

國立交通大學  
工學院產業安全與防災學程  
碩士論文

應用化學濾網去除某晶圓廠黃光區潔淨室之氨氣

Application of chemical filters to remove ammonia in  
the clean room air of the photolithographic area of a  
wafer fab



研究生：劉興學

指導教授：蔡春進教授

中華民國九十七年二月

應用化學濾網去除某晶圓廠黃光區潔淨室之氨氣  
Application of chemical filters to remove ammonia in  
the clean room air of the photolithographic area of a  
wafer fab

研究生：劉興學 Student：Shing-Hsueh Liu

指導教授：蔡春進 Advisor：Chuen-Jinn Tsai

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

A Thesis Submitted to Degree Program of Industrial Safety and Risk

Management College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Industrial Safety and Risk Management

February 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年二月

## 摘要

隨著半導體元件之線寬微影技術的進展由10年前的 $0.5\sim 0.35\ \mu\text{m}$ 縮小至3年前的 $0.25\sim 0.1\ \mu\text{m}$ ，而現在又由於浸潤式微影製程的發明，又將線寬縮小至 $32\text{nm}$ ，使得製程環境污染的防治重點已由微粒轉移至氣態分子污染物上。業界目前解決氣態分子污染物之主要方法為加裝化學濾網，將所要去除之特定氣態分子污染物利用包覆改質活性碳之化學濾網加以吸附，達到降低生產機台環境污染物濃度的目的。

本研究於竹科某晶圓製造廠黃光區風扇過濾單元(FFU, Fan Filter Unit)上方加裝化學濾網，並長期以離子電泳分析儀(IMS, Ion Mobility Spectrometry)監測該廠黃光區氨氣濃度之變化，觀察一年以來，證實該化學濾網於原來安裝前FFU吸入端，由平均 $5.5\text{ppb}$ 降至 $1\sim 3\text{ppb}$ ，黃光區環境即FFU出氣端，則由平均 $5.5\text{ppb}$ 降至 $1\text{ppb}$ 以下，於低濃度下依然能有效降低氨氣濃度，平均去除效率可達 $80\sim 90\%$ 。也由於氨氣濃度降低得以讓晶片減少缺陷、步進機上的鏡片霧化情形降低、 $193\text{nm}$ 光罩曝光能量時間研長，大大降低晶圓製造廠之維護成本，提高晶片良率。

本研究另外針對市售化學濾網之形式、實廠安裝位置做一比較分析，另提供業界化學濾網選購、安裝注意事項及驗收標準之參考，並改變以往只由廠商提供自家實驗室測試之性能曲線數據，缺乏第三公正單位之驗證，避免發生球員兼裁判之情形發生，建立一套更公正客觀之化學濾網採購流程。

關鍵字：氣態分子污染物(AMCs, Airborne Molecular Contaminations)、化學濾網(Chemical Filter)、潔淨室(Clean Room)、離子電泳分析儀(IMS, Ion Mobility Spectrometry)



## ABSTRACT

Along with the advances of photo lithography, the line width of the semiconductor components shrunk from 0.5~0.35  $\mu\text{m}$  ten years ago to 0.25~0.1  $\mu\text{m}$  3 years ago. Now it further shrinks to 32 nm due to the invention of immersed lithography. Therefore, the focus of pollution prevention in the process environment has been shifted from particles to gaseous pollutants. The semiconductor industry removes the gaseous pollutants by using chemical filters which contain treated activated carbons to adsorb particular molecular contaminants to reduce the pollutant concentration in the process environment.

In this study, chemical filters were installed above the FFUs of the photo lithography area and the ammonia concentration had been monitored continuously by using IMS (Ion Mobility Spectrometry) for one year. It was found that the average concentration before the FFUs was reduced to 1~3ppb from the original 5.5 ppb, and it was reduced below 1 ppb after the FFUs. The filters were effective at low ammonia concentration and the removal efficiency ranged from 80~90 %. As a result, the frequency of lens haze was reduced, exposure energy and time were extended, cost of maintenance in the wafer fab was reduced, and product yield was increased.

This research also compared and analyzed the types of chemical filters and installation locations, and provided references to the industry for the selection, installation and certification of chemical filters. This hopes to setup a fair and objective procurement process for chemical filters to avoid the reliance of the manufacturers' own performance curves without the certification of third party.

Keywords : Airborne Molecular contaminants , Chemical Filter , Clean Room ,  
Ion Mobility Spectrometry

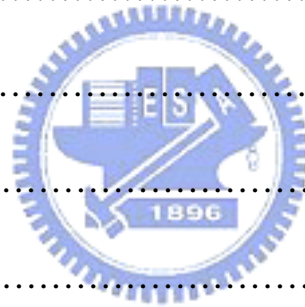
## 誌謝

學校畢業後經歷當兵及職場十餘年，從沒想過會再回到校園當在職研究生，後因工作需要及未來職場上的競爭，且在內人的鼓勵下，幸運地考上產業安全與防災研究所就讀。就學期間除獲得業界最新知識，更認識了不同產業領域的許多學長、同學，除增長專業知識及見聞外，最重要的是社會歷練中人際關係的互動與人脈提升。首先要謝謝在修課及論文撰寫期間，蔡春進老師對課業教學及論文鍥細靡遺的指導及審閱，使謬誤減至最低，讓本論文趨於完善，受益匪淺，特此致上萬分謝意。另外尚有工研院許多專家提供了許多寶貴意見，對我的論文助益很多。

本論文的完成，還要感謝任職單位同事、擴建工程部志偉、微量分析實驗室同仁及廠商的協助，他們不斷地提供了許多寶貴建議，讓本研究得以順利進行。最後，我要將本論文獻給我最愛的家人，由於你們的精神支持及鼓勵，才能順利完成論文，我願將這份成果與喜悅與你們大家分享。

# 目錄

摘要.....	ii
ABSTRACT.....	iv
誌謝.....	v
目錄.....	vi
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
中英文縮寫說明.....	xi
符號說明.....	xii
一、緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	5
二、文獻回顧.....	7
2.1 環境中微量氣態分子污染物介紹.....	7
2.2 AMCs對晶圓廠機台lens及mask haze之影響.....	9
2.3 氣態分子污染物之來源與去除方式.....	13
2.4 市售化學濾網種類.....	16
2.5 潔淨室AMCs微量分析技術.....	19
三、研究方法.....	23
3.1 化學濾網模廠測試.....	23



3.2	本研究所用之IMS(NH <sub>3</sub> 即時分析儀)分析原理說明.....	28
3.3	化學濾網實廠安裝位置說明比較.....	31
3.4	定期監測及採樣.....	35
四、	結果與討論.....	36
4.1	廠商提供之濃度推估曲線數據整理分析.....	36
4.2	工研院報告數據整理分析.....	37
4.3	實廠安裝前及安裝後定期收集之data整理分析及去除效率驗證...39	
4.4	安裝於FFU化學濾網增加運轉成本之計算方法.....	41
4.5	化學濾網ppb-hr之計算方法.....	42
4.6	LAB Impinger & IMS量測數據之差異分析.....	43
五、	結論與建議.....	45
5.1	結論.....	45
5.2	建議.....	46
六、	參考文獻.....	52



## 表目錄

1. 表1.1 Fed-Std-209E潔淨度定義[1].....	1
2. 表1.2 ISO-14644潔淨度定義[4].....	2
3. 表2.1 SEMI F-21空氣分子污染物分類標準[6].....	8
4. 表 2.2 ITRS 晶圓環境污染控制要求—近期[7].....	9
5. 表2.3 AMCs的來源[10].....	14
6. 表2.4 市售化學濾網之比較[11].....	18
7. 表2.5 常見分析儀比較表[14].....	22
8. 表3.1 AN-PF泡棉式化學濾網規格.....	23
9. 表3.2 全尺寸化學濾網測試系統規格說明表[20].....	24
10.表4.1 活性炭規.....	37
11.表4.2 工研院測試結果.....	38
12.表5.1 化學濾網基本規格.....	48
13.表5.2 Chemical Filter驗收基準表.....	50

## 圖目錄

1. 圖1.1. ISO-14644潔淨度粒徑與濃度關係圖[5].....	3
2. 圖2.1 半導體製程示意圖及各區污染物對產品之危害[8].....	10
3. 圖2.2 NH <sub>3</sub> 造成之所謂T-Top現象[9].....	10
4. 圖2.3 在光罩表面之(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 結晶污染物[9].....	11
5. 圖2.4 在光罩表面之(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 結晶污染物[9].....	11
6. 圖 2.5 鱗狀的明轉寫像[10].....	12
7. 圖2.6 因為lens霧化產生2次反射造成造成所謂的”ghost”現象[10].....	12
8. 圖2.7 Haze造成晶片報廢[10].....	13
9. 圖2.8 AMC來源[8].....	14
10. 圖2.9 碳布式之濾網成品.....	17
11. 圖2.10 傅立葉紅外線光譜儀.....	20
12. 圖2.11 衝擊瓶空氣採樣系統.....	20
13. 圖2.12 擴散式氣固相採樣器系統.....	21
14. 圖3.1 全尺寸化學濾網性能測試系統示意圖[20].....	24
15. 圖3.2 風速均勻度量測點示意圖[20].....	28
16. 圖3.3 IMS套裝分析儀.....	29
17. 圖3.4 IMS分析儀內部構造.....	30
18. 圖3.5 IMS分析儀後方內部構造.....	30

19. 圖3.6 IMS分析儀分析原理[15].....	31
20. 圖3.7 IMS分析儀Cell氣體流程圖[15].....	31
21. 圖3.8 本實驗無塵室AMC化學濾網安裝位置.....	33
22. 圖3.9 化學濾網安裝於FFU上方位置.....	33
23. 圖3.10 化學濾網安裝.....	34
24. 圖3.11 化學濾網安裝.....	34
25. 圖3.12 化學濾網安裝.....	35
26. 圖4.1 廠商提供之化學濾網.....	36
27. 圖4.2 廠商提供之穿透曲線.....	37
28. 圖4.3 工研院之測試效率曲線.....	38
29. 圖4.4 安裝化學濾網前潔淨室常態之氨氣濃度變化IMS監測曲線.....	40
30. 圖4.5 安裝化學濾網前後潔淨室常態之氨氣濃度變化Impinger採樣曲 線.....	40
31. 圖4.6 安裝化學濾網前後潔淨室常態之氨氣濃度變化IMS監測曲線....	41
32. 圖4.7 廠商提供之性能曲線.....	43
33. 圖4.8 IMS監測數據偏離可能因素.....	44

## 中英文縮寫說明

1. AMCs : Airborne Molecular Contaminations , 氣態分子污染物
2. IMS : Ion Mobility Spectrometry , 離子電泳分析儀
3. NH<sub>3</sub> : Amonia , 氨氣
4. NMP : N-methylpyrrolidone , N-甲基咯酮
5. MAU : Make-up Air Unit , 製造空氣單元
6. VOCs : Volatile Organic Compounds , 揮發性有機物
7. HEPA : High Efficiency Particulate Air Filter , 高效率微粒過濾器
8. ULPA : Ultra Low Penetration Air Filter , 超低穿透率過濾器
9. ITRS : International Technology Roadmap for Semiconductors , 國際半導體  
技術藍圖委員會
- 10.FFU : Fan Filter Unit , 風扇濾網單元
- 11.HMDS : Hexamethyl Disilazane , 六甲基二矽氮烷
- 12.CMH : Cubic Meter Per Hour , 每小時立方公尺
- 13.FAB : FABRICTAION , 晶圓製造區



## 參數符號說明

符號	說明	單位
$\eta$	氣體去除效率	%
$C_{in}$	濾網上游氣體濃度	ppm、ppb
$C_{out}$	濾網下游氣體濃度	ppm、ppb
$Q$	濾網飽和吸附容量	g
$V$	測試風量	$m^3/min$
$T$	系統內溫度	$^{\circ}C$
$M$	標準測試氣體分子量	g/mole
$t$	總測試時間	min



# 一、緒論

## 1.1 前言

半導體生產製程包含精密的微機電和積體電路，對於生產環境之潔淨度的要求特別嚴格，因此整個製造過程都在嚴格控制的環境條件下進行，也就是一般熟悉的潔淨室(clean room)。傳統上，潔淨室的潔淨度分級，乃根據美國聯邦標準第209E規定、以每立方英尺空氣中大於或等於0.5  $\mu\text{m}$ 之微粒的數目作為分級標準如表1.1所示[1]，例如class 100的潔淨度即表示每立方英尺空氣中 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的微粒數目不得大於100顆。

表1.1 Fed-Std-209E潔淨度定義[1]

Class Limits											
Class name		0.1 $\mu\text{m}$		0.2 $\mu\text{m}$		0.3 $\mu\text{m}$		0.5 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$	
		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units	
SI	English	( $\text{m}^3$ )	( $\text{ft}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{ft}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{ft}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{ft}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{ft}^3$ )
M1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	-	-
M1.5	1	1,240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	-	-
M2		3,500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	-	-
M2.5	10	12,400	350	2,650	75.0	1,060	30.0	353	10.0	-	-
M3		35,000	991	7,570	214	3,090	87.5	1,000	28.3	-	-
M3.5	100	-	-	26,500	750	10,600	300	3,530	100	-	-
M4		-	-	75,700	2,140	30,900	875	10,000	283	-	-
M4.5	1000	-	-	-	-	-	-	35,300	1,000	247	7.00
M5		-	-	-	-	-	-	100,000	2,830	618	17.5
M5.5	10000	-	-	-	-	-	-	353,000	10,000	2,470	70.0
M6		-	-	-	-	-	-	1,000,000	28,300	6,180	175
M6.5	100000	-	-	-	-	-	-	3,530,000	100,000	24,700	700
M7		-	-	-	-	-	-	10,000,000	283,000	61,800	1,750

ISO 對潔淨室等級劃分，限於微粒的直徑在 0.1 $\mu\text{m}$  到 5 $\mu\text{m}$ ，在此範圍之外就不列入等級表。ISO 等級本身歸類 ISO Class 1 到 ISO Class 9，其允

許上限的定義是大於等於該粒徑的微粒數，數目字如表 1.2 所示[4]，單位是每立方公尺的微粒數。將 ISO Class 1 到 ISO Class 9 各粒徑與濃度逐一標示出來，如圖 1.1. ISO-14644 潔淨度粒徑與濃度關係圖[5]，呈現一負斜率之線性關係圖，同一 ISO Class 下，粒徑越大則濃度越低，反之粒徑越小則濃度越高。

表 1.2 ISO-14644 潔淨度定義[4]

Maximum concentration limits (particles/m <sup>3</sup> of air) particles equal to and larger than the considered sizes shown below						
Classification Numbers(N)	0.1 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$	0.3 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	5.0 $\mu\text{m}$
ISO Class1	10	2	-	-	-	-
ISO Class2	100	24	10	4	-	-
ISO Class3	1,000	237	102	35	8	-
ISO Class4	10,000	2,370	1,020	352	83	-
ISO Class5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO Class6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO Class7	-	-	-	352,000	83,200	2,930
ISO Class8	-	-	-	3,520,000	832,000	29,300
ISO Class9	-	-	-	35,200,000	8,320,000	293,000

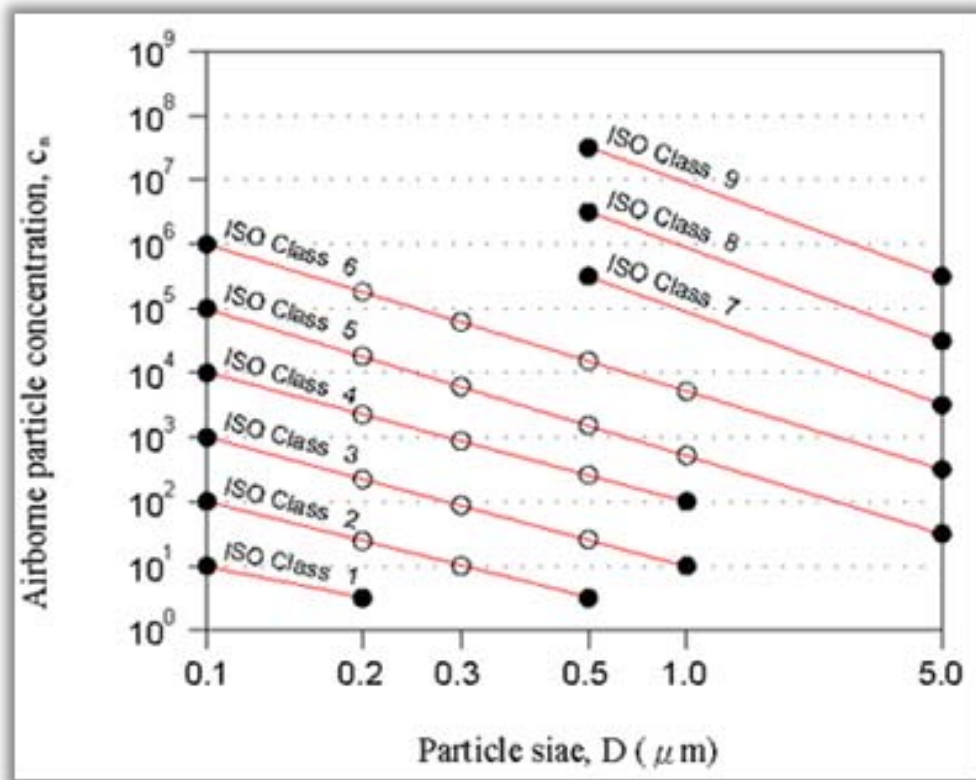


圖 1.1. ISO-14644 潔淨度粒徑與濃度關係圖[5]

然而隨著製程特徵尺寸(feature size)的快速縮小，傳統的潔淨度分級已無法滿足生產製程對環境空氣品質標準的嚴格要求。隨著半導體元件之線寬微影技術的進展由10年前的0.5~0.35  $\mu\text{m}$ 縮小至3年前的0.25~0.1  $\mu\text{m}$ ，而現在又由於浸潤式微影製程的發明，又將線寬縮小至32nm，使得製程環境污染的防治重點已由微粒轉移至氣態分子污染物(AMCs, Airborne Molecular Contaminations)上。

針對AMCs與Particle的污染，Muller et al [2]於1994年的研究指出，在Class 100的潔淨室內總有機氣態污染物濃度約 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，粒狀污染物濃度則為 $20 \text{ng}/\text{m}^3$ ，兩者的濃度相差了5000倍以上，所以氣態分子污染物沉積於晶圓表面之質量沉積可能為微粒的數萬倍以上。AMCs的污染濃度與目前之潔淨室



等級並無直接的關係，Kitajima and Shiramizu於1997年指出Class 1無塵室內的有機氣態污染物之濃度可能比Class 10還大[3]。因此，如何解決AMCs污染半導體製程的問題，是十分重要的課題。

傳統上，高效率微粒過濾器(HEPA, High Efficiency Particulate Air Filter)和超低穿透率過濾器(ULPA, Ultra Low Penetration Air Filter)是半導體製程中賴以控制微粒污染的技術，但隨著製程特徵尺寸的縮小，越來越多的研究發現，潔淨室空氣中存在的AMCs，將會對不同製程產生不良的影響，嚴重時可能對產品造成致命的缺陷(killer defects)而影響良率。

既有之 8 吋晶圓廠普遍上均採用 248nm 製程，因製程上對氨氣( $\text{NH}_3$ , Ammonia)及 N-甲基咯酮(NMP, N-methylpyrrolidone)等氣體較為敏感，易在晶圓上形成 T-Top 現象。而目前先進的 12 吋晶圓廠更因製程上的進步而朝向 193 及 157nm 的製程邁進，除了對機台內  $\text{NH}_3$  及 NMP 氣體依舊需要注意外，越來越多的報告指出除了鹼性  $\text{NH}_3$  氣體外，揮發性有機氣體及酸性氣體( $\text{SO}_2/\text{NO}_2$ )的污染更是未來機台需要注意防範的。原因是由於 193nm 製程係採用氬氟(ArF)雷射以及未來的 157nm 製程上採用氟分子( $\text{F}_2$ )雷射，而在此波段上的光波頻率極易被微量的揮發性碳氫化合物所吸收，因此會造成當雷射光束穿越光徑時強度的減少。另外由於  $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_2$  會因臭氧的強大氧化力變成硫酸鹽或是硝酸鹽類而沉積於步進/掃瞄機(Stepper/Scanner)的鏡片(Lens)表面，因而造成 Lens 霧化(Haze)。 $\text{NH}_3$  亦會與  $\text{SO}_2$  等酸性氣體

產生化學反應造成光罩(Mask)及 Lens Haze。當這種狀況發生時，現今的解決辦法是將光學系統由步進/掃瞄機中取出清潔後再放回。但因光學系統是相當脆弱的，常常會因清理時不小心光學系統破損而造成燈管及停機等重大的損失，停機的晶片移動次數(wafer move)損失更是難以計算。另外黃光區光阻液對於  $\text{NH}_3$  特別敏感，造成化學放大效應(Chemical Amplifier Resist)，使的晶片線路缺陷，晶片關鍵尺寸(CD, critical dimension)線徑寬度不對，深紫外光(DUV, Deep Ultra-Violet)機台光學鏡片霧化，曝光在晶片上圖形錯誤等問題。因而量測並控制機台內部的微量揮發性有機氣體、酸性氣體及鹼性氣體，為新一代製程的重要工作。由於以往在 248 及 365nm 製程上並未發生上數這些問題，但現已經有多家國內外 193nm 製程的 FAB 證實此一問題的嚴重性，亟需加以克服。

## 1.2 研究目的

現今市面上生產販售化學濾網廠商眾多，但各家廠商所提供之相關產品型錄資料卻未臻完善，如測試條件(測試濃度、風量等)未統一、測試方法不相同，甚至部分廠商更無法提供完整之性能曲線報告供業主審核評估，追根究底其最主要原因係目前市面上並無一套完善合理之測試方法可供業界選用濾網時參考。且每片化學濾網售價由台幣一萬元至數萬元不等，而各公司每年使用化學濾網之總數量更超過數千甚而數萬片，若能同時兼顧化學濾網價格及品質需求，更可為業界在符合品質條件下節省一筆為數龐

大之開銷。本研究係利用化學濾網降低潔淨室黃光區氨氣之濃度，期能有效改善光罩(reticle)於193nm波長下之使用時間，減少步進機的lens及Mask Haze之產生，以降低生產成本；並建立一套化學濾網選用、測試之機制，驗證商用化學濾網於實廠低AMCs濃度下之去除效率，以實廠之經驗提供業界選用化學濾網時之參考，並可確保潔淨室環境及機台內AMCs含量能有效控制及管理。本論文同時分析比較化學濾網在不同壓損條件下之運轉成本，以利將來選購新品時，能同時兼顧化學濾網使用時間及實際運轉成本，進而提供業界於評估化學濾網時成本與效率最適化之選擇。



## 二、文獻回顧

### 2.1環境中微量氣態分子污染物(AMCs, Airborne Molecular Contaminants)

#### 介紹

國際半導體設備暨材料協會(SEMI, Semiconductor Equipment and Materials International,)對於無塵室空氣品質建議了SEMI F21-95、SEMI F21-1102標準6,7，將AMCs分為四類，包括：

(一)酸(Acids, Class MA):腐蝕性物質，在化學反應中為電子接受者，例如蝕刻區常用的氫氟酸、鹽酸、硝酸與硫酸，外氣所進入的二氧化硫等。

(二)鹼(Bases, Class MB):腐蝕性物質，在化學反應中為電子提供者，主要來源為氨氣、氨水、製造過程所用的除水劑與清潔劑，也包括人員所呼出的氨氣。

(三)可凝結性有機污染物(Condensables, Class MC):通常是指沸點大於150°C的有機污染物，容易凝結在物體表面的有機物，包括碳氫化物、矽氧化物、全氟高分子有機物與可塑劑等分子量大於250以上的成分。

(四)重金屬(Dopants, Class MD):能夠改變改變半導體材料的導電特性的化學元素，近年的研究發現，在氫氟酸的存在或是高濕度下，會使HEPA/ULPA過濾材料所產生的硼濃度增加，各種重金屬也會經由外氣進入。

目前製程的線距要求越來越低的狀況下，對於空氣中的氣態分子污染物的評估與控制，更形重要。

國際半導體設備暨材料協會(SEMI)針對不同等級之無塵室亦訂定其污染物容許標準如表2.1所示[6]，舉例來說MA-10的意思，就是在酸性物質的項目中，酸性物質的總濃度小於10pptm。

國際半導體技術藍圖委員會(ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors)對於製程演進與晶圓生產環境，提出更具體的規範，如表2.2所示[7]，除了對於臨界微粒之大小及數目愈訂愈嚴格外，對於AMCs之濃度也要求很低之濃度，如2007年黃光區之NH<sub>3</sub>濃度需控制在0.75ppb以下。表2.2中的AMCs之濃度單位為兆分之一(pptm, parts per trillion molar)，也就是 $1 \times 10^{-12}$ 。

表2.1 SEMI F-21 空氣分子污染物分類標準[6]

物質分類	分級				
	1*	10*	100*	1000*	10000*
酸(Acids)	MA-1	MA-10	MA-100	MA-1000	MA-10000
鹼(Bases)	MB-1	MB-10	MB-100	MB-1000	MB-10000
凝結性物質(Condensables)	MC-1	MC-10	MC-100	MC-1000	MC-10000
摻雜劑(Dopants)	MD-1	MD-10	MD-100	MD-1000	MD-10000

表 2.2 ITRS 晶圓環境污染控制要求—近期[7]

Year of Production	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Technology Node		hp90			hp65		
DRAM ½ Pitch (nm)	100	90	80	70	65	57	50
MPU/ASIC ½ Pitch (nm)	107	90	80	70	65	57	50
MPU Printed Gate Length (nm)	65	53	45	40	35	32	28
MPU Physical Gate Length (nm)	45	37	32	28	25	22	20
<i>Wafer Environment Control in gas phase (pptM)</i>							
Critical particle size (nm)	50	45	40	35	33	29	25
Number of particles > critical size (/m)	ISO CL 2	ISO CL 2	ISO CL 2	ISO CL 2	ISO CL 2	ISO CL 2	ISO CL 2
<i>Airborne Molecular Contaminants (pptM)</i>							
Lithography-bases (as amine, amide, or NH <sub>3</sub> )	750	750	750	< 750	< 750	< 750	< 750
<i>Airborne Molecular Contaminants, Surface Deposition Limits (for Si Witness Wafer, 24-hour Exposure to Closed FOUP, Pod, Mini-environment or Air)</i>							
Gate-metals (as Cu, E=2×10 <sup>-5</sup> )	0.15	0.10	0.10	0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
Gate-organics (as molecular weight greater than or equal to 250, E=1×10 <sup>-3</sup> )	80	70	60	60	50	50	50
Organics (molecular weight to C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> ) normalized to hexadecane (C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> ) equivalent	5000	4500	4000	3500	3000	3000	< 2500
Salicidation contact-acids (as Cl-, E=1(10 <sup>-5</sup> ))	10	10	10	< 10	< 10	< 10	< 10
Salicidation contact-bases (as NH <sub>3</sub> , E=1(10 <sup>-6</sup> ))	12	10	8	4	< 4	< 4	< 4
Dopants (P, B, As, Sb)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
SMC organics on wafers, ASTM 1982-99, ng/cm <sup>2</sup>	4	2	2	2	2	2	2
Front-end processes, bare Si, total dopants added to 24-hour witness wafer, atoms/cm <sup>2</sup>	< 2E12	< 2E12	< 2E12	1.E+12	1.E+12	1.E+12	1.E+12
Front-end processes, bre Si, total metals added to witness wafer, atoms/cm <sup>2</sup>	< 2E10	< 2E10	< 2E10	< 2E10	< 2E10	< 2E10	< 1E10

## 2.2 AMCs對晶圓廠機台lens及mask haze之影響

半導體製程各區污染物皆不同，對產品的危害亦有所差異，如圖2.1所示[8]，化學機械研磨區(CMP, Chemical Mechanical Polishing)有晶背腐蝕等危害，黃光區(LT, Lithography)有光學鏡片霧化等危害。MB中的NH<sub>3</sub>會造成『T-topping』現象如圖2.2[9]，在0.15~0.2μm製程暴露於1.0ppb及0.1ppb之NH<sub>3</sub>污染環境30分鐘結果，另NH<sub>3</sub>與SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>化學反應結合後則會在光罩表面產生(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>結晶污染物如圖2.3、2.4[9]，”鱗狀的明轉寫像”如圖2.5[10]，則

造成mask提前報廢，此外因為lens霧化產生2次反射造成造成所謂的”ghost”現象如圖2.6[10]，造成產品良率降低，甚而晶片報廢如圖2.7[10]而由於lens及mask更換需增加鉅額之運轉成本，因此如何延長其壽命，對競爭愈烈、毛利日益降低的晶圓廠就非常地重要。

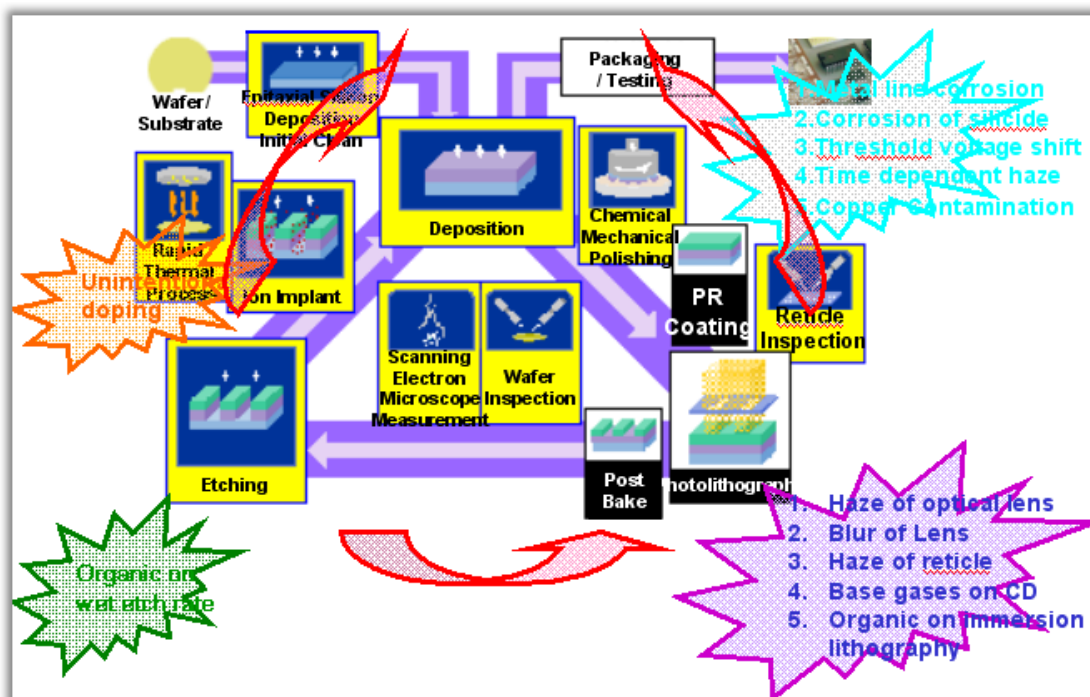


圖2.1 半導體製程示意圖及各區污染物對產品之危害[8]

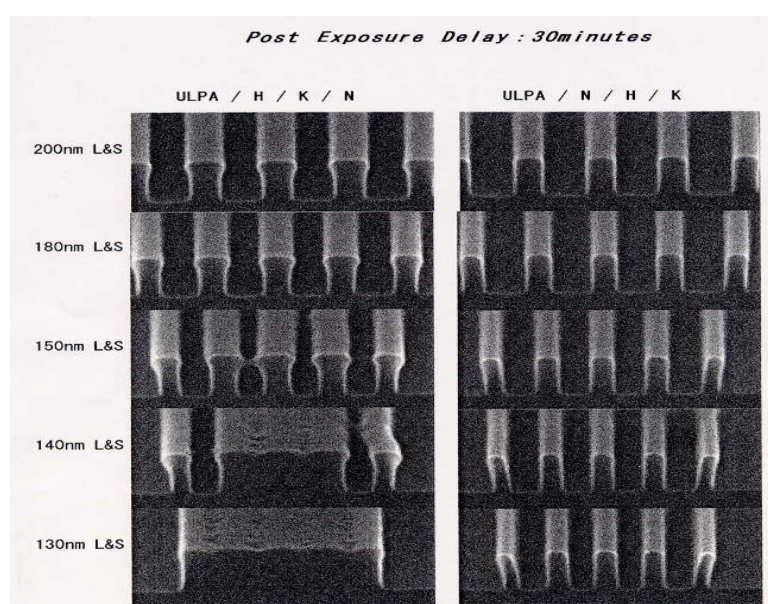


圖2.2 在0.15~0.2 $\mu$ m製程暴露於1.0ppb(圖左)及0.1ppb(圖右)之NH<sub>3</sub>污染環境30

分鐘結果[9]

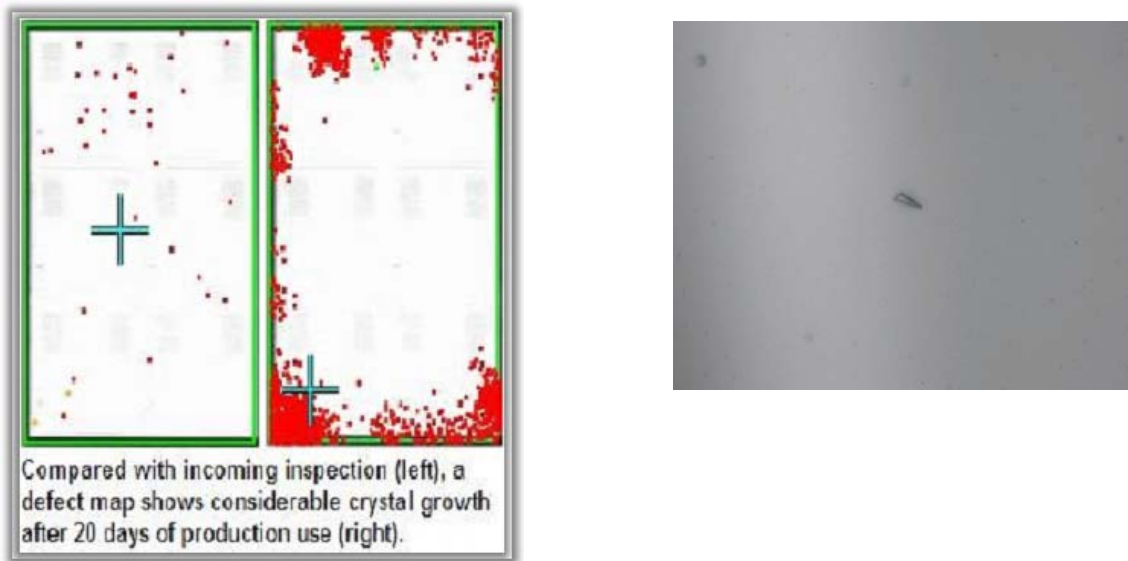


圖2.3 在光罩表面之 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 結晶污染物[9]

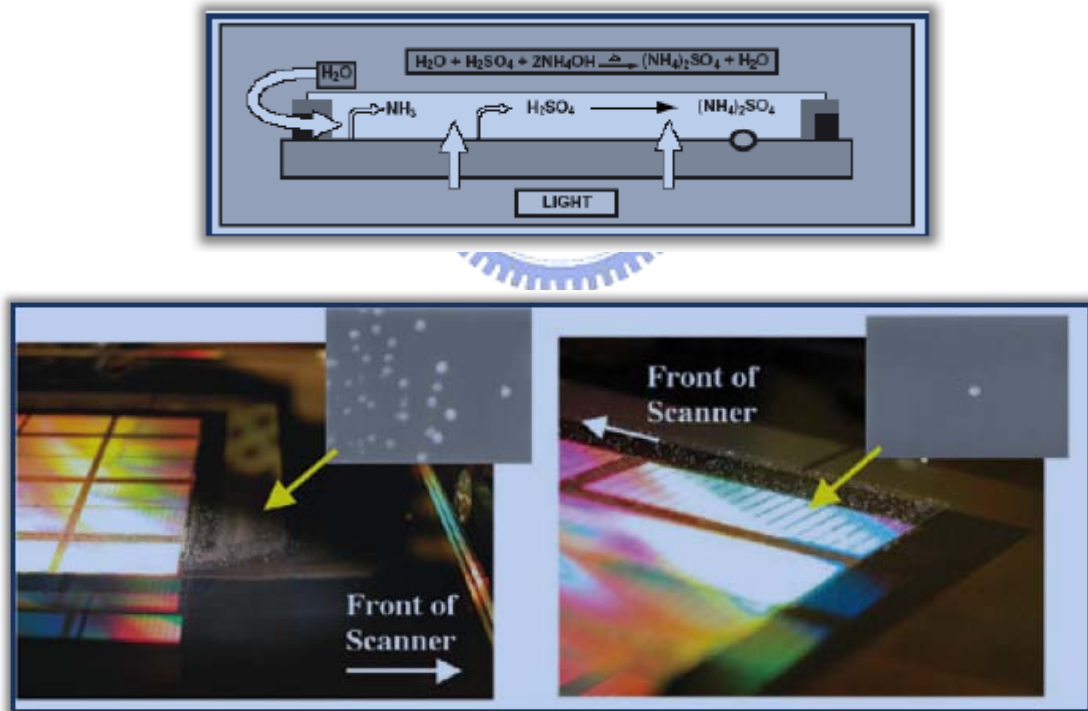


圖2.4 在光罩表面之 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 結晶污染物[9]



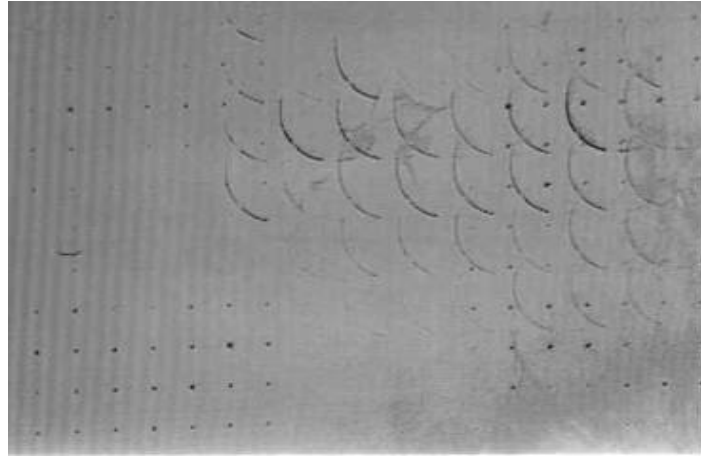


圖 2.5 鱗狀的明轉寫像

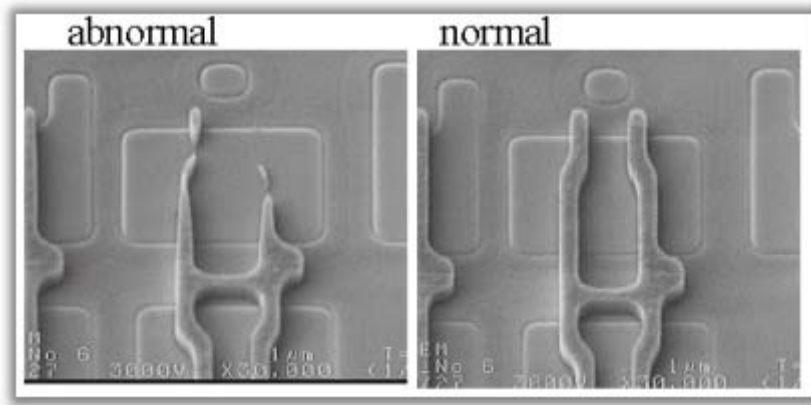


圖 2.6 因為 lens 霧化產生 2 次反射造成造成所謂的”ghost”現象

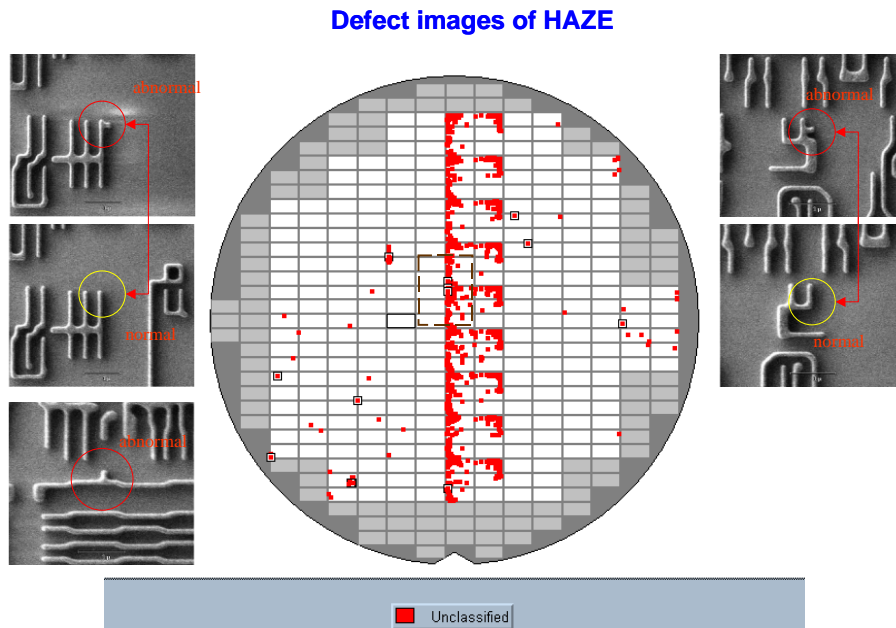


圖 2.7 Haze 造成晶片報廢

## 2.3 氣態分子污染物之來源與去除方式

設置化學濾網前需先進行相關AMCs環境背景調查，以確定AMCs種類、來源及背景濃度，進而決定需設置何種型式之化學濾網。

### 2-3-1 AMCs的來源

如表2.3及圖2.8所示[11]，AMCs的來源可分成：

A.潔淨室外部：如車輛排放、農業活動或鄰近工廠排放廢氣等；外部產生之AMCs其去除方式主要藉由製造空氣單元(MAU, Make-up Air Unit)、空氣水洗(Air Washer)洗滌或設置化學濾網去除之。

B.潔淨室內部：如製程反應逸散、設備材料本身揮發產生等；內部產生之AMCs其去除方式主要藉由機台內設置化學濾網為之。

表2.3 AMC的來源[8]

class	Source location	Source type	Example
Acids	outside fab	traffic, building heating, agriculture	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>
	inside fab	chemical baths	HCl, HF
Bases	outside fab	agriculture	NH <sub>3</sub>
	inside fab	chemical baths	NMP
Condensables	outside fab	traffic	hydrocarbons
	inside fab	plastic additives	DOP, BHT, siloxanes
Dopants	inside fab	plastic additives HEPA filters	P, B

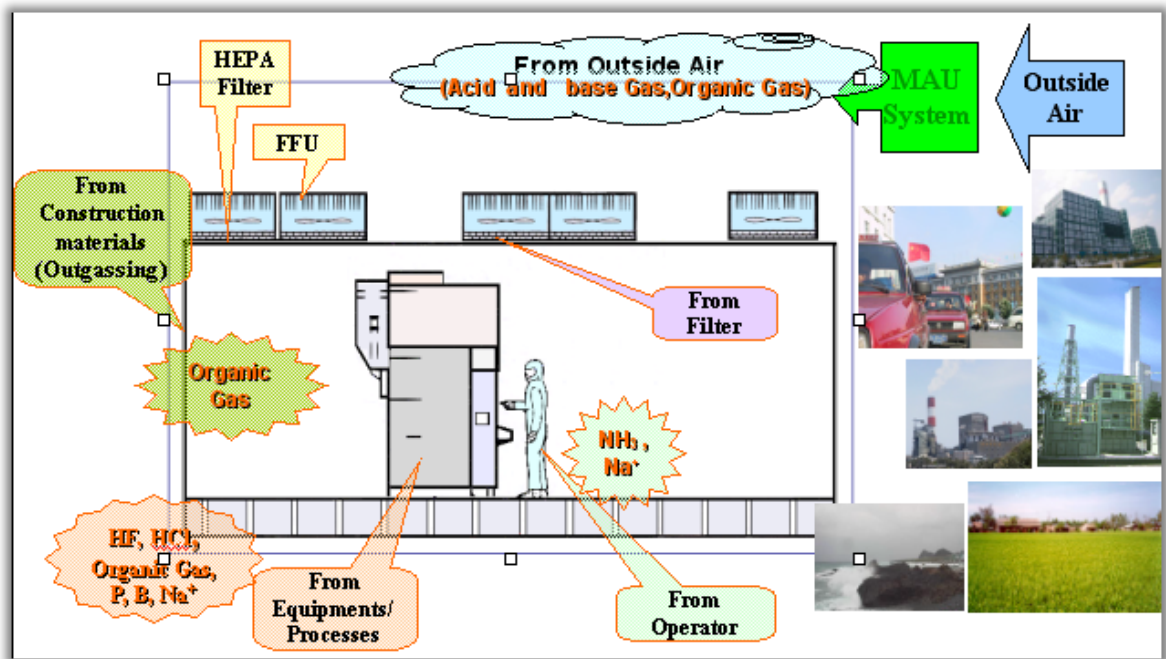


圖2.8 AMC來源[8]

### 2-3-2 AMC背景濃度：

確定相關區域之AMCs背景濃度後，才能決定 AMC之處理方式。以下為不同區域之背景濃度取得方式，一般在評估時取數據較高者並乘以一安全係數(1.5~2)計算，但瞬間異常濃度尖端值須扣除。

A. 外氣環境背景濃度：

- a. 實際量測外氣變化所得之AMCs濃度。
- b. 參酌歷年實驗室對外氣環境AMCs採樣分析數據。

B. Air Washer處理後背景濃度：

- a. 實際量測Air Washer後方之AMCs濃度。

C. 潔淨室環境背景濃度：

- a. 實際量測潔淨室環境之AMCs濃度。

目前各廠區潔淨室內主要影響製程且已訂定了濃度規範之AMCs為氨(NH<sub>3</sub>)及總硫(TS, Total sulfide)二種。本規範內容如下：



a. MAU：

- (1).當Air Washer處理後背景濃度 > 潔淨室環境之濃度規範時，MAU本體內需設置化學濾網。
- (2).當Air Washer處理後背景濃度 < 潔淨室環境之濃度規範時，不需設置化學濾網，藉由Air Washer洗滌即可符合規範。

b. 機台/晶片傳送機(Stock)內：

- (1).當潔淨室環境背景濃度 > 機台/Stock內之濃度規範時，機台/Stock內需設置化學濾網。

c. 其他類AMCs：

a.MAU：預留化學濾網空間以利將來安裝。

b.機台/Stock內：由設備(EQ, Equipment)提出相關需求，廠務(FE, Facility Engineer)協助評估相關化學濾網請購、安裝及驗收作業。

## 2.4市售化學濾網種類

就濾材(Media)形式而言，化學濾網主要分成下列幾種形式，如表2.4所示：

A.填充式：將活性炭或活性氧化鋁等吸附材，填充於蜂槽狀結構內，或填充於多孔通氣之金屬包覆網內，將較大顆粒狀吸附劑填入或壓鑄在1~3吋厚之濾網框架中，讓氣流直接貫穿填充床，上下再以不織布包覆以避免吸附劑粉塵被吹出，再製成V型或圓筒狀結構，增加其接觸空氣面積。本濾材的特點為濾材含量高，但由於其過濾顆粒為較大型顆粒約3~10 mm，(小顆粒會造成自金屬網之孔洞內掉出)，故其單位重量吸附之表面積較小顆粒之濾材小許多，吸附能力之表現有低於部分濾材含量較低之產品主要適用於環境濃度較高或要求容量較大之場合。

B.摺型碳布式：將碳布式濾網打摺以降低穿過化學濾網氣流之風速，摺數愈密或愈多則通過濾材之表面積及容量愈高。一般而言其壓損較低，適用於環境濃度較低或低風速型之場合。碳布式之結構為將一層厚約2mm之緊密活性炭層，兩側以不織布包覆，形成一厚約2mm之濾材層，再以打折之

方式增加其接觸面積，因受限於透氣性之考量，活性碳層有其厚度限制，過厚將造成壓損增加，浪費電力。碳布式之濾網參照圖 2.9。



圖2.9 碳布式之濾網成品

C.植入式：將粒徑較小吸附劑植入多孔性發泡材中，以降低壓損且藉由不規則孔隙讓氣流通過時增加與吸附劑接觸之機會。

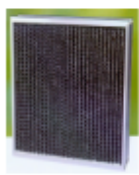
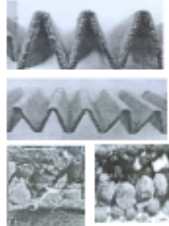


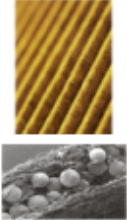

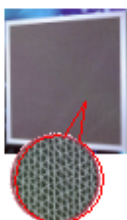
D.蜂巢式：將紙狀濾材製作成六角蜂巢狀，氣流可通過濾材孔隙，其目的係藉由蜂巢結構降低壓損並增加接觸表面積。

E.離子交換式：將陰陽離子交換樹脂充填入多孔性發泡材中，以降低壓損且藉由不規則孔隙讓氣流通過時增加與吸附劑接觸之機會，以離子交換方式將污染物質反應，此化學反應方式不適用於有機揮發物質(VOCs, Volatile Organic Compounds)，對無機之化學污染源有效，並且針對性較強，因空氣中之污染組成具一定之複雜性，有時必須輔以活性碳濾材組成其濾材層。此外離子交換之吸附方式需要較長反應時間，在風速較高之環境下使用(1.5 m/s以上)，其效果顯著下降。此種形式之濾材售價高，但壽命最長，缺點為去除之氣體針對性較強。

F. 泡棉式：藉著開放式泡沫性塑料有著連續不斷的氣孔將活性優良的活性碳固定其中，這種獨特的結構確保無污染的氣體能不受阻擋的通過濾材，相反的它的厚度有效的增加 AMC 與吸附物之間的接觸機會，這是決定 AMC FILTER 有良好吸附能力的主要原因。

目前半導體業者為節省成本，幾乎使用摺型碳布式活性碳當作吸附材，然其容易受有機性氣體影響，而降低其使用壽命，業界普遍使用於 MAU 入口及潔淨室內廠務端系統。而離子交換式則常見於設備機台空氣入口端，隨機台設備一起購買，日後更換之單價高，但相對壽命亦較長。

表2.4 市售化學濾網之比較[11]

Air Contact Style	Break through						Pass through
Main Matrix Material	Carbon			Carbon / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ion Exchange		Zeolite/Ion Exchange
Type	Slurry Coated	Micro-granular Loaded	PU foam Type	Tray Type	Micro-granular Loaded	PU foam Type	Honeycomb
Figure							
Particle Shedding	Low	Few	Few	Very High	Few		Few
Absorption Performance	Low	High	High	Moderate	High		High
Applications	Not recommended for cleanroom inside	Applied at upstream of ULPA/HEPA filter in cleanroom Micro-granular also could be applied to MAU		1. Nominal used in MAU 2. At least downstream bay filter is recommended	Applied at upstream of ULPA/HEPA filter in cleanroom		

化學濾網選用評估原則：一般而言，化學濾網之選用評估原則主要包括以下A~G項目。

- A. 合適性：針對所要濾除之AMCs選用適當吸附劑材料。
- B. 壽命長：以使用壽命(總吸附重量)長之化學濾網為優先考量。
- C. 效率高：選擇高起始去除效率之化學濾網。
- D. 低壓損：選擇低壓損型化學濾網以降低運轉成本。
- E. 產塵低：選擇產塵量低之化學濾網以避免影響HEPA Filter壽命。
- F. 其它：考慮便於安裝、材質輕、低釋氣性(Low Outgassing)及價格等問題。
- G. 化學濾網性能指標：愈低者越佳。

化學濾網性能指標=(每片單價+每年運轉成本)/ppb-hr(第三公正單位測試之報告為準)。



## 2.5 潔淨室AMCs微量分析技術

目前常用的無塵室微量分析技術有非常多種，有即時連續監測法及瞬間或平均濃度採樣法，概述如下：

- (一)有機物:不銹鋼桶(Canister)、傅立葉紅外線光譜儀(FTIR)如圖2.10。
- (二)無機物:衝擊瓶(Impinger)如圖2.11、擴散式氣固相採樣器(Denuder)如圖2.12、離子電泳分析儀(IMS, Ion Mobility Spectrometry)、化學螢光法(Chemiluminescence)。





圖2.10 傅立葉紅外線光譜儀

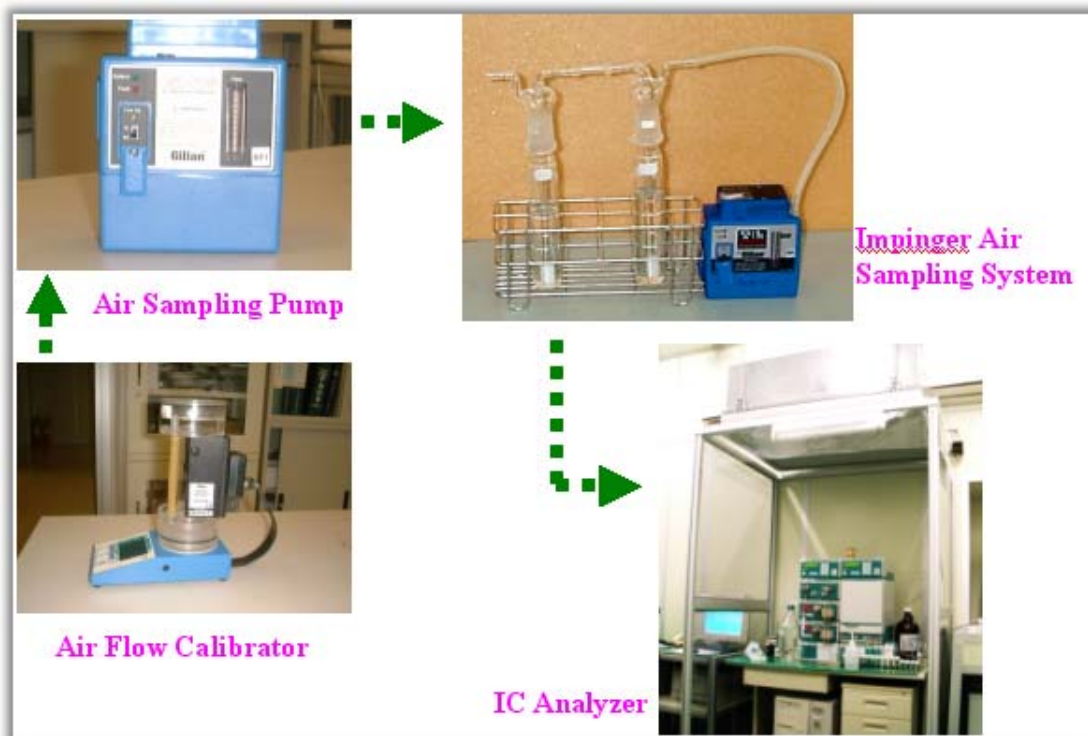


圖 2.11 衝擊瓶空氣採樣系統

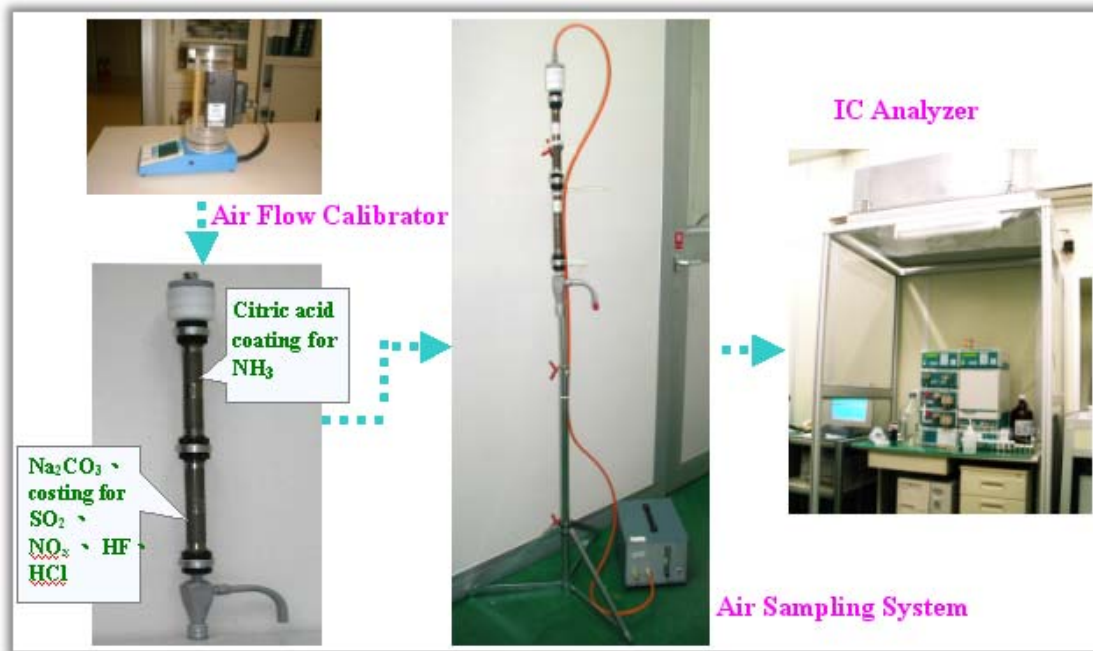


圖 2.12 擴散式氣固相採樣器系統

(三)實驗室之分析方法有：

無機酸鹼：離子層析(IC, Ion Chromatography)。

有機物：GC-MS、TD-GC/MS、FID、PID。

茲將現今業界三種常見之鹼性污染物即時監測技術(偵測極限、偵測範圍、分析時間等項目)做一比較，如表2.5所示。其中以IC檢測解析度最高，但因維護操作成本較高，一般皆於實驗室採用較多。目前半導體廠常用之儀器為離子電泳分析儀(IMS)，因其具有操作簡單，維護成本低，校正週期長，分析時間短(1分鐘)，可線上校正不需停機，連續即時監測等優點，本次研究採用之分析儀即是採用IMS。

表 2.5 常見分析儀比較表[14]

常見 AMCs 氣體分析比較表			
原理	離子電泳分析儀 (IMS, Ion Mobility Spectrometry)	離子層析(IC, Ion Chromatography)	化學螢光法 (Chemiluminescence)
檢測項目	可分別檢測 NH <sub>3</sub> 、NMP、Total Amines、SO <sub>2</sub> 、HCl、HF、HBr、Cl <sub>2</sub> 、F <sub>2</sub> 、Total Acid...等氣體	可分別檢測 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、硫酸根離子、氯離子...等	僅能測定總鹼性氣體(無法分別定性測定)
檢測範圍	0.1-100.0ppbv	根據採樣時間可由 ppb-ppm	0.3-100.0ppbv
檢測極限	0.1ppbv	Depend On Detector	0.3ppbv
樣品濃縮	無	有(利用增加採樣時間,增加採樣濃度)	無
分析時間	1 分鐘	10-30 分鐘	3-5 分鐘
檢測器壽命	10 年	3-5 年	2-3 年
校正週期	6 個月	8-12 小時	7 天
解析度	0.1ppbv	0.01ppbv	0.1ppbv
精準度	佳	最佳	普通
線上校正系統	有	有	無
廢液排放	無	有	無
現場需求	1.電源 2.PN <sub>2</sub> or CDA(-40 °C Dew Point)	1.電源 2.廢液排放孔	1.電源 2.PO <sub>2</sub> or CDA
操作程度	簡易,不需化工/化學背景	需具備較佳化學背景人員操作,並做圖譜判斷	簡易,不需化工/化學背景
後續維護成本	低	高	中高
日常維護	無,約 3-6 個月校正檢查一次即可	需隨時注意下列事項 1.沖提液之添加及更換 2.載流液之添加及更換 3.校正液之添加及更換 4.吸收液之添加及更換 5.層析管柱之更換	1.每週需校正一次 2.需注意高溫觸媒是否失效 3.需注意臭氧產生器是否故障

### 三、研究方法

#### 3.1 化學濾網模廠測試

本研究所用的化學濾網為國內廠商正麗科技提供之AN-PF泡棉式化學濾網，規格如表3.1，其AMCs的去除效率及飽和吸附量在一個化學濾網測試系統測試完成。

表3.1 AN-PF泡棉式化學濾網規格

型式	尺寸 (inch)	實際尺寸(mm)	壓損 pa (風速 m/s)						活性炭 & 總濾材重	總重量
			0.8	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5		
AN-PF 不織布包覆	24 x 24 x 12	610 x 610 x 292	24	37	53	77	120	180	13kg	26kg

此系統為工研院AMCs化學濾網實驗室所設置，它參考JIS B 9901(Gas-removal-Method of test performance of gas-removal filters)[12]、ISO/TS-11155-2[13]與NT VVS 109[14]等測試系統設計規範，建立國內首座全尺寸化學濾網性能測試系統(Full-Scale Gas Filter Testing Facility)，如圖3.1所示。此系統包含供應送風之空調系統、標準氣體配置系統、濾網測試段、風量控制系統與尾氣處理系統等。

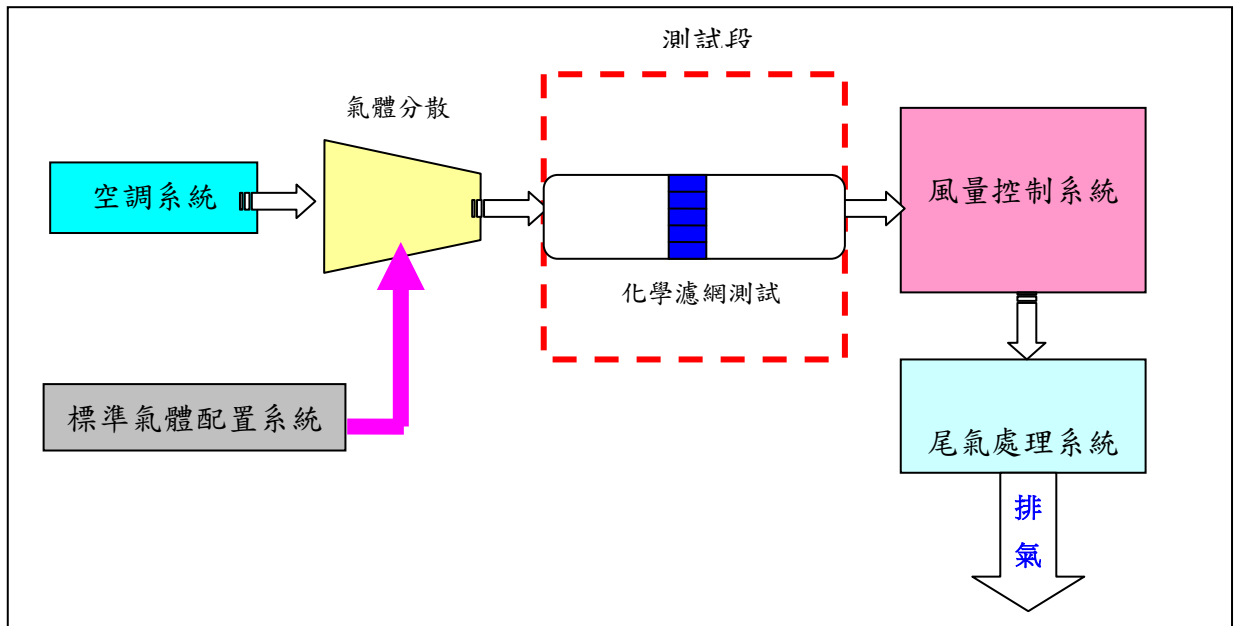


圖3.1全尺寸化學濾網性能測試系統示意圖[20]

為模擬無塵室內之環境溫濕度，此系統之空調箱內有冷卻盤管、加濕器、電熱器等設備，配合不同風量下進行即時之溫濕度回饋控制，使系統之溫濕度更趨穩定。

此外空調箱內亦裝設有初級、袋式、HEPA與ULPA濾網來濾除氣流中之微粒，並以化學濾網濾除氣流中之酸性、鹼性、有機性不純物質，以避免於低濃度性能測試時受背景污染物濃度干擾，提供ppb濃度等級之測試應用。

此系統測試規格與測試件規格如表3.2所示。

表3.2 全尺寸化學濾網測試系統規格說明表[20]

測試條件	測試系統規格
溫度範圍	10~35°C

濕度範圍	50~95%
風量範圍	面風速 0.3~2.5m/sec
測試物種	甲苯、DEP、NH <sub>3</sub> 、H <sub>2</sub> S
標準氣體濃度 控制範圍	甲苯：10ppb~20ppm
	DEP：100~500μgm <sup>-3</sup>
	NH <sub>3</sub> ：10ppb~20ppm
	H <sub>2</sub> S：10ppb~20ppm
潔淨度	供氣端含 ULPA/Chemical filter
供風粉塵濃度	<1#ft <sup>3</sup> 以下(0.3μm 以上)
可測試之化學濾網尺寸規格	
含外框長	592~610(mm)
含外框寬	592~610(mm)
含外框深	30~300(mm)

此測試系統可測試項目包含(1)不同濃度下初始去除效率測試、(2)飽和吸附容量測試、(3)壓損測試、(4)發塵量測試、(5)濾材釋氣測試、(6)濾網後端風速分佈測試等，概述如下：

(1)初始去除效率測試

先行將標準氣體濃度配製至穩定狀態，再切換至測試系統中，氣體濃度經測試後，約30分鐘後達穩定約±3%，藉由上、下游氣體濃度的同步量測，

將可獲得該時間下濾網之去除效率，去除效率高愈者，下游出口濃度值將愈低，其表示濾網潔淨能力愈強。去除效率的計算公式如下所示：

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

其中  $\eta$  為氣體去除效率(%)、 $C_{in}$ 為濾網上游氣體濃度(ppm、ppb)、 $C_{out}$ 為濾網下游氣體濃度(ppm、ppb)。

## (2)飽和吸附容量測試

在完成初始效率測試後，為了縮短測試時間，通常進行所謂的加速試驗，測試時使用較高之入口濃度，以加速完成飽和吸附容量之推估。藉由長時間連續監測濾網之去除效率所獲得吸附效率曲線圖計算，即可推估出濾網之飽和吸附容量值。通常濾網去除效率會隨著時間的增加而慢慢降低，而濾網飽和吸附容量大小，通常可代表濾網之壽命的長短，間接代表濾網之經濟效益。

飽和吸附容量計算如下：

$$Q = C_{in} \times V \times \frac{1}{0.082} \times \frac{1}{(273 + T)} \times M \int \eta(t) dt \times 10^{-3}$$

其中Q為濾網飽和吸附容量(g)、 $C_{in}$ 為濾網上游氣體濃度(ppm、ppb)、V為測試風量( $m^3/min$ )、T為系統內溫度( $^{\circ}C$ )、M為標準測試氣體分子量(g/mole)、 $\eta$ 為氣體去除效率(%)、t為總測試時間(min)，去除效率降低達80%為測試終點，或由業主視需求另行訂定之。

## (3)壓損測試

壓損測試將設定在與初始效率測試下之風量進行，藉由濾網前後靜壓差，即可獲得濾網之壓損值，阻抗的大小將影響風車之耗能，愈大者表示系統運轉電力負載愈大。

#### (4)發塵量測試

利用微量計數器(PMS,尚偉,新竹,台灣)，量測濾網前後粉塵含量(粒徑 > 0.3  $\mu\text{m}$ )，單位以 $\#\text{ft}^3$ 表示。此系統於濾網上游端之粉塵含量小於 $1\#\text{ft}^3$ ，因此下游端所量測之結果即代表測試濾網之發塵量。

#### (5)濾材釋氣測試

因此系統可提供一超潔淨氣體，因此在無標準氣體釋放之下，藉由濾網上、下游系統內之氣體成分與濃度之採樣與分析結果比對，將可獲得濾網之釋氣組成與濃度值。有機性氣體以氣相層析質譜儀、無機性氣體以離子層析儀做為污染物的分析工具。

#### (6)濾網後端風速分佈測試

將化學濾網測試段前端截面上，劃分成9等分面積區塊(如圖3.2)，利用風速計(TSI8386)，分別將9點平均風速值( $V_a$ )與各點風速( $V_n$ )差值除以9點平均風速值( $V_a$ )，取絕對值以獲得各點之風速偏差值。均勻度( $\mu$ )之定義即為各點風速偏差值之平均，計算公式如下方程式。

$$\mu = \frac{\sum_{n=1}^9 \left| \frac{V_a - V_n}{V_a} \right|}{9} \times 100\%$$

$$\text{其中 } V_a = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n}, n=1 \sim 9$$



$V_1$	$V_2$	$V_3$
$V_4$	$V_5$	$V_6$
$V_7$	$V_8$	$V_9$

圖3.2風速均勻度量測點示意圖[20]

### 3.2 本研究所用之IMS(NH<sub>3</sub>即時分析儀)分析原理說明

所謂的離子電泳分析儀(IMS, Ion Mobility Spectrometry, Saes, USA)，是由國際半導體技術藍圖委員會認可之微量分析技術。本研究於工研院模廠及潔淨室使用之即時監測系統皆使用IMS。

圖3.3為本研究潔淨室使用之IMS套裝分析儀圖，圖3.4為IMS分析儀內部構造圖，圖3.5為本研究潔淨室使用之45 channel IMS分析儀後方內部構造。在IMS中氣體樣品經由採樣氣流吸入，而後利用載流氣體將氣體樣品經由過濾薄膜做初步篩選，並帶入具Ni-63的激發源帶，將氣體樣品激發成帶電狀態，再利用電路閘門每40微秒開關一次及高壓電板所產生的電場(力場)，讓所有帶電離子依不同質荷比依不同的飛行時間到達電子捕集器，如圖3.6[15]，以此所產生的電壓及時間作圖，即可分別定義個別氣體種類，再與標準氣體所產生的波峰相比即可獲得特定氣體的濃度數值，如圖3.7[15]。另外為加強分析儀之偵測能力，美國Molecular Analytics公司更與DuPont合作以更先進的摻雜化學(Dopant Chemical)專利方式，使得檢測極限可達0.1ppb。



圖 3.3 IMS 套裝分析儀



圖 3.4 IMS 分析儀內部構造

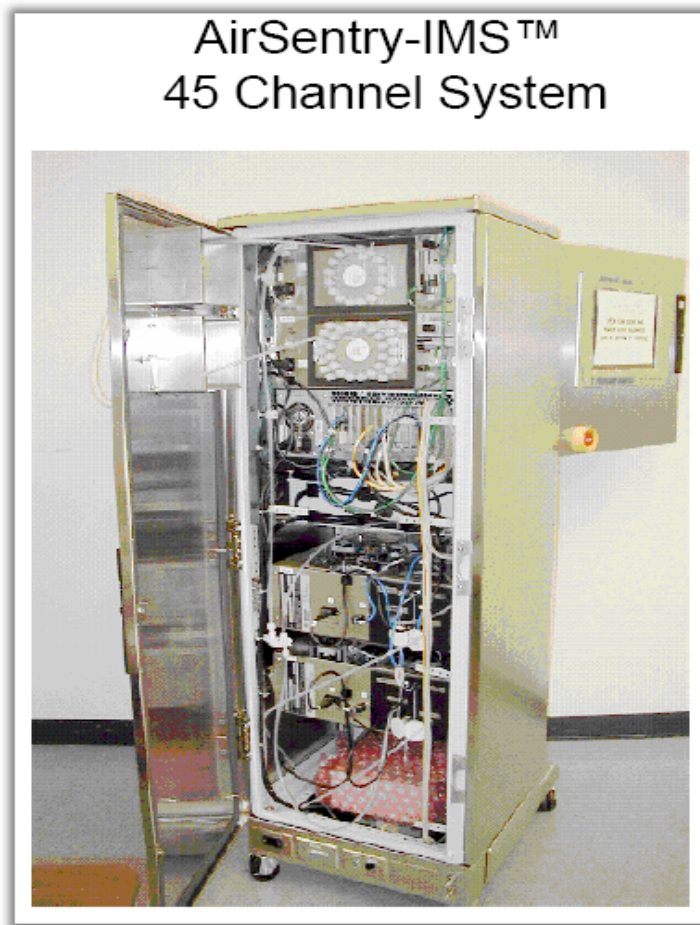


圖 3.5 IMS 分析儀後方內部構造

## IMS 離子電泳原理

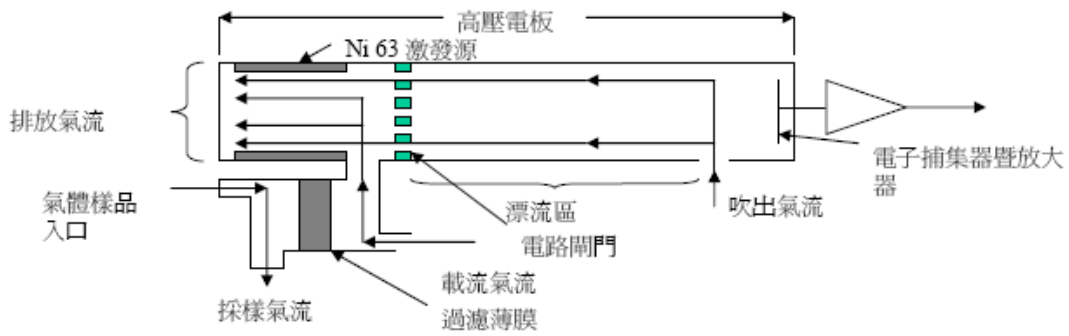


圖3.6 IMS分析儀分析原理[15]

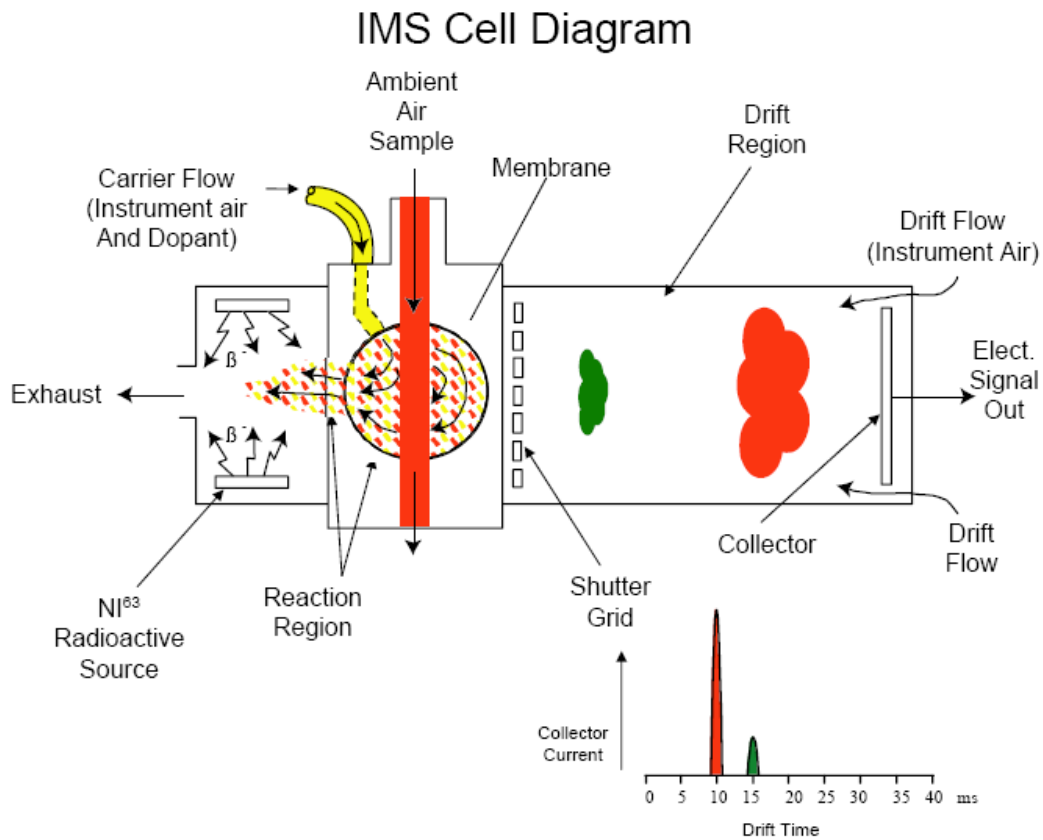


圖3.7 IMS分析儀Cell氣體流程圖[15]

### 3.3 化學濾網實廠安裝位置說明比較

目前業界化學濾網安裝之位置共有三種，說明如下：

A. MAU進氣口：設置長效型(高風速型High Face Velocity Type：V > 2.5

m/s)化學濾網。

B. 機台/ Stock進氣口之風扇過濾單元上游處(如光罩室，光罩傳送機，光罩櫃及相關機台等)：設置低風速型(Low Face Velocity Type： $V < 1.0$  m/s)化學濾網。

C. Recirculation Air回風處：設置高效型(高風速型 $2.5$  m/s  $> V > 1.2$  m/s)化學濾網。

光罩室設置時原則上應同時採用獨立回風 + 裝設化學濾網設計，以確保該區域環境之AMCs能有效控制。關於潔淨室內化學濾網裝設位置，究竟採機台/Stock局部裝設或是Recirculation Air回風處全區裝設，應以整體成本效益及施工難易考量為原則。

本研究在潔淨室現場裝置的化學濾網位置採B案，於機台上方之FFU入口端裝設化學濾網，現場安裝於FFU進氣端如圖3.8紅色虛線標示處，化學濾網與FFU相關組件細部構造如圖3.9。

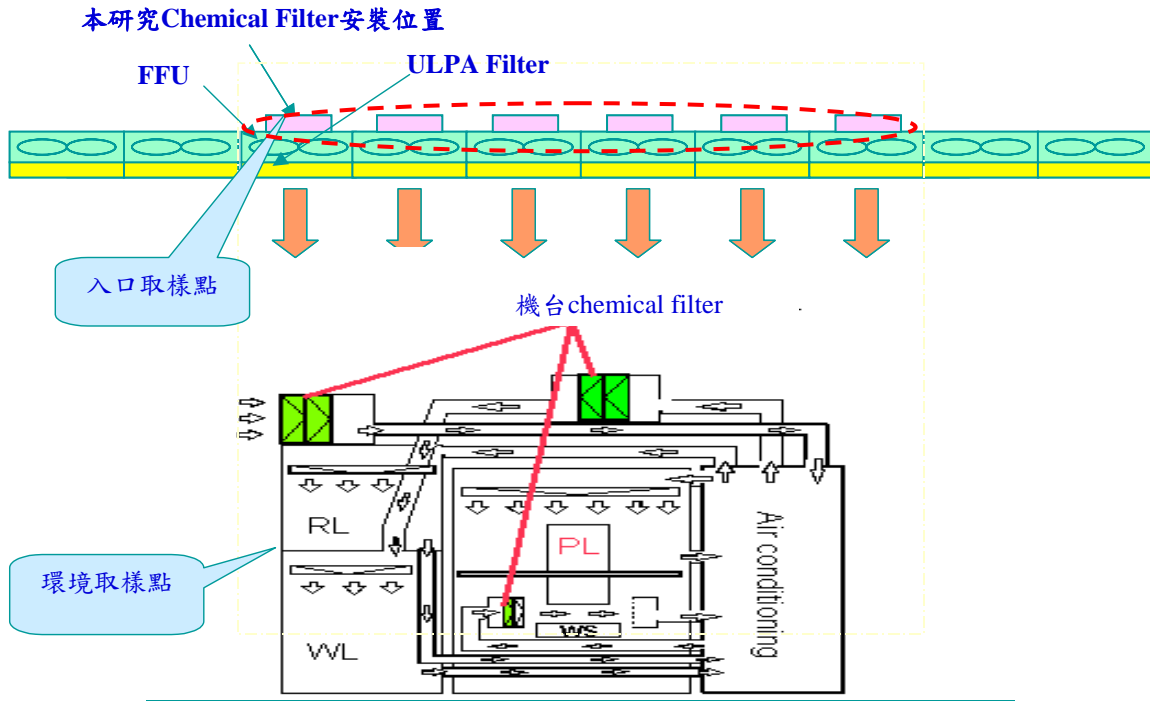


圖3.8 本實驗無塵室AMC化學濾網安裝位置

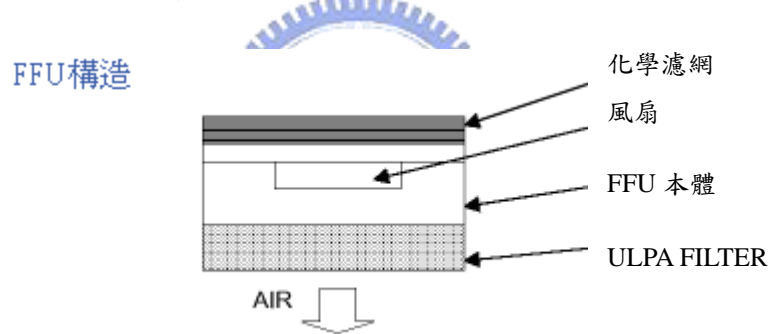


圖3.9 化學濾網安裝於FFU上方位置

現場安裝照片，如圖3.10、圖3.11、圖3.12。



圖3.10 化學濾網安裝



圖3.11 化學濾網安裝



圖3.12化學濾網安裝

#### 3.4 定期監測及採樣

化學濾網安裝完成後，以IMS分析儀長期連續監測，取樣點為FFU吸入端(Inlet)，及黃光區環境(Outlet)，以確保黃光區環境氨(NH<sub>3</sub>)濃度可有效控制，並驗證化學濾網之去除效率及使用時間。此外，為避免IMS分析儀儀器誤差，導致測值失去正確及客觀性，另每季以impinger採樣送Lab分析，將分析結果進行比對。



## 四、結果與討論

### 4.1 廠商提供之濃度推估曲線數據整理分析

本廠所使用之化學濾網如圖4.1，為廠商自行開發泡棉式之濾網，提供之化學濾網相關規格如表3.1，使用椰殼活性炭(20 x 50 mesh)，並有最少60%之 $\text{CCl}_4$ 吸附效率測試及 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 進行改質，平均表面積 $1000\text{m}^2/\text{g}$ 以上，活性炭相關規格如附表4.1。



圖4.1 廠商提供之化學濾網

因化學濾網係以吸附及吸著原理來移除氣體污染，可將活性炭注入化學藥劑，使某些低吸附力的氣體於實物質提昇其吸附之能力，如吸附質是酸性的話，注入化學藥劑可使用鹼性藥劑，使吸附劑增加中性之化學吸附能力，如吸附劑活性炭經 5~10% 氫氧化鉀浸泡乾燥後將可提昇吸附效果，相反的如吸附質是鹼性的話，注入化學藥劑可使用酸性藥劑，本研究之去除標的物為  $\text{NH}_3$  屬於鹼性，就以  $\text{H}_3\text{PO}_4$  進行改質。由廠商所提供之穿

透曲線如圖 4.2，概估在風速 2.5 m/s 下 NH<sub>3</sub> 進氣濃度 5ppb，其化學濾網去除氨氣之效率安裝約一年後將剩下 70% 之去除效率。

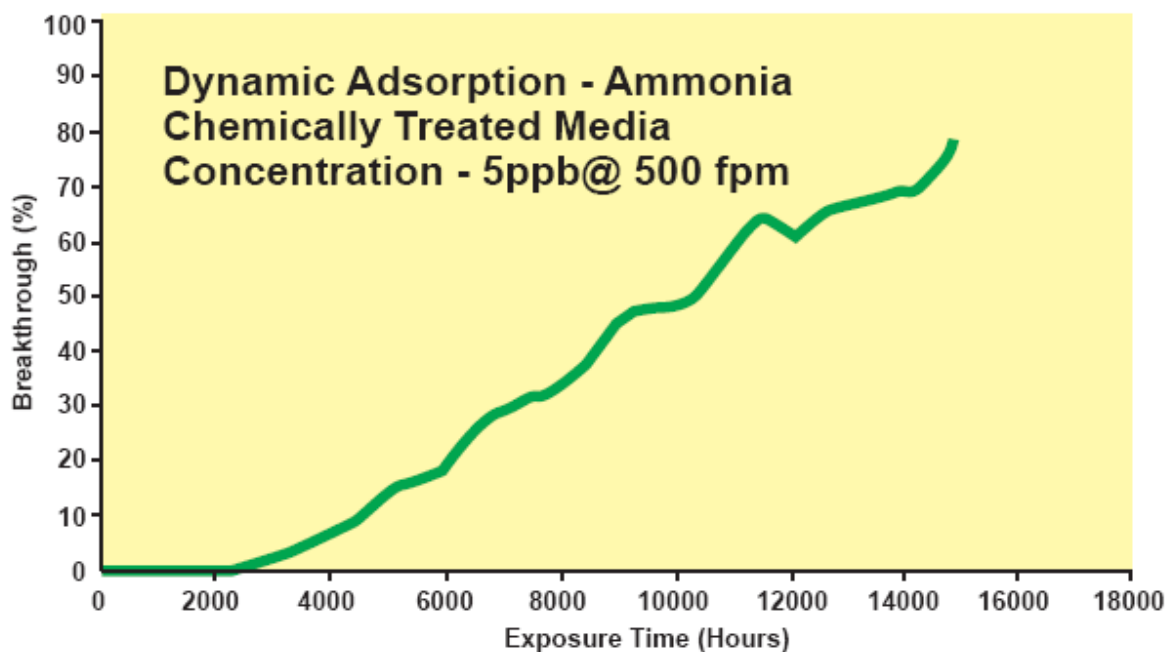


圖4.2 廠商提供之穿透曲線

表4.1 活性碳規格

Activity, CCl <sub>4</sub>	60% Min.	ASTM D3467
Surface Area	1000 M <sup>2</sup> /g Min.	N <sub>2</sub> , BET Base
Particle size	20 x 50 mesh (0.85~0.3 mm)	ASTM D2862
Base Carbon	Granular Coconut – shell	
<b>Impregnated property</b>		
Impregnate	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	25% (wt%)
Hardness, ball-pan	95 Min.	ASTM D3802
Ash content	5% Max.	ASTM D2866
Apparent density	0.66~0.69 g/ml	ASTM D2854

#### 4.2 工研院報告數據整理分析

本研究數據引用正麗科技委託工研院之化學濾網性能測試報告，委託編號：5F55RD3D00-022，委託日期：95.7.21，測試結果彙整如表4.3，於吸

附NH<sub>3</sub> 10ppm時，初始效率則為99.4%，經過870分鐘後則已降至82.6%，但相對於吸附NH<sub>3</sub> 15ppb時，初始效率則只有82.9%，因此高濃度之初始吸附效率高於低濃度。工研院測試結果效率曲線如圖4.3。另NH<sub>3</sub>在風速2.5 m/s，入口濃度15.2 ppb，初始吸附效率為82.9%，風速1.0 m/s，入口濃度15.1 ppb初始吸附效率為84.1%，我們發現於同樣低濃度下風速大小對初始吸附效率則影響不是很明顯。

表4.2 工研院測試結果[10]

測試項目	上游濃度	下游濃度	去除效率	測試時間
風速 2.5 m/s,低濃度初始去除效率	15.2ppb	2.6ppb	82.90%	20 小時
風速 1.0 m/s,低濃度初始去除效率	15.1ppb	2.4ppb	84.10%	20 小時
風速 2.5 m/s,高濃度吸附容量測試	10.0ppm	0.26ppm	97.40%	初始
	10.0ppm	1.74ppm	82.60%	經過 870 分鐘後

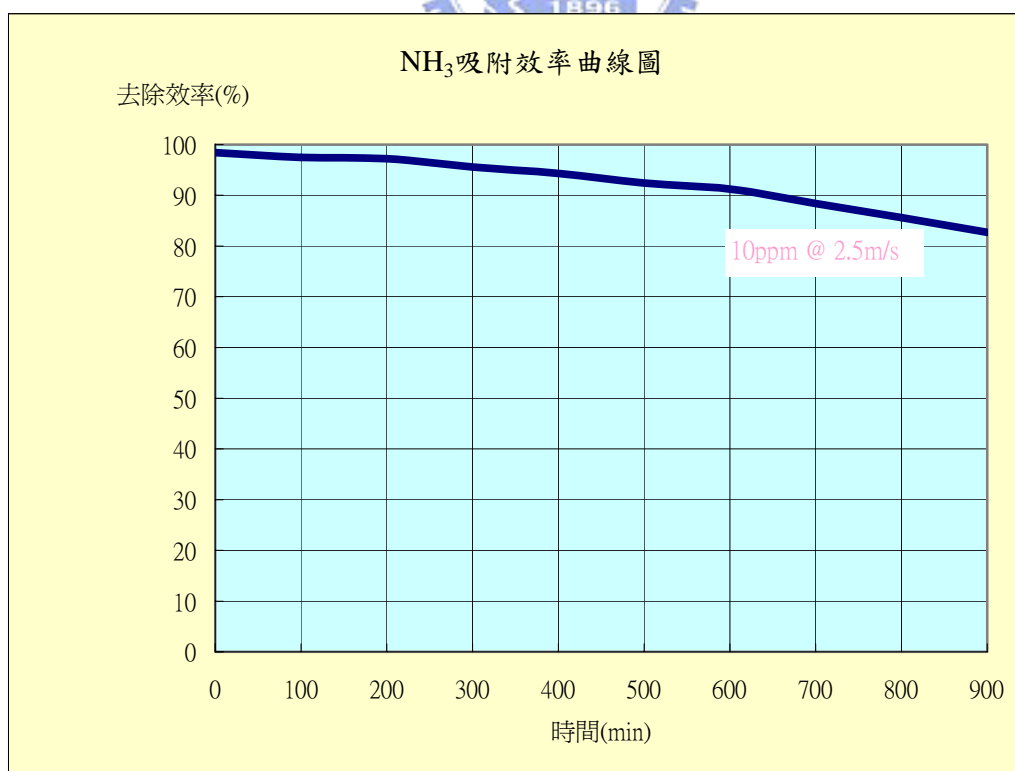


圖4.3 工研院之測試效率曲線

首先進行低濃度測試，當吸附10 ppb NH<sub>3</sub>之污染物，風速2.5 m/s及1.0 m/s下，效率降至70%之實測壽命以及吸附量計算如下：

NH<sub>3</sub>:14588小時吸附量: 145880 ppb-hr (2.5 m/s )

NH<sub>3</sub>:30000小時吸附量: 300000 ppb-hr (1.0 m/s )

之後再進行高濃度測試，當吸附10ppm NH<sub>3</sub>之污染物，風速2.5 m/s及1.0 m/s下，效率降至70% 之實測壽命以及吸附量計算如下：

NH<sub>3</sub>:19小時吸附量: 190000 ppb-hr (2.5 m/s )

NH<sub>3</sub>:39小時吸附量: 390000 ppb-hr (1.0 m/s )

由以上可看出低濃度測試NH<sub>3</sub>(10 ppb)，低風速(1.0 m/s)之吸附容量較高風速下(2.5 m/s)，壽命較長約一倍。又以同樣風速(1.0 m/s)下比較，高濃度之吸附量則比低濃度為高。

#### 4.3 實廠安裝前及安裝後定期收集之data整理分析及去除效率驗證

安裝前潔淨室黃光區環境氨氣之濃度以IMS長期監測結果約在2~7ppb飄移，如圖4.4。依據MAU外氣入口濃度監測結果，測值常態約在4~5ppb之間，再加上MAU本身水洗去除效率約可達80%，理論上潔淨室內之NH<sub>3</sub>因此判斷潔淨室黃光區環境NH<sub>3</sub>來源主要以潔淨室製程使用Gas、Chemical所產生之內部污染居多。

依歷年使用Impinger採樣資料曲線如附圖4.5及IMS監測結果曲線如附圖4.6，安裝前後有相當明顯之效益，FFU吸入端(Inlet)，由平均5.5ppb降至

1~3ppb，黃光區環境(Outlet)，則由平均5.5ppb降至1ppb以下。安裝一年後之去除效率依然可達80~92%，總共吸附約7884 ppb-hr (0.35 m/s)，預估去除效率降至70%，可使用5年以上(假設黃光區濃度變化差異不大)。

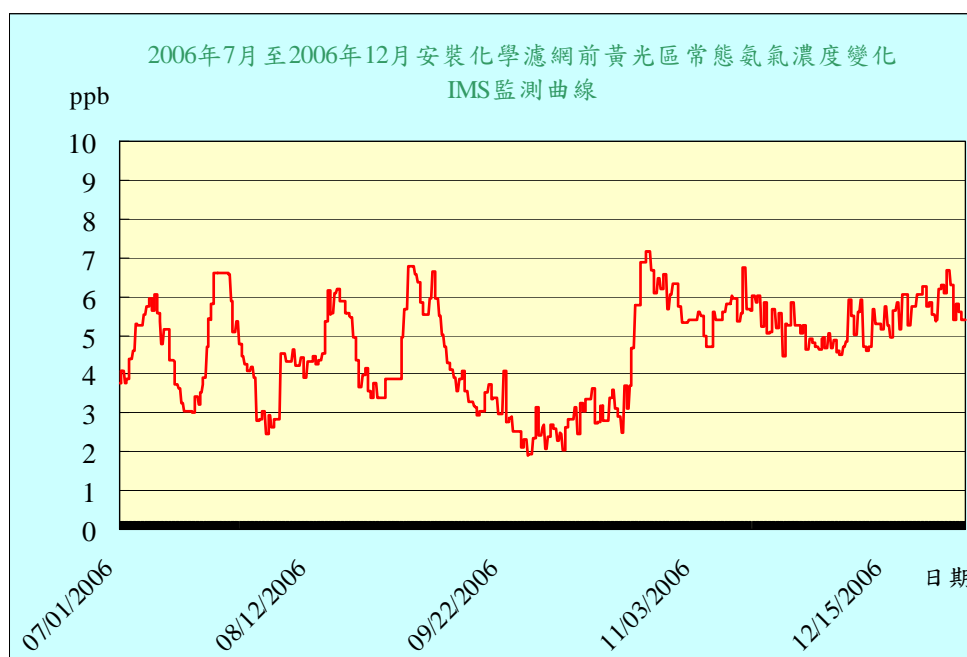


圖4.4 安裝化學濾網前潔淨室常態之氨氣濃度變化IMS監測曲線

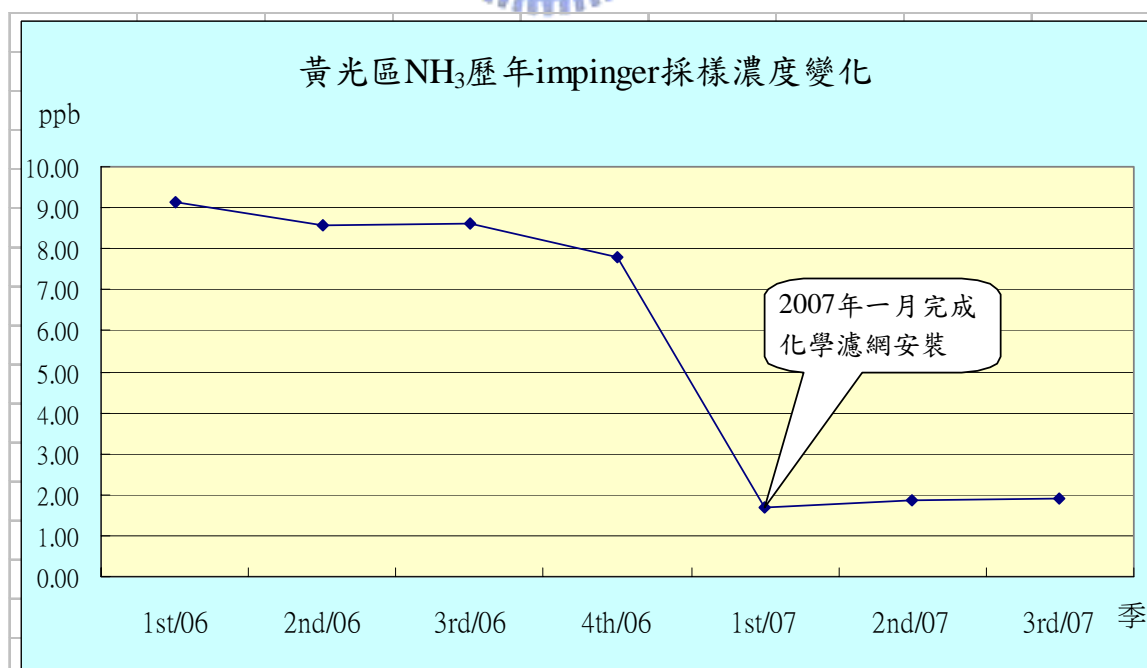


圖4.5 安裝化學濾網前後潔淨室常態之氨氣濃度變化Impinger採樣曲線

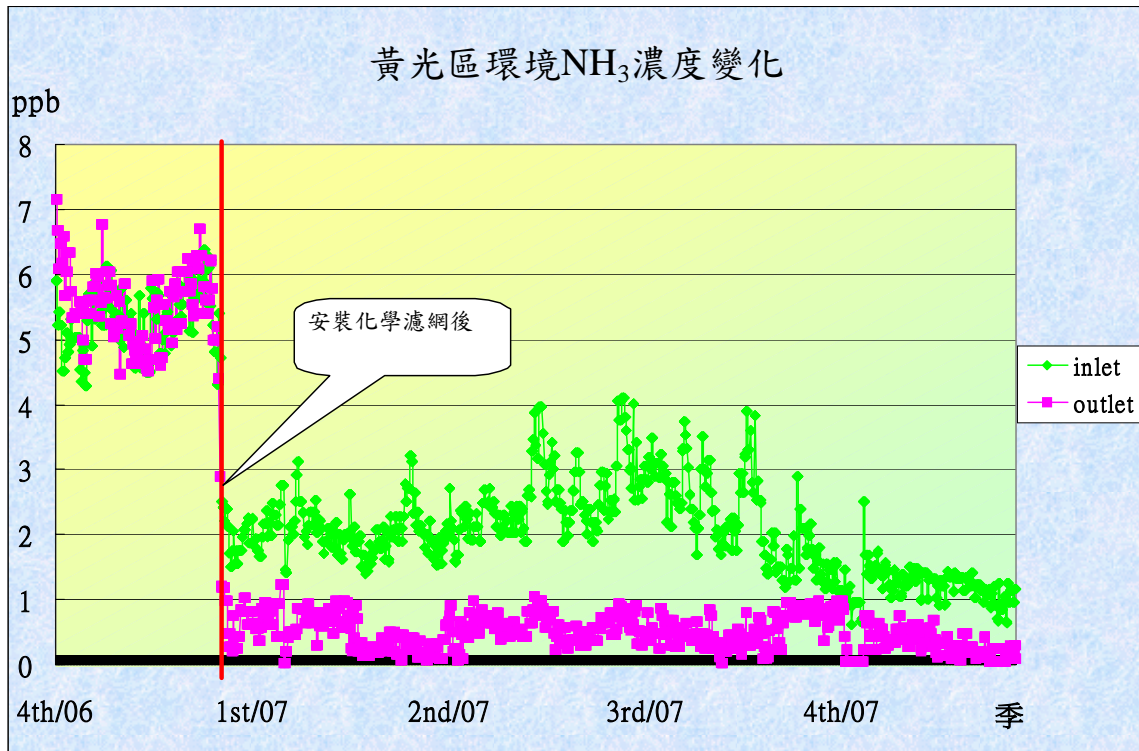


圖4.6 安裝化學濾網前後潔淨室常態之氨氣濃度變化IMS監測曲線

#### 4.4 安裝於FFU化學濾網增加運轉成本之計算方法

風車用電量計算公式：

$$E = \frac{q \times \Delta P \times h}{\eta \times 1000}$$

E=仟瓦小時/年

q=氣體流量(m<sup>3</sup>/s)

h=運轉時數/年(每年以8760小時計算)

ΔP=壓損(Pa)

η=風車效率

以每片FFU安裝化學濾網後兩年所增加耗電量為例：

目前每台FFU運轉風量約 $1.2\text{M} \times 1.2\text{M} \times 0.35\text{M/s} = 0.504\text{CMS}$

假設壓損50Pa，在風車效率：0.45（依照FFU性能曲線求得），平均每度用電費用為1.66元情況下，每台FFU兩年安裝化學濾網所增加之電費計算如下：

$$(0.504\text{CMS} \times 50\text{pa} \times 8760\text{hr} \times 2\text{year}) \times 1.66 / (0.45 \times 1000) \doteq 1,612\text{元}$$

本研究整個黃光區安裝350片化學濾網，每年電費約增加282100元。

#### 4.5化學濾網ppb-hr之計算方法

依照其他廠商提供之Third Party ppb-hr性能曲線(如圖4.7所示)以計算其濾網之使用時間為例：

假定環境背景濃度10 ppb，環境要求規格為3 ppb，則此化學濾網可使用至效率大於70%。因此可計算化學濾網效率由100% 降至70%時所累積的ppb-hr來代表濾網的使用壽命。

以Curve A  $\text{NH}_3 = 10\text{ppm}$ 為例，當其達到30%穿透率(Breakthrough Ratio)所經歷時間約為10hr，由其對應曲線之面積即可求得10ppm  $\text{NH}_3$ 達到30%穿透率時約為85,000 ppb-hr。

計算式：

$$\begin{aligned} \text{面積約} &= 10\text{ppm} \times 1,000 \times (100-30)\% \times 10\text{hr} + 1/2 \times 10\text{ppm} \times 1,000 \times 30\% \\ &\times 10\text{hr} \doteq 85,000\text{ ppb-hr} \end{aligned}$$

以各家廠商提供之Third Party ppb-hr性能曲線其測試濃度10 ppm及測試風

量3400 CMH皆固定情況下，直接比較各家濾網達到相同穿透率之時間即可判斷其壽命長短(總吸附量多寡)。

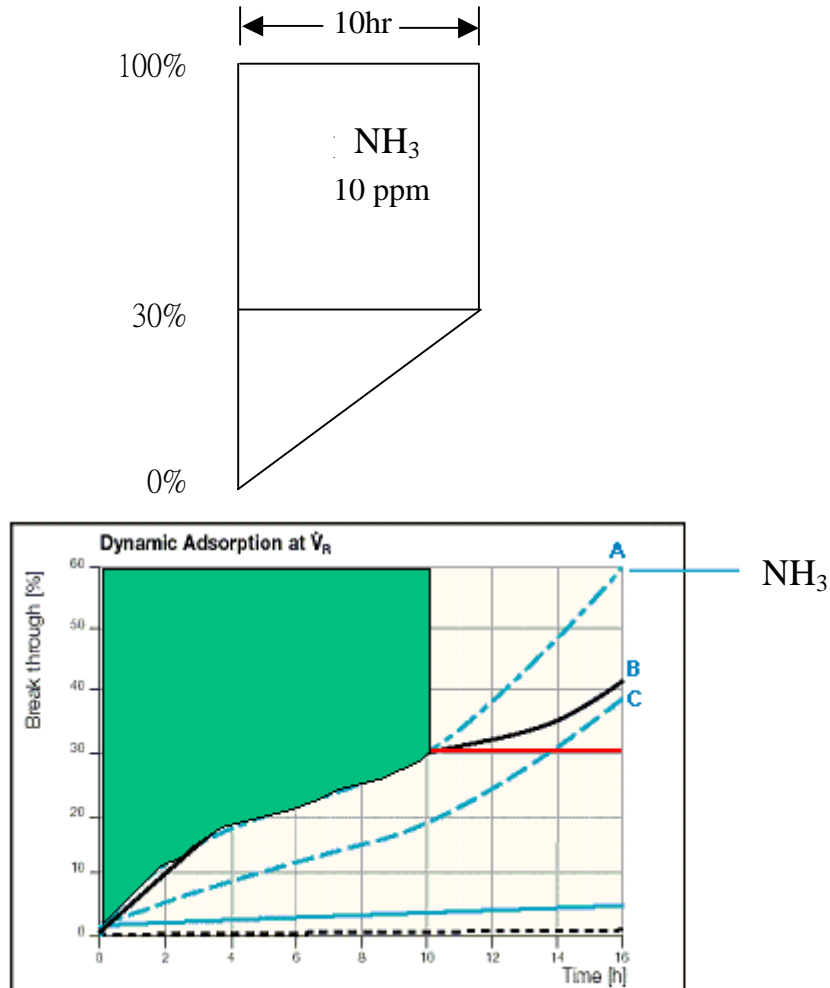


圖4.7其他廠商提供之性能曲線

#### 4.6實驗室Impinger & IMS量測數據之差異分析

本研究過程發現Impinger分析值與IMS監測值，數據有所差異，IMS長期監測黃光區NH<sub>3</sub>濃度皆在1ppb以下，但實驗室Impinger採樣結果則介於1~2ppb間，如圖4.5及4.6。為釐清實驗室Impinger與Fab線上IMS數據之差異，增加IMS檢測結果之利用性及可信度，因此進行量測數據之差異分析。



研究結果IMS於非正常狀況下，其偵測結果可能會造成異常偏低或偏高變異之可能因素有：

- A. IMS內部比對濃度已偏離(廠商提供之校正誤差為5%之內，但往往都超過許多)，儀器需提早進行校正。
- B. IMS取樣抽氣Pump老化或故障，無運轉、無抽氣即無取樣。(數據失效)
- C. IMS所有偵測連接之採樣管路，長期於黃光區使用六甲基二矽氮烷(HMDS, Hexamethyl Disilazane)之暴露環境下，而無定期Purge、檢查或更新，以致殘留污染或損壞。

當IMS需與實驗室Impinger監測結果比對時，務必需確認採樣位置及各項採樣條件後始可進行比對，利用IMS(前提:一切配備須於合格作業中)自動化系統線上監測為主，視實際需求以微量實驗室Impinger人工採樣分析作業為輔助Double check，進而達成合理監測之運用及作業之可信度。




圖4.8 IMS監測數據偏離可能因素

## 五、結論與建議

### 5.1 結論

本研究證實晶圓製造廠黃光區利用泡棉式化學濾網得以有效降低氨氣濃度，原來安裝前FFU吸入端，由平均5.5ppb降至1~3ppb，黃光區環境即FFU出氣端，則由平均5.5ppb降至1ppb以下，去除效率降至70%，預估使用壽命可達5年以上。由於此次研究採用國內廠商自行開發之泡棉式化學濾網，單片費用約只有機台原廠使用之1/5，當黃光區整體氨氣濃度下降，將使黃光機台內部化學濾網使用壽命更加延長，除節省成本外，更能符合機台原廠要求之規格。



本研究化學濾網安裝位置於FFU上方，業界需考慮廠內工程安裝難易，日後更換化學濾網工時及成本等因素來決定安裝位置，當然若能於建廠初期即考慮日後安裝之位置，預先規劃，如回風區或MAU預留2~3道化學濾網空間等，將可大幅降低日後運轉成本及安裝便利性。

目前半導體業界在AMCs防治上，除針對黃光區之氨氣去除外，另亦非常重視硫化物之污染，因為鏡片及光罩霧化主要為硫酸銨，若能將硫化物及氨氣二者污染物濃度同時降低，必定可以大幅降低硫酸銨的形成，延長光罩及步進機鏡片使用壽命。但現有去除硫化物之化學濾網主要以硫化氫(H<sub>2</sub>S)及二氧化硫(SO<sub>2</sub>)為標的物，皆有不錯的去除效率表現，然TFT-LCD廠日益擴廠，其使用在去光阻製程中用作為剝離劑(Stripper)，所排放出之二甲

基硫(DMSO, Dimethyl Sulfoxide)氣體屬於有機硫化物，現今國內外廠商所開發出產品皆無法有效去除，往往當TFT-LCD廠煙囪或廢水廠異常排放時，其所散發之惡臭異味不只造成人員不適，更經由MAU進入無塵室內，造成半導體廠內AMCs異常，產品報廢，因此有效去除有機硫化物之化學濾網開發有賴廠商持續研究。

另國內原無針對化學濾網相關測試之第三公正單位，工研院能環所適時成立實驗室及建立測試模廠，除提供廠商進行化學濾網效率等相關測試，減少送國外實驗室之耗費工時及降低研發成本，並能提供給業主採購化學濾網時之客觀參考依據，期能使國內廠商研發化學濾網時能取得與國外廠商競爭之優勢，提供給業主品質更好、壽命更長之產品。

## 5.2建議

依工研院測試結果於低濃度下10ppb在風速1.0 m/s時，效率降至70%，預估可達300000 ppb-hr吸附量，但實際黃光區環境FFU風速只有0.35 m/s，約只有測試時風速1/3，安裝一年後之去除效率理應達90%以上，然實際有時卻只有80%，此部份需再持續觀察研究，日後應要求工研院加測風速0.35 m/s之去除效率，以符合現場實際需要。

本研究只針對氨氣之去除做探討，然而實際潔淨室內所遇到之AMCs污染上還有硫化物問題，尤以TFT廠排出之有機硫化物污染物是目前待克服之當務之急。未來半導體業將持續朝更細微之線寬邁進，要求更嚴謹之污染

物容許標準，除廠商更積極開發新的奈米級化學濾網以達治標外，業主更需要主動搜尋潔淨室內之污染源以達治本之目的。依工研院能源與環境研究實驗室所李壽南博士等人發表之微污染控制案例研究文章所述[33]，其自行開發出之氣體洩漏偵測系統(GLDS, gas-leaking detection system)可有效找出FAB內之AMCs污染源，利用原理乃利用二套開放式FTIR架設於FAB回風區，再與數位式氣體管路系統及診斷軟體連線進行即時偵測及判斷，當FTIR偵測到有某一污染氣體異常偏高，隨即與數位式氣體管路系統資料庫比對當時有哪些機台正在生產及使用何種化學品或氣體，最後由診斷軟體進行分析，分析完成後並通知廠務或緊急應變中心值班人員進行後續處置。



然現今業界常見之污染物即時監測儀器，均為固定偵測式，無法於潔淨室內隨機移動，針對可疑之污染源進行即時有效之偵測，當發現有異常污染源時，再以impinger採樣分析，污染物早已擴散至整個潔淨室，往往緩不濟急，因此移動式AMCs即時偵測分析儀，正有賴廠商與研究單位共同努力研發。

另在此針對黃光區化學濾網設置注意事項及驗收規格提供業界參考。

首先需依希望去除之氣體成分決定適宜之化學濾網型式，廠商提供之規格需能滿足業主所提之規格需求。其次依廠區內安裝施工及日後更換難易來決定化學濾網設置位置。再者廠商需提供化學濾網送審資料，相關資

料供業主審核(提供於報價單之附件)以確定其產品是否符合需求。化學濾

網基本資料，其內容需包含：

外框基本尺寸、濾網型式、框架材質、可處理AMCs種類、濾網效率曲線 (ppb-hr curve)、額定處理風量(CMH)、額定處理風速(m/s)、滿載時之濾網壓損(Pa)、填充材(活性炭)含量、化學濾網是否產塵之相關資料、國內外使用實績、濾材outgassing情況。基本規格需求如表5.1。

表5.1化學濾網基本規格

Item	Unit	Note
Filter Location	N/A	FFU
Filter Size	mm	dept. on design (610x610x300)modify by each fab requirement
Filter Frame	N/A	Aluminum/SUS/Galvanized Steel
Typical Air Flow	CMH	dept. on design
Air Velocity	M/s	0.3~1.0(Max.)
Pressure drop	Pa	< 50 @ 1.0 m/s
Inlet concentration assumption (average)	ppb	Inlet concentration @ 10ppb(NH <sub>3</sub> )
Initial Removal Efficiency	%	efficiency >90% or outlet < 1 ppb
End Efficiency (Lifetime)	%	Life time: >2 year when down to 70% efficiency@Inlet concentration 10ppb(NH <sub>3</sub> )@Air Velocity1.0(Max.)
Provide removal Efficiency curve or data	N/A	Yes

Provide Particle emission data	ft <sup>3</sup>	<100 @ ≥0.3 μm
Quantity		dept. on design

安裝注意事項：首先安裝前檢查，化學濾網外觀是否有破損變形現象、化學濾網尺寸是否和訂購規格相符。框架安裝時框架與FFU本體接合處處需使用無塵室專用矽利康(Silicone)收邊以確保其氣密度。化學濾網安裝時濾網與框架接合處處需使用襯墊(Gasket)及固定之治具以確保其氣密度。

驗收原則 為化學濾網安裝後主要驗收項目包括初始去除效率及壓損兩項。FFU型化學濾網，依現場FFU實際運轉條件下，量測並記錄以下數據：化學濾網上游濃度(ppb)、化學濾網下游濃度(ppb)、化學濾網壓損(Pa)。化學濾網去除效率(%)： $[化學濾網上游濃度 - 化學濾網下游濃度] / 化學濾網上游濃度$ 。



化學濾網驗收規格，如表5.2 Chemical Filter驗收基準表。

初始去除效率：FFU型化學濾網，依現場FFU實際運轉條件下，化學濾網去除效率需>90%或下游濃度需<1 ppb，壓損需<50 Pa。

化學濾網保固：

FFU型化學濾網：若化學濾網上游濃度維持在10 ppb，維持其下游濃度<3 ppb之時間須大於二年。廠商於驗收後須提送保固切結書，若化學濾網無法符合以上標準，則保固期間內供應廠商需免費更換。

表5.2Chemical Filter驗收基準表

Chemical Filter 驗收基準表						
步驟	點檢項目	驗收基準或規則	結果 (Y/N)	簽名(日期)	說明	
安裝前檢查	外觀結構	檢驗外觀是否無破損現象發生				
	數量	核對Chemical Filter數量是否和訂購規格相符				
	型號	核對Chemical Filter型號是否和訂購規格相符				
	材質規格	核對Chemical Filter材質規格(風量&壓損&效能)是否和訂購規格相符				
	尺寸	核對Chemical Filter尺寸是否和訂購規格相符				
安裝中檢查	外框結構及包裝	外部是否加裝透明膠袋包覆				
		外框是否無破損情形發生				
		外框是否無接合不良情形發生				
		外框是否無受潮而軟化現象				
		藥材包覆網是否有破損情形發生				
	藥材檢查	藥材是否無受潮				
		藥材顏色是否無異樣變化				
		抽樣檢查藥材重量是否與訂購規格相符				
安裝檢查	安裝位置是否固定良好					
	正確依air flow之方向安裝				如filter無air flow之規定,則此項不必檢查	
安裝後檢查	規格檢驗	風量&壓損是否和訂購規格相符			風量/規格: 實測: 壓損/規格: 實測:	
		效能是否和訂購規格相符			效能/規格: 實測:	
		Chemical Filer downstream Particle count檢驗			Option:如Chemical filter下游無bag filter,購買時需考慮Chemical filter是否release particle,並於驗收時檢驗Particle count	

另需提供國內外第三公證單位測試報告，內容需包含FFU用化學濾網在溫度23°C、濕度50%恆溫恆濕情況下，測試通過化學濾網風速為2.5 m/s時之

下列資料，入口濃度15 ppb時AMC起始去除效率(Initial Efficiency)、入口濃度10 ppm時AMC穿透率性能曲線(ppb-hr curve)、化學濾網壓損，包含量測通過風速1、1.5、2.0、2.5 m/s時之濾網壓損以及化學濾網產塵量。





## 六、參考文獻

1. U.S. Federal Standard 209E "Airborne particulate cleanliness classes for cleanrooms and clean zones", Washington, DC/USA, 11 September 1992.
2. Muller A. J., Psota L.A., Krautter H.W., and Sinclair J. D., Volatile Clean room Contaminants : Sources Detection, Solid State Technology, 37(9), pp 61-72, 1994.
3. Kitajima, H. and Shiramizu, Y. (1997). Requirements for Contamination Control in the Gigabit Era. IEEE Trans. Semicond. Manufac., 10(2), pp 267-272.
4. Draft International Standard ISO/DIS 14644-1, "Clean rooms and associated controlled environments-Part 1: Classification of air cleanliness", International Organisation for Standardisation, Geneva, December 1996.
5. 昇暘工程網站，<http://www.sanguine.com.tw/clean1.htm>。
6. 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.
7. Semiconductor Industry Association, "International Technology Roadmap for Semiconductors : Yield Enhancement", 2005 Update, pp 21, Available online at <http://public.itrs.net/>.
8. 楊政諭, AMCs防治教材, 亞翔工程股份有限公司, 2005年。
9. Bhattacharyya, K. et al, "The Case of the growing reticle defect at 193nm lithography", Yield Management Solutions, Summer 2003, 78-84.
10. 正麗科技委託工研院之化學濾網性能測試報告，委託編號：

5F55RD3D00-022，2006年。

11. JIS B 9901, “Gas-Removal-Method of Test for Performance of Gas-Removal Filter”JIS標準，日本規格協會，1997。

12. ISO/TS 11155-2, “Road Vehicles-Air Filter for Passenger Compartments-Part 2 : Test for Gaseous Filtration”ISO Standard, USA, 2002.

13. NT VVS 109, Nordtest Method, Nordic Innovation Centre, 1996.<http://www.norden.org>

14.志尚儀器股份有限公司網站，<http://www.jusun.com.tw>。

15.大塚一彥(1996)，無塵室用空氣過濾器之性能與最新趨勢，中國冷凍空調雜誌，107-113。

16.洪益凱，無塵室化學濾材開發改良研究，國立交通大學環境工程所，碩士論文，2004年。



17.羅怡弦，以環型擴散採樣器採集大氣中酸、鹼性氣體與微粒—美國環保署新舊標準方法應用於台灣地區採樣之比較，國立交通大學，碩士論文，2000年。

18.劉政彰，以矽膠管與吸收瓶採集無塵室無機酸鹼性氣體之方法比較，國立交通大學環境工程所環境工程所，碩士論文，2002年。

19.康育豪，潔淨室凝結性有機污染物之晶圓表面吸附沈積行為探討，國立交通大學環境工程所，博士論文，2005年。

20.康育豪、黃倩芸，空調系統之化學濾網去除有害氣態污染物性能測試研

究，冷凍與空調雜誌，53-60。

21. Peter Van Zant, Microchip Fabrication a Practical Guide to semiconductor processing, ISBN 957-493-427-5.

22. 顏登通，「潔淨室設計與管理」，全華科技圖書股份有限公司(1995)。

23. 莊達人，「VLSI製造技術」，高立圖書有限公司(2002)。

24. 許榮郎，「液晶面板廠無塵室之氣態化學污染物量測分析及研究」，碩士論文，台北科技大學冷凍空調工程系(2001)。

25. 官瑋俐，「半導體廠無塵室中氣態污染物之成分分析」，碩士論文，長庚大學化學工程研究所(2001)。

26. 林裕聰、張瑞琪、謝瑞豪，「科技產業建廠材料環氧樹脂逸散化學物對廠內空氣品質影響探討」，<http://www.itriweb.org.tw>。

27. 顏紹儀，「潔淨室內空氣品質管理策略」，<http://www.itriweb.org.tw> (2002)。

28. 大西謙之、和田陽、黃寶川，「半導體廠超級無塵室的化學污染和“PURATEX”化學過濾器之介紹」，電子月刊，5(9), 164-168 (1999)。

29. 謝瑞豪、彭羽榛，「無塵室空氣品質監測分析技術開發與應用實例」，工業技術研究院工安衛中心(2005)。

30. 古坤文，「半導體金屬蝕刻機台於預防維修時之污染物逸散控制」，碩士論文，國立交通大學工學院產業安全與防災學程(2004)。

31. 曾麗玲、陳清良、鍾美瑛，「無塵室內部發生之氣態分子污染(AMC)異常

處理措施」，冷凍與空調雜誌，64-70 (2007)。

32. 林義凱、劉美娟，「無塵室黃光區AMC NH<sub>3</sub>量測濃度分析研究」，工業技術研究院工安衛中心(2004)。

33. Shou-Nan Li, Hui-Ya Shih, Shaw-Yi Yen, Jean Yang, Case Study of Micro-Contamination Control, Aerosol and Air Quality Research, Vol. 7, No. 3, pp. 432-442, 2007.

