及排放標準」^[6]亦正研擬中。因此對國內半導體及光電產業而言，選擇裝設高效率、低成本，且適用於廢氣排放特性，又可符合現行及即將施行法規之污染防治設備，為現階段最需完成之工作項目。

本研究基於過去執行相關研究及計畫之經驗，針對目前半導體及光電產業所使用之 VOCs 廢氣控制設備，進行各設備設置及運轉成本分析、實廠運作現況與效能比較，以及適用對象評估；此外亦逐一探討各設備之主要操作問題，並提出適切解決對策，冀望提供半導體及光電產業選擇及操作 VOCs 廢氣控制設備時之評估參考。

二、研究資料收集方式

案內研究分析資料來源係為 2000、2001 及 2002 三個年度^{[4]、[7]、[8]}新竹科學園區管理局委託本研究群，針對新竹科學園區內，半導體及光電業之廢氣處理研究與污染防治設備績效提升輔導之現場訪查問卷整理而得。現場訪查廠家之篩選為根據

當地環保局及科管局提供之具空氣污染代表性之廠家，計有 33 家半導體之晶圓製造、代工業及 19 家光電之 LCD、LED 業等 52 家工廠；現場訪查採專家深度輔導方式，專家群均由該產業相關製程豐富研究之學者及資深工程研究人士組成。案內問卷資料調查表，為數名於半導體及光電產業具多年實務經驗專業工程師協助完成，內容涵蓋製程產能、原物料使用、污染防治設備設置及污染排放等項目。

三、結果與討論

3.1 新竹科學園區主要 VOCs 防制設備設置比例及成本概況

圖 1 列舉新竹科學園區半導體及光電產業 VOCs 廢氣之常見處理方式，可分為兩大項包括直接處理及吸附濃縮處理。直接處理包括固定床活性碳吸附、生物處理法及濕式洗滌高級氧化等，此三套系統國內均有能力設計生產，而吸附濃縮及焚化燃燒則多仰賴國外進口，由於處理效率穩定所以為園區內大多數半導體及光電業接受採用。

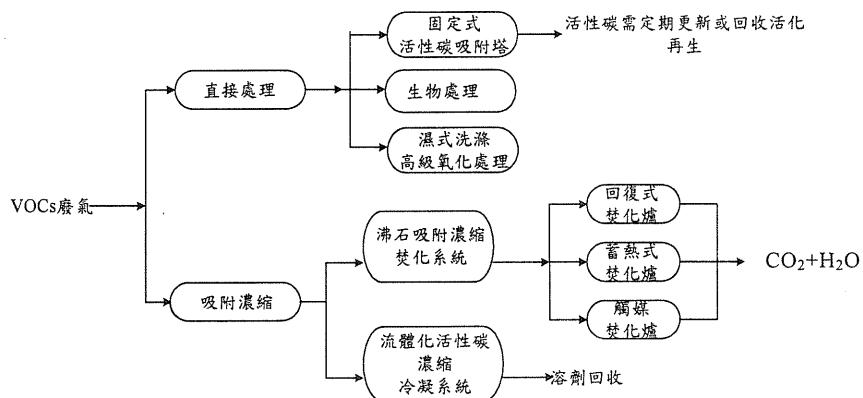


圖 1 新竹科學園區半導體及光電產業 VOCs 廉氣之常見處理設備

根據現場訪查所得之資料，由於考量所處理之廢氣排放量不同以及 VOCs 物質之差異，所以使得各廠選擇使用之設備有所不同。由表 1 可得知處理風量較大之工廠多選擇設置沸石吸附濃縮焚化系統，此系統計有 25 家半導體及 4 家光電產業設置；而 VOCs 廢氣流量較小之工廠則選擇裝設處理流程較為簡易之防制設備，如固定式活性碳吸附塔計有半導體業 3 家、光電產業 14 家。另外，少數廠家設置流體化活性碳吸附床、生物濾床以及使用高級氧化法等設備處理 VOCs。

表 1 VOCs 防制設備設置與成本概況

行業別	主要空氣污染防制設備	設置家數	總座數	處理風量範圍(CMM)	初設成本範圍(\$新台幣萬元)	操作維護成本範圍(\$新台幣萬元/年)
半導體產業	沸石吸附濃縮焚化	25	40	670~1,533	1,400~4,500	300~400
	固定式活性碳吸附	3	3	42~120	50~200	25~80
	流體化活性碳吸附	1	1	648	3000	700
	生物濾床	1	1	130	1,200	20
	高級氧化法	1	1	250	1700	200
光電產業	沸石轉輪	4	4	545~1,022	2,074~3,000	300~360
	固定式活性碳吸附	14	14	42~250	40~300	4~235
	流體化活性碳吸附	1	1	200~360	1,800	72

由於半導體及光電製造業各公司產能及屬性差異頗大，使得所應用之空氣污染防制設備種類呈現較為廣泛之分布。不過由於半導體業所排出之廢氣特性屬於大風量之廠家群較多，加上沸石吸附濃縮焚化系統具多年實廠運轉經驗且成熟穩定，據

調查資料顯示其處理效能多可符合目前國內半導體空污法規 VOCs 廢氣處理效率大於 90%以上之要求，甚至大多數設置之廠家亦能同時符合排放量小於每小時 0.6 公斤之要求，所以訪查之半導體及光電業廠家中約有 56%採行此系統。而光電業採用此系統全屬 LCD 廠家，因為該業別之廢氣排放量及污染物濃度與半導體業相當；此外，固定式活性碳吸附塔之應用多集中於光電業之 LED 廠家，因其排氣量較小、加上該產業空污法規尚未訂定，所以多數廠家設置較簡易之設備處理 VOCs 廢氣。

由表 1 亦可發現，各設備初設及操作維護成本部分，其與設備所能處理之風量成正比關係。以設置最多之污染防治設備－沸石吸附濃縮焚化系統而言，其所能處理之風量為最大、設置費用亦屬高成本，主要之操作維護費為焚化燃料費及運轉電力費，每年約新台幣 300 至 400 萬元，轉輪為平均每五年更換一次，其費用約計 600 萬元左右；而目前廢氣排放風量較小之廠家所常用之固定式活性碳吸附塔，雖其硬體結構設計簡便與其他設備相較屬最低成本，如為符合法規要求及考量活性碳本身吸附性質，則需不定期視廢氣流量及污染物濃度變化、保持高換碳頻率，如此將使得操作維護成本費高於其他污染防治設備，如生物濾床、濕式高級氧化法等。

3.2 新竹科學園區主要 VOCs 防制設備運作現況分析與評估

表 2 為新竹科學園區半導體及光電產業主要 VOCs 污染防制設備實際運轉狀況與建議選用廠家條件；沸石吸附濃縮焚化系統在半導體業應用上，其運轉效率均能大於 90%，且部分廠家亦能將排放量控制在每小時 0.6 公斤，是目前運轉實績及符合法規要求之最成熟設備；但若廢氣中含有較多量之高沸點物質，則並不適合直接或單獨使用此系統處理。

光電業製程及使用之物料與半導體相近，但在含高沸點 VOCs 去光阻劑之使用量上遠高於半導體業，故使得其排放廢氣組成上之高沸點 VOCs 較多。高沸點 VOCs 雖容易吸附於沸石轉輪上，但由於系統設計之安全考量，使得脫附高沸點 VOCs 溫度不足，所以往往造成脫附不易，且高沸點 VOCs 將蓄積其上、佔據吸附位置，影響系統整體效能，故成為部份光電業應用沸石吸附濃縮焚化系統效能不彰之因素。所以若 VOCs 廢氣中含有較多量之高沸點物質，欲應用沸石吸附濃縮系統控制，建議於進入系統前端加裝冷凝器、活性碳網柵及除霧器(De-Mister)等設備，如此將可有效處理高沸點 VOCs。而此些前置系統不易處理，所剩下之半導體及光電業 VOCs

廢氣最大組成成分異丙醇及丙酮等中低沸點物質，則可引導至後端沸石吸附濃縮焚化系統作處理，即可解決以往高沸點 VOCs 所造成之問題。

由於沸石吸附濃縮焚化系統係將廢氣吸附濃縮後，最終導入焚化系統處理 VOCs，以能源節約及符合法規要求之觀點同時評估，其較適合每分鐘 600 立方公尺(cubic meter per minute, CMM)高風量以上、VOCs 之總碳氫化合物濃度(total hydrocarbons, THCs)介於 500~1,000ppm 之廢氣特性，並以達去除效率大於 90%法規要求之廠家應用。若廢氣風量及 VOCs 濃度值偏低之廠家，應用此系統雖可同時達到法規之去除效率大於 90%及排放量小於每小時 0.6 公斤兩項要求，但國內目前法規仍未針對 VOCs 訂定明確總量管制政策之前，廠家可依經濟需求選擇其他適合之設備。

表 2 新竹科學園區半導體及光電產業主要 VOCs 污染防制設備實際運轉狀況與適用條件

主要 空氣污染 防制設備	應用 行業別	進流濃度 範圍 (ppm)	出流濃度 範圍 (ppm)	處理效率 (%)	適用廠家條件		
					符合法規之經濟性		廢氣特性
					處理效率 > 90%	排放量 < 0.6kg/hr	
沸石吸附 濃縮焚化	半導體	44.9~380	2.7~29.8	90~99	◎		廢氣風量 600CMM 以上、THCs 濃度介 於 500~1,000ppm
	光電業	100~720	Max 4	設計值 實際值 >90 65~90	◎		
固定式 活性碳吸附	半導體	--	--	50~80		◎	不建議以此系統為 主要 VOCs 廢氣處 理設備
	光電業	10~280	3~146	設計值 實際值 75~90 35~93		◎	
流體化 活性碳吸附	半導體	59.2	13.7	76.9		◎	廢氣風量 600CMM 以下、THCs 濃度低 於 500 ppm 以下。
	光電業	150~250	Max 50	設計值 實際值 80 67		◎	
高級氧化法	半導體	79.8	11.4	86		◎	
生物濾床	半導體	150	100	33		◎	

固定式活性碳吸附塔為最傳統且實廠應用最為簡便之 VOCs 污染處理設備，雖然其適用廢氣特性廣泛幾無限制，且理論上可使得廢氣中之 VOCs 獲得有效之控制，並達到目前法規要求；惟經本研究群現場訪查及實地輔導之後發現，該設備理論設計值與實際效率有顯著之差異，分析其原因在於高估每單位活性碳之 VOCs 吸附能力及換碳頻率普遍不足等所肇致。

某些廠家亦反應此設備在炎熱天候下運作時，時常會發生處理後尾氣端濃度值遠高於廢氣進流前濃度之異常現象，其係為系統為外界環境高溫、加上系統為密閉設備散熱不易，使得系統內溫度上升達到足以脫附之溫度，造成原先吸附於活性碳之 VOCs 脫附而出，且散逸至大氣造成嚴重之環境污染，而此現象亦可能造成活性碳床著火，進而發生工安事故；而該系統於冬季運轉時，可能因外界溫度低、露點下降，使得廢氣之溼氣凝結成水分，則活性碳可能優先吸附水氣，造成吸附 VOCs 之機制減弱。

由於半導體及光電產業廢氣特性隨著產能異動之變異性，若要單以固定式活性碳吸附塔欲符合目前法規要求，則需視廢氣現況時常更換活性碳，如此維護操作不易、處理效能未能獲得穩定保障，以及多年後總累積之更換費用與廢活性碳代處理費用可能遠高於其他穩定之處理設備，加上該系統前述操作實況，本研究建議半導體及光電產業不宜以固定式活性碳吸附塔作為 VOCs 主要污染防治設備操作。

流體化床活性碳吸附冷凝系統，該系統設計目的為適用於半導體業及光電業中較大風量、較高濃度之廢氣特性廠家。由於現場訪查時此兩套系統均設置不久，部分操作參數尚未穩定掌握，使得實際之運轉效能與設計處理效率值有所差異，不過處理後 VOCs 排放量符合法規小於每小時 0.6 公斤之要求。此系統若逕行處理含高沸點濃度較大之 VOCs 廢氣，亦可能發生高沸點 VOCs 優先吸附於活性碳上，使得廢氣中佔多數之異丙醇及丙酮無法獲致有效吸附處理；而廢氣中高沸點 VOCs，於脫附程序中操作不當將於活性碳顆粒上蓄積成粘稠狀，使得功能失效、需提前汰換之。故此系統前端應與沸石轉輪相同、設置高沸點 VOCs 前處理設備，以確保使用壽命及運轉效能之正常。另外，此系統末端係以冷凝 VOCs 成有機溶劑作為最終處理，此程序除了可能使得部分低沸點物質無法有顯著處理效果外，若其無法回收至製程循環使用，則亦需視為有害事業廢棄物委託處理之。

濕式洗滌高級氧化法及生物濾床之適用對象建議為中、低風量以及濃度較低 VOCs 之廠家，將其廢氣處理至符合法規排放量小於每小時 0.6 公斤要求者。依據資料顯示，各有一家半導體工廠使用其為主要之 VOCs 污染防制設備，且實際運作情況均能符合法規之要求。

濕式洗滌高級氧化法利用洗滌方式先吸收處理 VOCs 後，再送末端以臭氧及過氧化氫進行高級氧化處理，此項系統可適用之有機物種類廣泛，且廢氣中 VOCs 溶水性高即可應用，無不適用之敏感性污染物質；不過系統為了節省能源之設計，於高級氧化程序中，僅將洗滌而下之 VOCs 處理至醋酸後即停止反應，並將廢水排入後端廢水處理設備，如此可能造成後續廢水處理系統之負擔。由於該系統處理效率係藉由洗滌量來達成，所以欲增加處理效能，則需更加大吸收塔及高級氧化反應槽以滿足處理需要，廠家欲利用頂樓空間應用時須特別留意樓板所能承受之重力。

生物濾床係利用生物消化與有機物反應，且反應後無二次污染物須處理之困擾、加上操作維護費經濟，係為處理 VOCs 廢氣理想設備之一，惟其技術尚未成熟，如生物菌種種類及其環境適應性等，以致實廠運轉效率未盡理想；此外，須特別注意系統操作條件，如維持適當之溫度、含水率、酸鹼值及適時補充營養劑，以及有機廢氣中有含氯物質或重金屬類應預先處理，以免生物遭受毒化等，均是維持系統處理效能穩定之重要參數。而該設備所需之生物反應時間可能較長，反應器佔地面積大、且重量重，以及操作不良所可能產生之異臭味逸散，係應用此設備需考量因子。

四、結論

本研究針對新竹科學園區半導體及光電產業主要 VOCs 廢氣處理設備，進行設備實廠運作現況探討，並以目前半導體廢氣排放法規要求為分析基準後，建議廢氣排放風量 600CMM、VOCs 之 THCs 濃度介於 500~1,000ppm 之廠家，在經濟考量上、選擇符合法規之去除效率大於 90% 要求，採用沸石吸附濃縮焚化系統；若廢氣風量及 VOCs 濃度值偏低之廠家，應用此系統雖可同時達到法規之去除效率大於 90% 及排放量小於每小時 0.6 公斤兩項要求，但國內目前法規仍未針對 VOCs 訂定

明確總量管制政策之前，廠家可依經濟需求選擇其他適合之設備，如流體化活性碳吸附冷凝系統、生物濾床及濕式洗滌高級氧化系統等，符合法規 VOCs 排放量小於每小時 0.6 公斤之要求。單以固定式活性碳吸附塔欲符合目前法規要求，則需視廢氣現況時常更換活性碳，如此維護操作不易、處理效能未能獲得穩定保障，以及累積之更換費用與廢活性碳代處理費用已遠高於其他穩定之處理設備，加上該系統操作實況，本研究建議不宜以固定式活性碳吸附塔作為 VOCs 主要污染防治設備操作。

五、參考文獻

1. 經濟部工業局，半導體製程使用氣體的職業危害，1995。
2. 吳學翰，半導體製程尾氣分析之研究，碩士論文，雲林科技大學環境與安全工程學系，1998。
3. 廖海瑞，半導體製程使用氣體的職業危害，工業安全科技，第 15 期，第 29~33 頁，1995。
4. 國科會新竹科學園區管理局，新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導，2001。
5. 行政院環保署，半導體製造業空氣污染管制及排放標準，<http://www.epa.gov.tw/>，1999。
6. 行政院環保署，電子產業及特定行業空氣污染改善輔導示範推廣及管制標準研訂專案工作計畫期中報告，EPA-90-FA12-03-A024，2001。
7. 國科會新竹科學園區管理局，園區半導體製造業廢氣處理及排放調查研究，2000。
8. 國科會新竹科學園區管理局，新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導 II，2002。