

微污染控制之成功案例

Micro-contamination Control Review

施惠雅、李壽南、顏紹儀、呂建豪/工業技術研究院能源與環境研究所

中文摘要

隨著半導體晶圓關鍵尺寸微小化、平面顯示器面積具大化，先進製程產品正面臨微量污染物之嚴重威脅，為大幅提昇產品良率，無塵室管理必須有完整的微污染控制策略。本文彙整過去 20 幾年國內外微污染控制之成功案例，希望藉此經驗之傳遞協助國內業者順利邁入先進製程。

英文摘要

Following the feature size miniaturization of semiconductor wafers and the substrate enlargement of plat panel displays, micro-contaminants pose a serious threat to the state-of-the-art manufacturing processes. To greatly enhance the product yield, the manufacturer should establish an intact strategy for micro-contamination control (MCC). In this study, the internationally successful cases of MCC in 20 years are presented, which is expected to assist Taiwanese manufacturers to smoothly advance to the next technology node.

前言

半導體與光電精密製程之快速演進，趨使無塵室生產環境潔淨度要求日趨嚴苛；國際半導體技術藍圖委員會(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)預估至 2010 年晶片關鍵尺寸(critical dimension, CD) 將縮小至 45 奈米(nm)，而微污染控制為關鍵技術之一^[1]。

理論上，(微)污染控制最好方式乃由源頭著手，瞭解污染源並予以消除乃為最佳策略。宏觀整座無塵室，其污染源概括分為兩類：經由外氣引進或內部作業所產生；外氣污染物主要源自於本身或鄰近廠煙囪排放、汽機車或發電機啟動、廢水處理過程之氣體逸散等，而內部作業所產生之污染包括：機台及廠務系統之維修保養(preventive maintenance, PM)、濕式清洗台(wet bench)逸散、無塵室設備(如濾材、塑膠手套)材料釋氣(outgassing)及製程尾氣或製程氣體管路洩漏等。

微污染定義與分類

廣義而言，微污染物包含氣態分子(airborne molecular contamination，簡稱 AMC)及固態微粒(particle)，近來文獻將氣態污染物歸納為五類，分別為酸(acids，簡稱 MA)、鹼(bases，簡稱 MB)、可凝結物(condensables，簡稱 MC)、摻雜物(dopants，簡稱 MD)及其他未分類物(no classes)^[2]；根據 SEMI F21-1102 定

義，酸為化學反應中之電子接受者，鹼則為電子提供者；可凝結物為水除外在常壓下沸點高於室溫之物質，且具有在潔淨物表面凝結之能力；摻雜物則是指具改變半導體材料電性之元素^[3]，五大類氣態微污染分類如圖 1 所示。

Forsland 等認為無塵室內主要微污染來源有四類，一是製程化學品的洩漏與逸散；其次是人為活動，據研究顯示人活動會產生 NH₃ 以及每秒近 600 顆微粒；再者是無塵室內設備材料本體釋氣，如自 HEPA 濾材釋出硼及由晶片盒釋出 DBP (dibutyl-phthalate)和 BHT (2,6-di-t-butyl-4-methyl-phenol)^[4]；最後是外氣，包括 O₃、SO_x、NO_x、MA、MB、MC 及來自海水之 MD^[5]。

微污染之影響

無塵室內製程繁複，其中又以微影(lithography)、閘極(gate)及接觸層(contact layer)等製程對微污染具高敏感度，然微污染不僅影響製程，對人體健康亦有危害，文獻研究指出意外事故或 PM 所造成之短暫間歇性的高濃度暴露顯著危及健康，如肺功能異常、肺癌及自發性流產等症狀^[6]；對於產品良率之傷害層面更廣，如歸類於 MA 的 HCl 濃度大於 28 ppb 便可造成肉眼可見之晶片腐蝕^[7]、MB 中的 NH₃ 會造成『T-topping』現象^[8]、MC 中含 6 到 10 個的碳化合物會影響微影製程中光的傳遞^[9]，屬 MD 的硼吸附於晶片後使摻雜物濃度失去控制^[10]、一顆粒徑為 50nm 的微粒便會導致一片晶片(die)毀損^[11]，因此，微污染監測與控制是締造高良率產品之重要技術，瞭解污染源為其首要步驟，以下將對各類微污染來源及其影響舉例說明：

MA 可能源於外氣及內部循環氣體，外氣主要為煙道排放之製程尾氣藉 MAU(make-up air unit)吸入廠內，循環氣體內之污染物則由 wet bench、機台 PM 及原料或尾氣管路洩漏等所貢獻。另一特殊情況發生在機台反應腔(chamber)PM 後之復機，復機過程 chamber 壓力下降至 450 torr 以下時，水汽凝結為細水滴，而殘留在機台內的微量 SO₂ 便與細水滴反應成硫酸(H₂SO₄)液滴，當壓力再回復常壓時，液滴中水分蒸發形成濃縮之硫酸液滴，殘存於 chamber 內導致晶片腐蝕^[12]。

MB 是微影製程特別敏感之污染物，『T-topping』為典型副作用之瑕疵品，Rueda 曾發表 MB 對不同光阻劑的影響，圖 2 即為其實驗結果^[8]。此外，其他研究發現當晶圓經過使用 Cl₂ 的乾蝕刻製程後再暴露到無塵室中的微量 NH₃，晶圓表面將因酸鹼反應而產生次微米級之鹽類微粒^[13]。MB 另一影響是線寬改變，實驗結果顯示晶圓暴露於 5 ppb 的 MB 十分鐘便造成 10-20 nm 的誤差，比利時的 IMEC 研發中心進一步研究結果發現，使用 ESCAP 248 nm 的光阻、暴露於 MB 濃度為 15 ppb 之無塵室，導致 6 nm/min 的關鍵尺寸誤差。MB 來源除了未處理乾淨之進氣外，廠內生產作業是主要貢獻源，如 wet bench 光阻逸散造成無塵室持續幾小時 MB 濃度值高達 200 ppb；倘若 CMP(chemical mechanical polish)製程隔間門被延長開啟，將導致微影區的胺類濃度值大幅升高^[14]。

MC 污染會造成晶圓表面之 Si-N 膜變為氧化矽(Si-O)，進而導致氮化矽(Si-N)

膜之膜厚與純度同時降低^[15]；MC 另一影響為改變介電質特性而影響潰電壓^[16]，或形成 Si-C 之不純結構^[17]。MC 來源除製程原物料的逸散外，設備材質釋氣是主要來源，如使用塑膠材質之晶片盒(wafer cassette)會釋出 DBP 及 BHT，由於此二種 MC 之化學極性偏高，因此於晶圓表面之附著量較多，此問題可用稀釋之 HF 清洗來解決^[4]。在多種塑膠材質釋氣實驗中發現，PTFE (polytetrafluoroethylene) 與 PFA(perfluoroalkoxy)的釋氣(outgassing)量最少^[18]；另有文獻資料發現作業人員穿戴之手套也是無塵室內 MC 的污染源，包含橡膠、抗氧化劑、油脂、介面活性劑及無機物等，研究結果也發現橡膠手套(nitrile glove)的污染物逸散量遠小於乳膠手套(latex glove)^{[19][20][21]}。

MD 來源除外氣貢獻及無塵室內機台或管路內氣體 (如 BF₃, PH₃..)洩漏，還有 HEPA 濾材的密封膠(sealant)所釋放出之有機磷酸鹽類(organophosphate)^[22]，或是由濾材纖維釋出之硼^[10]，這些額外的摻雜物會影響電流而導致元件失效或產品良率下降。

其他未分類的污染物來源主要為廠內作業及廠外進氣，如 PM 作業使用 IPA、acetone 等，而 wet bench、TEOS/O₃ 製程及使用 DUV 之機台等皆可能為 O₃ 來源，另台灣夏季高溫時大氣中 O₃ 濃度可高達 100 ppb，防範外氣污染成為控制重點，研究發現“壞的”O₃ 會影響晶片電容^[23]；而另一方面，位於微影區鏡片(lens)周圍“好的”O₃，可以防止有機物沈積、降低鏡片霧化發生機率^[24]。

Shoko 等將各類污染物對不同製程可能產生之影響整理如表 1^[25]，國際半導體設備及材料協會(SEMI)針對不同等級之無塵室亦訂定其污染物容許標準，例如 MA-10 範圍內其總酸性氣體最大容許濃度為 10 pptM (part per trillion molar)，見表 2^[3]，而 ITRS 對不同線寬之製程也提供其建議參考值^[1]，如表 3 所示，這些標準乃是提供無塵室內微污染控制成果之重要參考依據。

污染物之採樣分析方法

一般空氣以衝擊式吸收瓶(impinger)或固氣分離採樣器取樣(denuder)，MA 及 MB 搭配離子層析儀(IC)分析，MD 則搭配 ICP-MS 分析^{[1][26]}，MC 或有機 MD 類則是選用吸附管取樣後搭配熱脫附氣體層析質譜儀(TD-GC-MS)分析^{[4][27]}。若污染物具極性鍵結(如 C=O, S=O)容易吸附於晶圓表面，可將晶圓暴露於環境中再溶出污染物後搭配氣象層析質譜儀(GC-MS)分析^[28]，各類污染物採樣分析方法整理如表 4^[29]；在即時監測部分亦有商業化之產品，例如利用污染物與不同金屬片(如銅、銀及其他金屬)反應後之膜厚改變而偵測 MA 濃度值，其產品如圖 3^[30]；其他如總鹼分子即時監測(total molecular base-real time monitor ,TMB-RTM)、離子遷移率光譜儀(IMS)，或是將 IMS 結合 MS 等，而無選擇性的 AMC 監測儀則有利用壓電石英矩陣測量晶片上沈積總質量的設備，但壓電石英天平容易受濕度影響，另 ppB-RAE 則是利用 UV 光將化學鍵結打斷後以電場分離陰、陽離子，見圖 4，至於微粒則可使用雷射微粒計數器(laser particle counter)作為即時監測之儀器^{[18][[31][32]}，見圖 5。

Muller 認為 AMC 控制策略有三個步驟，首先評估內外空氣品質辨識潛在污染物，其次為運用 AMC 控制技術改善環境品質，最後持續監測並控制環境^[33]，推演其概念可將 AMC 控制策略彙整如圖 6；而空氣品質評估應注意下列幾項原則：

- 1.新 fab 應建立原始背景值，並持續蒐集廠內趨勢資料。
- 2.金屬類空氣總採樣體積必須 3m^3 ，有機物則需 0.05m^3 。
- 3.藉由門縫之氣流、管路傳送等因素，鄰近區域會交互污染^[34]。

至於化學濾材(chemical filter)測試規範應包含：

- 1.過濾效率須大於 90%，或使用後污染物濃度應低於 1 ppb。
- 2.可使用時間須大於 1 年。
- 3.測試濃度須低於 100 倍之使用條件下濃度。
- 4.微影製程區 NH_3 濃度應低於 1 ppb。
- 5.金屬製程區(metallization)環境中 HF 或 Cl_2 濃度應低於 1 ppb^[35]。

此外，研究顯示用以減少晶圓與外界環境接觸之晶片傳送盒(front opening unified pod，簡稱 FOU)P，其材質與使用設計亦與微污染相關，不良設計會導致污染物局部累積，因此 FOU 之性能評估亦相當重要^{[36][37][38]}。

台灣成功案例

瞭解污染物主要來源、途徑及其影響為控制微污染之首要步驟，以 O_3 為例，來源分佈 fab 內多處，如 wet bench、TEOS/ O_3 製程及 O_3 水混合系統等，2003 年發表的成功案例發現，臭氧水排放後會釋出 O_3 氣體，高達 102 ppm 的 O_3 氣體累積於未密封的 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ 混合系統內，而由混合系統再逐漸逸散至無塵室。解決方案為於溢流排放管增設 U 型水封及 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ 混合系統加設抽氣裝置。另一案例為乾蝕刻製程後之晶圓釋氣(wafer outgassing)，近 3ppm 的 SiF_4 由下貨腔(wafer-out chamber)釋出，污染周圍環境並造成作業員異味抱怨，解決方案為取貨前以 150 l/min 的 PN_2 進行連續 150 秒之迫淨與抽氣，經此工程改善後，下貨過程之異味與污染源被成功清除，且晶片上之微粒數目也顯著減少^[39]。過去經驗亦顯示，產品(wafers & glass substrates)儲存區(stocker)曾發生硼的交互污染情形，暫存區內之流場設計與 PM 週期應仔細考量。

此外，機台例行 PM 亦為廠內 MA 與 MB 之主要來源，包含機台與管路端拆清過程皆會釋出腐蝕性氣體，其中 etching 機台 PM 時發現高濃度的 HCl 和 HCN、 NO_3 、 SiF_4 及 HBr 等危害性氣體滯留於機台內，而 CVD 機台 PM 時亦發現有 SiF_4 、 HNO_3 、 HCOOH 及 NH_3 等逸散，值得注意的是多數業者管路與 dry pump 乃委外清理，此為最難管理且容易忽略的部分，研究資料顯示管路內的 HCl 濃度可高達 339ppm，拆清過程若未能及時密封處理，高濃度的 MA 及微粒將隨廠內循環氣流污染至無塵室各處。此外，使用去光阻劑(如乙醇胺)之機台 PM 過程會有 NH_3 逸散。

針對 PM 過程氣態污染的控制方式為加設局部抽氣裝置，並實際評估該裝置

之捕集效率，以確保能有效改善污染物逸散之問題，而 PM 過程拆卸下之零組件(parts)應及時以塑膠袋密封，尤其是可能產生砷微粒的機台，專家更建議以雙層塑膠套密封後攜出至 fab 外清理；另要特別關注的是 PECVD 製程管路拆清需注意安全及微粒污染之危害，研究結果顯示此特殊製程管路內微粒之特性會與 SiH₄結合，並將其包覆於管壁上的粉塵內，拆清過程因粉塵結構受破壞而將 SiH₄釋出，恐造成爆沖並觸動廠內 VESDA 系統(及早型偵煙器之縮寫，全名為 Very Early Smoke Detector Action)，控制方式為管路纏加熱帶減少氣體與微粒之蓄積，並選用適當的 local scrubber 處理其尾氣^[40]。

除污染源之控制外，若能瞭解氣流動向及污染物流佈路線更有助於微污染之控制與影響評估，因此要建立無塵室內流場與濃度場模式，並搭配釋放追蹤氣體(SF₆)進行實場量測，將所得數據用於修正模式使之更切合實際，如圖 7 所示，結果除能應用於污染源之追蹤與影響調查外，亦能套用於氣體監測器之佈點^[41]與廠外污染源貢獻量推估，見圖 8 ~~錯誤！找不到參照來源。~~^[42]。

完整且積極的微污染控制策略必須要能隨時監控無塵室內的環境，最佳方案之一為無塵室迴風區以 open-path FTIR 進行連續性即時監測，如圖 9 所示，同時建立廠內製程原料、機台、管路等電子化系統，並結合化學品流通資料庫，見圖 10^[43]，整合此兩種系統應用於異常狀況(如管路洩漏)發生時，能即時偵測並搜尋資料庫找出洩漏源以供廠內應變，使廠內微污染管理更臻完備。

結論

擬定有效的微污染控制策略，須對污染源、途徑與產品影響全面瞭解，對已熟知的污染源(如 PM 作業逸散、煙囪回流、晶片及晶片盒之釋氣)應儘速予以消減；對未知污染源，則藉由流場與濃度場模擬分析、即時監測器(如 OP-FTIR)或定點採樣分析(如 TD-GC/MS)予以瞭解、控制，爾後選用化學濾材搭配微環境(mini-environment)擔任最後一道防線之保護；而任何控制措施之有效性與限制性更需經由實測數據獲得完全之確認與驗證。

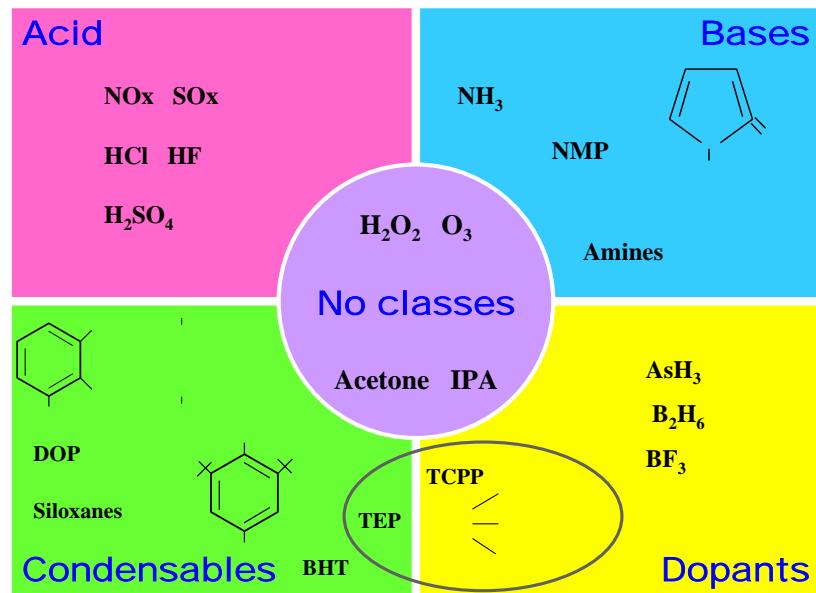


圖 1、典型五大類氣態微污染之分類及代表物

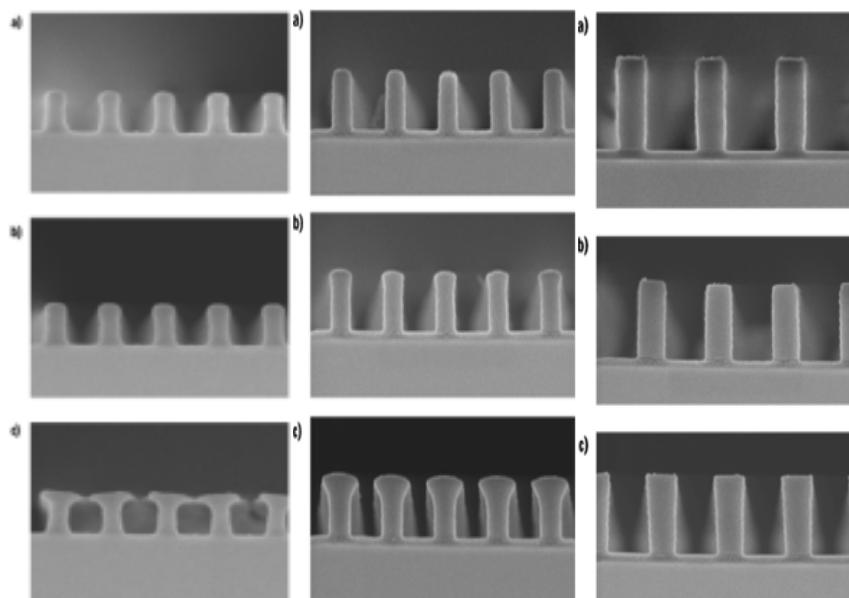


圖 2、MB 對不同光阻之影響：a)為無停留，b)曝曬機台內停留 45 分鐘，c)無塵
室內停留 45 分鐘之結果(圖片轉載自參考文獻 8)

CO—OCH₃

CO—OCH₃



圖 3、已商業化之 MA 即時監測產品



圖 4、無選擇性之 AMC 監測儀器



圖 5、市售之雷射微粒計數器

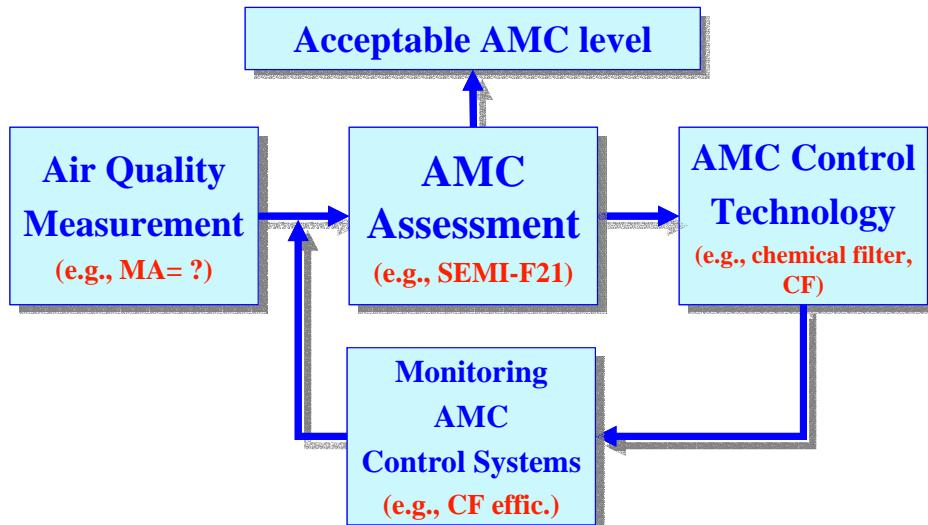


圖 6、AMC 控制策略

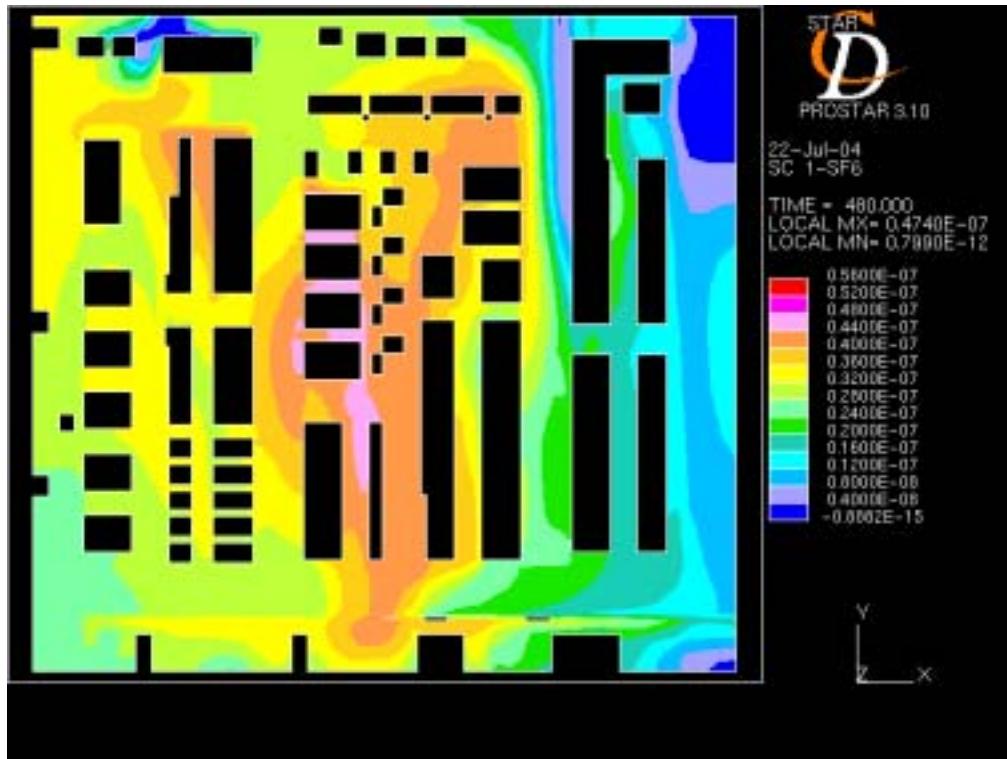


圖 7、無塵室污染物擴散後之濃度分佈圖

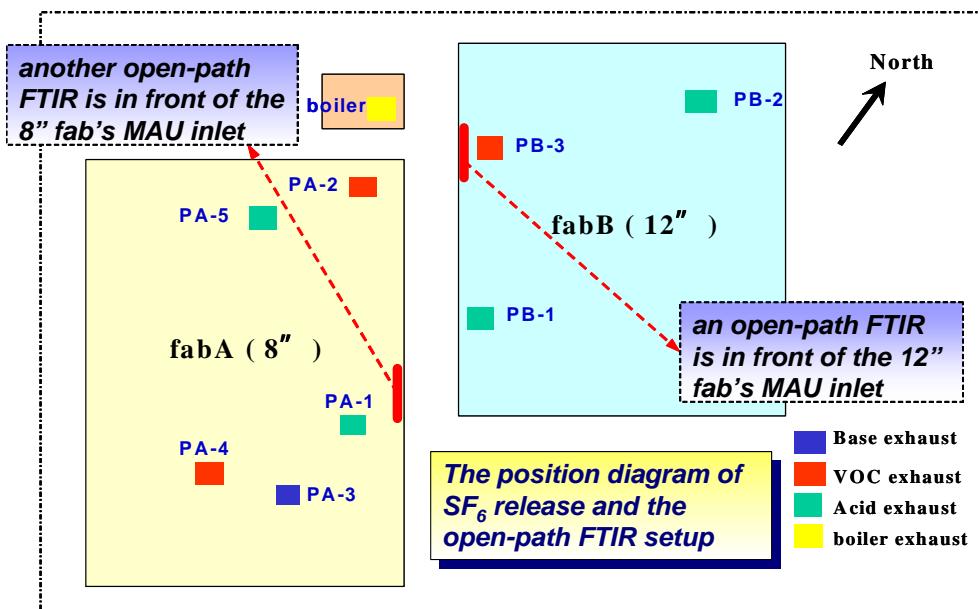


圖 8、煙道排放污染物對無塵室之貢獻比評估示意圖

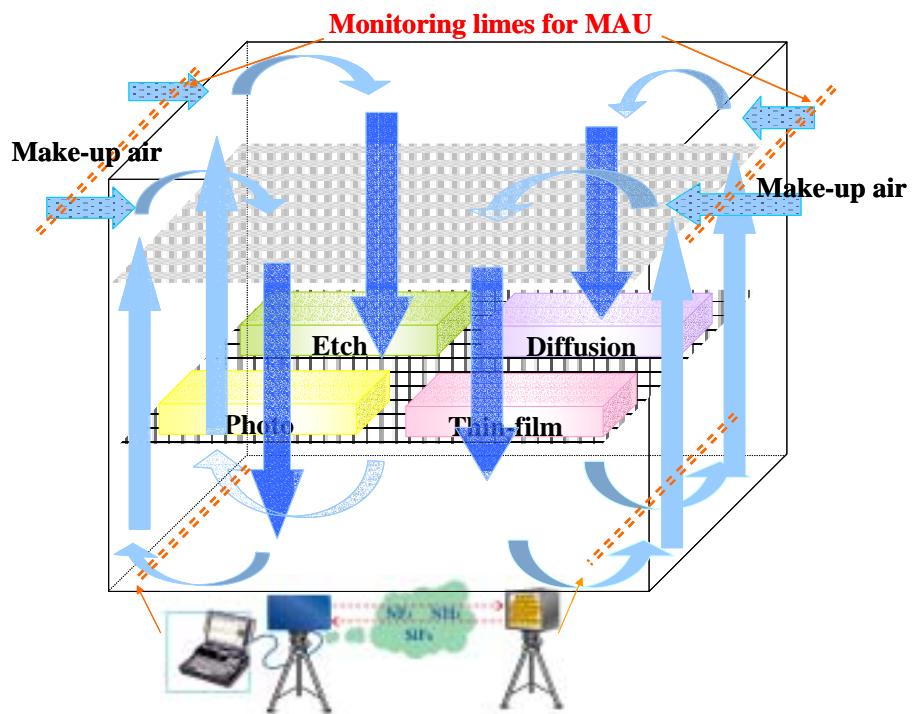


圖 9、迴風區架設 open path FTIR 即時監測示意圖

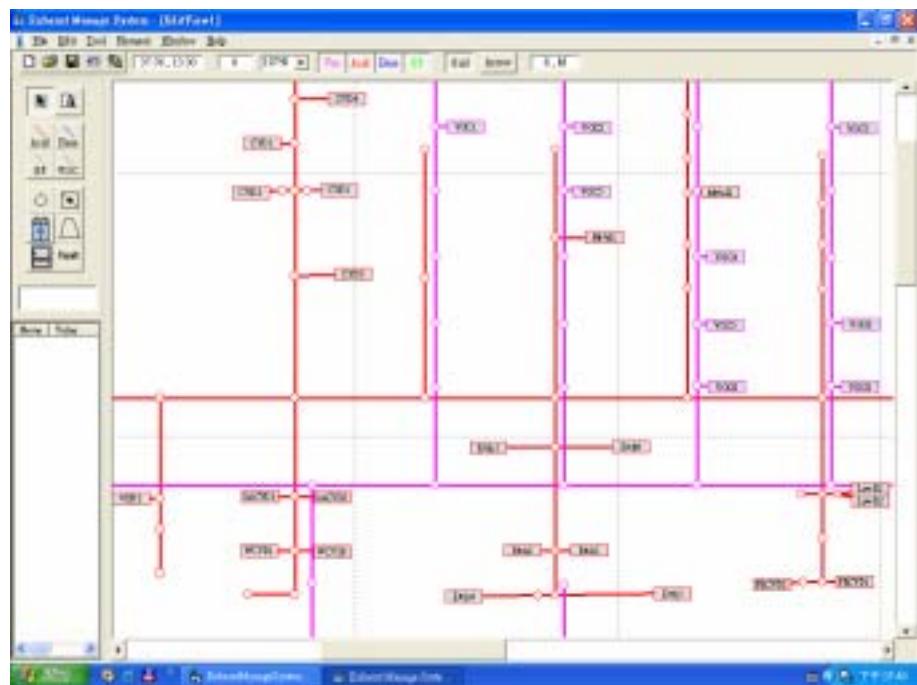


圖 10、電子化洩漏源即時偵測系統

表 1、污染物對半導體製程之影響

Process step	Failure	Contaminants				
		A	B	O	H	D
Mask oxidation	Diff.					
Mask SiN deposition	Thin film	Haze/low thickness uniformity		○	○	
Active area pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
STI RIE	Etch					
Active area oxidation	Diff.					
STI SiO ₂ fill	Thin film					
Well pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
Well implant	I/I	Vth shift				○
Gate oxidation	Diff.	Low breakdown field/Oxidation rate change		○	○	
Poil Si deposition	Thin film	Low breakdown field/Unusual growth		○		
Gate conductor pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
Gate conductor RIE	Etch					
Extension implant	I/I	Vth shift		○	○	
Spacer TEOS/SiN	Thin film					
S/D pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
S/D implant	I/I	Sheet resistance increase		(○)	○	
BPSG deposition	Thin film	Moisture absorption Vth shift			○	
CMP	Etch					
Contant pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
Contant RIE	Etch	corrosion		○		
Metal deposition	Thin film	Native oxide growth		○		
CMP		Contact resistant increase		○		
Metal deposition	Thin film	Native oxide growth		○		
Interconnection pattern	Photo	T-topping (DUV)		○		
Metal RIE	Etch	corrosion		○	○	

A: acid gas, B: basic gas, O: organic molecules, H: humidity, D: Dopant

: self contamination

表 2、SEMI 針對不同等級之無塵室污染物訂定之標準

Material Category	1*	10*	100*	1000*	10,000*
Acid	MA-1	MA-10	MA-100	MA-1000	MA-10,000
Base	MB-1	MB-10	MB-100	MB-1000	MB-10,000
Condensable	MC-1	MC-10	MC-100	MC-1000	MC-10,000
Dopants	MD-1	MD-10	MD-100	MD-1000	MD-10,000

*Concentration, in parts per trillion

表 3、ITRS 對晶片環境中之污染物控制標準建議值(摘錄自參考文獻 1)

Year Production	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DRAM 1/2 Pitch (nm) (contacted)	80	70	65	57	50	45	40	36	32
MPU/ASIC metal 1(M1) 1/2 Pitch(nm) (contacted)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
MPU physical Gate Length(nm)	32	28	25	22	20	18	16	14	13
Wafer Environment Control such as cleanroo, SMIF POD, FOUP, etc...not necessarily the cleanroom itself but wafer environment.									
Critical particle size(mm)[A]	40	35	33	29	25	23	20	18	16
Number of particle size (mm)[A][B]	ISO CL2	ISO CL2	ISO CL2	ISO CL2	ISO CL1	ISO CL1	ISO CL1	ISO CL1	ISO CL1
Airborne Molecular Contaminants in Gate Phase (pptM) [C][G][M]									
Lithography (cleanroom ambient)[V]									
Total acids (as SO ₄) including organic acids	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Total bases (NH ₃)	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Condensable organics (w/ GCMS retention times benzene, calibrated to hexadecane)	26000	26000	26000	26000	26000	26000	26000	26000	26000
Refractory compounds(organics containing S, P, Si)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
General Wafer Environment (cleanroom/ POD/FOUP ambient, all areas unless specified below)									
Total acids (as SO ₄) including organic acids	1000	1000	1000	1000	1000	500	500	500	500
Total base (as NH ₃)	5000	5000	5000	5000	5000	2500	2500	2500	2500
Condensable organics (w/GCMS retention times benzene, calibrated to hexadecane)	4000	3500	3000	3000	2500	2500	2500	2500	2500
Dopants [E] (front end of line only)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
SMC (surface molecular condensable) organics on wafers, ng/cm ² /day[M] *	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5
Front-end-process, bare Si, total dopants added to 24-hour witness wafer, atoms/cm ₂ [D][M]	2.00E+12	1.00E+12							
Front-end-processes, bare Si, total metals added to witness wafer, atoms/cm ₂ [F][M]	2.00E+10	2.00E+10	2.00E+10	2.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+10

表 4、取樣及分析方法

	取樣方法	分析儀器
MA	1. 空氣以衝擊式吸收瓶(impinger)或固氣分離採樣器收集。 2. 晶片或其他材料直接暴露後，再以超純水洗出後分析水樣	離子層析儀(IC)
MB	1. 胺類或氨氣：衝擊式吸收瓶或固氣分離採樣器收集。 2. 醚胺：選用吸附劑取樣	1. 離子層析儀(IC) 2. 熱脫附氣體層析質譜儀(TD-GC-MS)
MC	1. 空氣：以吸附劑取樣 2. 晶片上：暴露後再溶出或熱脫附法	1. 熱脫附氣體層析質譜儀(TD-GC-MS) 2. 氣象層析質譜儀(GC-MS)
MD	1. 空氣中的磷或硼：以衝擊式吸收瓶取樣 2. 有機磷：以吸附劑取樣	1. 型感應耦合電漿質譜儀(ICP-MS) 2. 氣象層析質譜儀(GC-MS)

參考文獻

- [1] International technology roadmap for semiconductors.2005 edition field enhancement.
- [2] C. R. Ayre, A. K. Mittal, J. F. O'sullivan. The influence and measurement of airborne molecular contaminants in advanced semiconductor processing. Semiconductor Fabtech, 24th Edition, 2005.
- [3] SEMI F21-1102 classification of airborne molecular contamination levels in clean environments. Semiconductor Equipment and Materials International. 2001.
- [4] Saga K. and Hattori, J. Identification and removal of trace organic contamination on silicon wafers stored in plastic boxes. *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, No. 10, October, 1996.
- [5] M. Forsland and S. O'Reilly. Prevention of Airborne Molecular Contamination. Semiconductor. Fabtech, 12th Edition, 2000.
- [6] M. F. Hallock, S. K. Hammond, C. J. Hines, S. R. Woskie, and M. B. Schenker. Patterns of chemical use and exposure control in the semiconductor health study. *American Journal of Industrial Medicine.*28:681-697, 1995.
- [7] J. K. Higley and M. A. Joffe. Airborne molecular contamination: cleanroom control strategies. *Solid State Technology*, July 1996.
- [8] D. Ruede, M. Ercken, T. Borgers. The impact of airborne molecular base on DUV photoresists. *Solid State Technology*, August, 2001.
- [9] S. Barzaghi, A. Pilenga, G. Vergani, S. Guadagnuolo, S. Getters. Purged gas purification for contamination control of DUV stepper lenses. *Solid State Technology*, September, 2001.
- [10] F.A. Stevie, E. P. Martin, Jr., P. M. Kahora, J. T. Cargo, A.K. Nanda, A. S. Harrus, A. J. Muller, and H.W. Krautter. Boron contamination of surfaces in silicon microelectronics processing: characterization and causes. *J. Vac. Sci. Technol. A* 9 (5), Sep/Oct, 1991.
- [11] L. B. Levit, T. M. Hanley, and F. Curran. In 300mm contamination control, watch out for electrostatic attraction. *Solid State Technology*, June 2000.
- [12] Yan Y. Benjamin, Y. H. Liu, and David Y. H. Pui. Condensation-induced Particle Formation during Vacuum Pump Down. *J. Electrochemistry Society*, 1993.
- [13] K. Kanzawa and J. Kitano. A semiconductor device manufacturer's efforts for controlling and evaluating atmospheric pollution. *IEEE Transactions on Semiconductor Engineering*, 1995.

- [14] B. Demandante, K. Murray, and M. Alexander. Protect DUV Processes with Real-time Molecular Monitoring. Semiconductor International, September, 2000.
- [15] K. Saga and T. Hattori. Influence of Surface Organic Contamination on the Incubation Time in Low-Pressure Chemical Vapor Deposition. J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No. 9, September 1997.
- [16] Y. Ishihara, D. Nakajima, and T. Ohmi. Economical clean dry air system for closed manufacturing system. IEEE Transactions on Semiconductor Engineering, February, 2000.
- [17] S. R. Kasi, M. Liehr, P. A. Thiry, H. Dallaporta, and M. Offenberg. Hydrocarbon reaction with HF-cleaned Si(100) and effects on metal-oxide-semiconductor device quality. Appl. Phys. Lett. 59(1), 1 July 1991.
- [18] K. J. Budde, W. J. Holzapfel, and M. M. Beyer. Application of ion mobility spectrometry to semiconductor technology: outgassings of advanced polymers under thermal stress. J. Electrochem. Soc., Vol. 142, No. 3, March, 1995.
- [19] P. H. Schnabel, P. M. Lindley, D. Nehrkorn, and M. Kendall. Identifying the types and potential sources of airborne molecular contamination: a multi-technique approach. Semiconductor Fabtech, 11th 2001.
- [20] H. R. Bhattacharjee and S. T. Paley. Comprehensive Particle and Fiber testing for cleanroom wipers. Journal of the IEST, Nov/Dec 1998.
- [21] D. S. Ensor, J. M. Elion, and J. Eudy. The size distribution of particles released by Garments during Helmke Drum tests. Journal of the IEST. Fall 2001.
- [22] J. A. Lebans, W. C. McColgin, J. B. Russell, E. J. Mori and L. W. Shive. Unintentional Doping of Wafers Due to Organophosphates in the Clean Room Ambient. J. Electrochem. Soc., Vol. 143, No. 9, September 1996.
- [23] Y. K. Park, H. J. Kim, D. W. Kim, and J. H. Park. Environmental ozone effect on the growth of hemispherical grained silicon for ULSI DRAM stacked capacitor. Journal of the Electrochemical Society, 148 (8) F170-174, 2001.
- [24] R. R. Kunz, V. Liberman, and D. K. Downs. Photo-induced organic contamination of lithographic optics. Microlithography World. Winter 2000.
- [25] Shoko I., Makiko T., Ayako S., Soichi N., Katsuya O., Yoko S., Akira T. and Manabu T. Wafer ambient control for agile FAB. IEEE Transactions on Semiconductor Engineering, 2001.
- [26] Tsai, CJ, Huang, CH and T.-S. Shih. Design and testing of a personal porous metal denuder. Aerosol Science and Technology, Vol. 35, No. 1, pp. 611-616,

2001.

- [27] H. Habuka, S. Ishiwari, H. Kato, M. Shimada, and K. Okuyama. Airborne organic contamination behavior on silicon wafer surface. *Journal of the Electrochemical Society*, 150(2) G148-G154, 2003.
- [28] F. Sugimoto and S. Okamura. Adsorption behavior of organic contamination on a silicon wafer surface. *Journal of the Electrochemical Society*, 146(7) 2725-2729 1999.
- [29] 2003 Airborne molecular contamination guidelines for semiconductor cleanrooms and processes, Balazs analytical services.
- [30] Sarah Fister Gale. What you can't see could cost you millions. *CleanRooms*. June, 2004.
- [31] Robin Danfelt. Real-time monitors: Review and lithography applications. *Semiconductor Fabtech*, 27th Edition, 2005.
- [32] H. Habuka, K. Suzuki, S. Okamura, M. Shimada, and K. Okuyama. Quartz crystal microbalance for silicon surface organic contamination. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(4) G241-G245, 2005.
- [33] Chris Muller. Airborne Molecular Contamination Control in Semiconductorfabs: A practical Approach. *Semiconductor Fabtech*, 16th Edition, 2002.
- [34] John Mikulsky. Chemically clean air: an emerging issue in the Fab environment. *Semiconductor International*. September, 1996.
- [35] Chris Muller. Guidelines and considerations for emerging AMC control. *CleanRooms*, January, 2004.
- [36] S-C Hu and T-M Wu. Experimental Study of Airflow and Particle Characteristics of a 300-mm FOUP/LPU Minienvironment System. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. November, 2003.
- [37] Y. Kobayashi, S. Kobayashi, K. Tokunaga, K. Kato, and T. Minami. Particle characteristics of 300-mm minienvironment (FOUP and LPU). *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 13, No.3, August, 2000.
- [38] J. Frickinger, J. Bügle, G. Zielonka, L. Pfitzner, H. Ryssel, S. Hollemann, and H. Schneider. Reducing airborne molecular contamination by efficient purging of FOUPs for 300-mm wafers-the influence of materials properties. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, November, 2000.
- [39] Li, S-N, Y-Y Chen, H-Y Shih and J-L Hong. Using an extractive Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer for improving cleanroom air quality in a

semiconductor manufacturing plant. American Industrial Hygiene Association Journal, May/June, 2003.

- [40] Li, S-N, H-Y Shih, K-S Wang, K. Hsieh, Y-Y Chen, Y-Y Chen and J. Chou. Preventive maintenance measures for contamination control. Solid-State Technology, December, 2005.
- [41] Chen, S-C, C-J Tsai, S-N Li, and H-Y Shih. Dispersion of gas pollutant in a fan-filter-unit (FFU) cleanroom. *Building and Environment*, in press, 2006.
- [42] J. H. Cheng, L. W. Ting, C. L. Cheng, S. N. Li, S. I. Yen, and S. F. Chiou. Cross contamination of airborne molecules from the stack emissions between a new twelve-inch Fab and a neighboring eight-inch Fab. ISESH 12th Annual Conference Portland, June, 2005.
- [43] S. I. Yen, G. H. Leu, S. N. Li. Combining an open-path FTIR and exhaust management system to improve cleanroom air quality monitoring. ISESH 11th Annual Conference, June, 2004.

作者

- 施惠雅** 工業技術研究院能源與環境研究所 副研究員
聯絡地址：新竹縣竹東鎮中興路 4 段 195 號 51 館 11 樓 1130 室；
電話：03-5913610；E-mail address：HuiYaShih@itri.org.tw
- 李壽南** 工業技術研究院能源與環境研究所 室主任
- 顏紹儀** 工業技術研究院能源與環境研究所 研究員
- 呂建豪** 工業技術研究院能源與環境研究所 研究員