

國立交通大學

工學院碩士在職專班

精密與自動化工程組

碩士論文



深溝多晶遮罩開口蝕刻製程之先進製程控制

Advanced Process Control in

Deep Trench Poly Hard Mask Open Etch Process

研究生：黃啟業

指導教授：李安謙 教授

中華民國九十七年六月

深溝多晶遮罩開口蝕刻製程之先進製程控制

Advanced Process Control in

Deep Trench Poly Hard Mask Open Etch Process

研究生：黃啟業

Student : Chi-Yeh Huang

指導教授：李安謙

Advisor : An-Chen Lee

國立交通大學

工學院碩士在職專班精密與自動化工程組

碩士論文



Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Institute of Automation and Precision Engineering

June 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

# 深溝多晶遮罩開口蝕刻製程之 先進製程控制

學生：黃啟業

指導教授：李安謙 博士

國立交通大學

工學院碩士在職專班精密與自動化工程組



本論文主要目的為設計一套應用於深溝多晶遮罩開口製程(Deep Trench Poly Hard Mask Open, DTPHMO)之關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)的先進製程控制方法。首先利用相關性分析法(Correlation Analysis Method)與迴歸分析法(Regression Analysis Method)找出乾式蝕刻機台之輸入變數(製程配方, Recipes)與輸出變數(晶圓良率變數: 關鍵尺寸)之間的關係; 再將模型代入前饋與指數權重移動平均控制器(Feed-Forward and Exponential Weighted Moving Average, FF + EWMA), 配合前製程量測值與後量測值的變化動態調整製程輸入參數, 使得後量測的關鍵尺寸可以快速且穩定地達到製程規格的目標值, 以提升製程之穩定度。

關鍵詞：深溝多晶遮罩開口製程、關鍵尺寸、迴歸分析法、指數權重移動平均控制器。

# Advanced Process Control in Deep Trench Poly Hard Mask Open Etch Process

Student : Chi-Yeh Huang

Advisor: Dr. An-Chen Lee

Degree Program of Automation and Precision Engineering  
National Chiao Tung University College of Engineering

## Abstract



**This study proposes an Advanced Process Control (APC) method to control the critical dimension (CD) of Deep Trench Poly Hard Mask Open (DTPHMO) process. The correlation analysis method and regression analysis method are used to build up the prediction model between input recipes and system outputs. The measurements of pre-process and post-process are adopted to adjust the input recipes by using the feed forward and exponential weighted moving average (FF+EWMA). Results show that the critical dimension converges fast and stably to the target value. The stability of process is also increased.**

**Keyword: Deep Trench Poly Hard Mask Open; critical dimension; regression analysis; exponential weighted moving average.**

## 致 謝

能夠完成這篇論文並取得碩士學位，首先要感謝我的指導教授李安謙博士在我就讀在職專班的這些日子以來指導我，提供我許多控制器設計、模擬、實驗驗證的協助與指正，也感謝中華大學的陳俊宏與謝曜式兩位教授擔任我的口試委員，於口試時對於論文修改提供諸多寶貴的意見與建議，並指導論文的修改與補充，使本論文能夠更完整與順利完成。

感謝李安謙實驗室的博士班同學郭子瑋、李德修、吳健峰與在職專班曹洪泰、洪志明學長，陳文燦同學以及學弟們在我撰寫論文的這段期間，指導我論文的寫作與實驗的設計、模擬，並一路給予支持、鼓勵，有你們的協助我的論文才能夠成形。

我也要感謝在華亞科的同事們，資程、學成、婉文、亦園，感謝你們協助我資料蒐集、撰寫模擬程式、提供建議，使我的模擬與實驗能夠順利進行。

另外我要感謝嘉珮讓我有足夠的動機與信心就讀在職專班，謝謝妳在我求學的這一路上不斷的給予我支持與鼓勵並陪伴著我完成學業。

最後將本論文獻我的父母親與家人，感謝你們不斷得給我支持、鼓勵與諒解，讓我能沒有顧忌的完成學業。

祝福所有的師長、同學、同事、朋友們，在未來的日子裡能夠健康、順利、快樂、成功，感謝你們在我這一生當中相當重要的階段裡陪伴我走過。

# 目 錄

第一章	緒論	1
1.1.	研究動機	1
1.2.	研究目的	2
1.3.	文獻回顧	3
1.4.	研究方法	5
1.4.1.	步驟一：資料收集與相關性分析	5
1.4.2.	步驟二：迴歸分析與製程模型的建立	6
1.4.3.	步驟三：設定製程參數與係數規格上下限	6
1.4.4.	步驟四：補償及回饋機制	6
1.4.5.	步驟五：資料模擬與相關係數的計算	7
1.4.6.	步驟六：實驗結果驗證	7
1.5.	本文組織架構	7
第二章	深溝多晶遮罩開口製程與量測介紹	8
2.1.	微影製程	8
2.2.	深溝微影製程	10
2.3.	蝕刻製程	12
2.3.1.	深溝多晶遮罩開口蝕刻製程機台介紹	15
2.3.2.	深溝多晶遮罩開口之蝕刻製程	16
2.4.	關鍵尺寸量測介紹	18
2.4.1.	量測機台與原理	18
2.4.2.	深溝微影量測與深溝多晶遮罩開口量測	20
第三章	製程控制之系統架構	22
3.1.	晶圓廠 Run-to-Run 控制之系統整合架構	22
3.2.	DTPHMO R2R 之系統規劃	25
第四章	研究方法與步驟	28
4.1.	資料蒐集與相關性分析	28
4.2.	迴歸分析法	30
4.3.	製程參數與相關係數規格上下限設定	32
4.4.	補償及回饋控制機制	34
4.4.1.	EWMA 控制方法	35
4.4.2.	FF + EWMA 控制器在深溝多晶遮罩開口製程上之建立	36

4.4.3.	FF + EWMA 控制方法在深溝多晶遮罩開口製程上實作.....	38
第五章	模擬結果與實驗驗證.....	39
5.1.	模擬結果.....	39
5.2.	實驗驗證.....	45
第六章	結論與未來研究之建議.....	47
6.1.	結論.....	47
6.2.	未來研究之建議.....	48
參考文獻	.....	49



# 圖目錄

圖 1-1 深溝多晶遮罩開口 R2R 研究流程圖 .....	5
圖 2-1 正片(1)與負片(2)等兩種不同的微影製程的差別 .....	9
圖 2-2 定位偏移.....	9
圖 2-3 影響關鍵尺寸的類型.....	10
圖 2-4 深溝微影圖案轉移.....	11
圖 2-5 駐波效應(Standing Wave Effect) .....	12
圖 2-6 乾式蝕刻示意圖.....	14
圖 2-7 等向性蝕刻與非等向性蝕刻.....	14
圖 2-8 乾式蝕刻機台 AMAT Centura DPS II 機台圖 .....	15
圖 2-9 深溝(Deep Trench)電容結構圖 .....	15
圖 2-10 深溝多晶遮罩開口蝕刻.....	16
圖 2-11 深溝氧化層遮罩開口蝕刻.....	16
圖 2-12 深溝蝕刻製程最終結構.....	17
圖 2-13 掃描式電子顯微鏡 CD SEM (Scanning Electron Microscopes) .....	18
圖 2-14 掃描式電子顯微鏡成像示意圖.....	19
圖 2-15 深溝微影與深溝多晶遮罩開口蝕刻量測.....	20
圖 3-1 FAB R2R 系統架構之示意圖.....	22
圖 3-2 資料流與晶圓製造流程示意圖.....	24
圖 3-3 深溝多晶遮罩開口各製程步驟與 R2R 控制器資料流關係圖 .....	25
圖 4-1 DTPHMO R2R 控制方法研究流程圖.....	28
圖 4-2 EWMA 控制方法功能流程圖 .....	35
圖 4-3 深溝多晶遮罩開口製程控制器略圖.....	38
圖 5-1 歷史資料的深溝微影製程 CD 值、深溝多晶遮罩開口 CD 值與氧氣流量關係圖.....	39
圖 5-2 實際干擾與權重為 0.13 時的預測干擾比較.....	40
圖 5-3 實際干擾與權重為 0.78 時的預測干擾比較.....	40



圖 5-4 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 1).....	42
圖 5-5 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 2).....	42
圖 5-6 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 3).....	42
圖 5-7 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 1).....	43
圖 5-8 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 2).....	43
圖 5-9 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 3).....	43
圖 5-10 三種條件下模擬不同權重的均方差比較.....	44
圖 5-11 兩種控制條件下量測值與目標值的差(CD Bias).....	45
圖 5-12 兩種控制條件下的製程能力指標與綜合製程參考指標(cp/cpk).....	46
圖 5-13 兩種控制條件下的均方差(MSE)比較.....	46



## 表 目 錄

表 4-1 各個相關製程參數間的關係性.....	29
表 4-2 迴歸分析統計輸出摘要.....	32
表 4-3 製程參數與相關係數的規格上下限設定.....	33
表 5-1 兩種不同權重下預測干擾之 MSE 比較表 .....	41



# 第一章 緒論

## 1.1. 研究動機


隨著電子科技產品的日新月異，如何提高晶圓廠的產能與降低製程的的關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)，便成為了晶圓製造廠最主要降低成本的方法，此時如何改善生產線的製程控制，以提升產品的良率便成為了主要的研究課題，因此生產線上的製程控制(Process Control)便受到晶圓製造業者相當的重視。

DRAM(動態隨機存取記憶體)產品的應用也越來越廣泛，DRAM產品為了能夠提供較大的電容容量，在製程構造上目前可區分為兩大主流，堆疊式(Stack)構造與溝槽式(Trench)構造等兩大類別，其中又以溝槽式DRAM的單位面積較小，可以在相同的晶圓尺寸上產出較多的顆粒(Chips)，在溝槽式DRAM中的電容，便是以深溝(Deep Trench)的結構作為電容，溝槽的深度愈深，則電容量愈大，以目前的製程能力而言，溝槽式製程的深溝深度約為6~8微米(Micrometer,  $\mu m$ )，而欲達到此要求，深溝多晶遮罩開口製程(Deep Trench Poly Hard Mask Open, DTPHMO)便顯得格外重要，因為DTPHMO製程可以說是整個深溝製程結構的最初製程，後續的深溝結構皆是依據DTPHMO製程所定義出來，而DTPHMO的關鍵尺寸大小，則影響了後續的深溝孔徑大小。為了控制恰當的深溝孔徑，便需要穩定的製程以及合適的製程控制方法，若是無法控制適當的深溝孔徑大小，則後續的製程做得再好都會因為電容的容量不足或是漏電(Leakage)而功虧一簣。

影響DTPHMO的孔徑大小主要係來自於微影製程與蝕刻製程，當微影製程控制的關鍵尺寸在某一規格範圍後，蝕刻製程除了要將孔徑的大小控制在某一穩定的製程規格之外，還需要消彌不同微影機台之間的差異性與微影製程偶爾發生的規格不良，以使得最終的DTPHMO的孔徑可以在製程規格中心，因為後續的製程皆是以DTPHMO的開口大小作為基礎。

## 1.2. 研究目的

對於DRAM半導體的溝槽式製程而言，DTPHMO蝕刻製程技術是決定深溝孔徑的CD是否能維持在適當的製程規格內最重要的關鍵製程之一，而微影製程的穩定性與蝕刻製程的穩定控制製程參數便顯得相對的重要。本論文主要目的是設計一套適用於DTPHMO製程CD控制的先進製程控制(Advanced Process Control, APC)之批次控制器(Run-to-Run controller)，利用深溝微影製程量測(Deep Trench Litho Critical Dimension, DT Litho CD)的輸出結果作為前饋(Feed-Forward)項目和深溝多晶遮罩開口製程量測(Deep Trench Poly Hard Mask Open Critical Dimension, DTPHMO CD)的輸出結果作為回饋(Feedback)項目，藉由這兩個控制區塊控制蝕刻製程的氣體流量，以達到改善DTPHMO CD之穩定性與準確性，使其可進一步提供後續製程較佳的製程參考基礎。其主要的功能大致如下：

- 
- 一、設計一控制方法來過濾並消除因隨機誤差的干擾所造成錯誤的調整，以避免使原本沒有發生偏移的製程產生偏移。
  - 二、針對實際製程會有不同大小的偏移及漂移干擾，提供一套適合的回饋控制法來達到快速的補償與控制，使製程所受到干擾的影響降至最低。
  - 三、當前製程(Pre-Process)發生重大變異，使得深溝微影製程量測結果嚴重偏離製程規格中心時，仍能夠透過批次控制(R2R Control)方法，調整蝕刻製程的氣體流量將DTPHMO CD的量測結果修正回製程規格中心。

本論文主要目的為研究一套，可以穩定控制且可以動態調整，因為微影製程與蝕刻製程的漂移或是異常事件的發生造成規格不佳的關鍵尺寸，使其可以有效的控制關鍵尺寸大小，期能在DT Litho CD量測和DTPHMO CD量測察覺到CD發生偏移(Shift)或是漂移(Drift)的時候，加以控制蝕刻時的氣體流量，讓DTPHMO的蝕刻製程能夠應付微影製程所發生的漂移與偏移，且能夠降低蝕刻製程本身的製程漂移與偏移，使得產品的CD能夠修正到製程規格的中心，以求有較接近製程規格中心的關鍵尺寸，降低後續製程因為前

製程不佳而需要修正規格的幅度與困難度。

批次控制(R2R)目前已經廣泛的運用在半導體的生產製程上，如微影(Lithography)製程、蝕刻(Etching)製程、化學機械研磨(Cheical Mechanical Polishing, CMP)製程、沉積(Deposition)製程等。近來也逐漸推廣到光電產業的TFT-LCD產業，相信未來R2R可以應用的領域將會愈來愈廣。

### 1.3. 文獻回顧

半導體晶圓廠的晶圓(Wafer)生產過程是以一個又一個的批次進入各個生產站點，如同傳統工業的生產線一般，進行著反覆的薄膜沉積、曝光顯影、蝕刻、濺鍍、研磨、離子植入與清洗等程序。由於生產製程同時會存在著漂移與偏移的現象，近年來已有許多學術研究在探討如何發展出更有效的製程控制方法。

近年來，多位統計學者相繼提出許多相關於製程控制演算法的理論與研究。1976年Box和Jenkin [1]提出了時間序列分析-預測與控制(Time Series Analysis- Forecasting and Control) EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)控制器的理論；EWMA控制器是將輸出值與目標值的差距，依其時點與現今時點的不同，給予不同的權重，此權重是呈現一遞減的幾何分配，亦即距現今時點越近的資料點，所給予的資料點權重就越大。

1993年Ingolfsson and Sachs [2]提出 Single EWMA 控制器來調整製程設定，並討論製程產出之穩定性與敏感度研究。

1995年Sachs and Ingolfsson [3]提出了APC的相關研究，認為傳統的統計製程管制(Statistical Process Control, SPC)系統只會偵測製程的異常，卻不會自動採取適當地矯正措施，而回饋控制不斷地調整輸入的製程參數，使量測值和目標值的差距逐漸縮小，但卻可能造成過度控制，反而增加製程的變異；而針對IC產業的特殊生產型態，提出了R2R的概念。R2R結合了前饋控制(Feed-Forward control)與回饋控制(Feedback control)，利用前製程與後製程的量測資料並參考歷史資料來計算下一批次製程的參數設定，可以降低因為機台之間的變異、機台的漂移、製程的偏移等條件的改變所造成的製程變異，因此R2R是未來製程控制的發展趨勢。

到了1997年Smith和Boning [4]提出自我調整控制方法，探討在CMP製程中研磨率 (Polishing Rate)與不均勻度(Non-Uniformity)會產生的漂移現象，利用類神經網路計算當時期漂移與雜訊值來修正EWMA的權值，再利用EWMA控制器修正漂移現象，這些學者都提出了如何使用EWMA來改善製程上的輸出結果；1997年Castillo and Hurwitz [5]對R2R控制方法做有系統的回顧，並在Single-Input-Single-Output (SISO)製程模型中提出自我調整控制器(self-tuning controller)來調整投入參數，且討論在不同製程干擾下，採用自我調整控制器的穩定性質。

1998年Castillo et al. [6]提出了一種適合線性與非線性半導體製程的R2R最佳化控制器，針對半導體製程當中的線性製程與非線性製程，提出了適合R2R控制器的最佳化方法。

1999年Guo et al. [7]更提出了一種能夠偵測並使用修正權值方法，使發生大偏移製程能快速回到穩定狀態的Self-Tuning EWMA控制器。經由蒙地卡羅模擬大偏移及漂移狀況驗證後，證明能有效處理製程中所發生的偏移及漂移現象。

2001年Christopher Gould [8]提出一個完整的微影製程的批次控制的理論架構，包含回饋、前饋及前饋與回饋結合(FF/FB Combination)三種控制模組，分別由四個區塊所組成；Wafer進入微影製程，製程(Process)結束後；由量測機台(Measurement tool)量取後測結果，再將後測結果傳入控制器中，計算實際結果與目標值之差異，並求出最佳建議參數；最後將所得到的參數回饋至下一批次之製程配方(Process Recipe)中，此即為回饋控制模組。

2002年Christopher Gould [9]再提出一個結合Fault Detection Classification (FDC)及R2R)的先進微影製程管制方法，其中針對關鍵尺寸的R2R控制部份，乃利用EWMA控制理論來做為回饋控制的方法。但此控制方法只能針對小的製程偏移作有效的控制，對於大的偏移，則無法有效的控制。

2002年Tseng, Chou and Lee[10]針對MIMO(Multi-Input- Multi -Output)製程和兩種常見製程干擾 (white noise及IMA(1,1))下，如何採用Single EWMA 控制器來調整投入參數，並探討製程的穩定性和敏感度分析。同年Tseng, Chou and Lee[11]繼續提出針對具有

線性漂移現象的SISO系統，在製程干擾為ARIMA(p,d,q)下，提出Double EWMA控制器的產出公式以及穩定條件；並在重製率(Rework Rate)極小化準則下，討論此控制器之最適權重。

在國內也有2001年詹韻玉[12]在SISO模型中，針對不同的製程干擾模型和要求有限批量之總均方差 (Total Mean Square Error)極小化的限制下，如何決定 Single EWMA 控制器之最適權重。

## 1.4. 研究方法

本篇研究概分成下述六個主要步驟進行研究，並如下圖1-1所示，

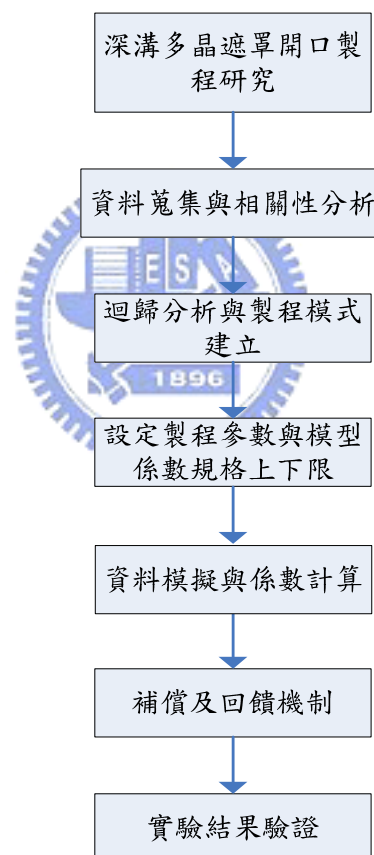


圖 1-1 深溝多晶遮罩開口 R2R 研究流程圖

### 1.4.1. 步驟一：資料收集與相關性分析

以深溝多晶遮罩開口製程中最關鍵之蝕刻機台來做為研究的對象。首先，收集生產線上的前製程與後製程的量測資料，以及製程機台的可調變製程參數，利用相關性分析

法找出蝕刻機台製程配方中可供調整的製程輸入參數，找出蝕刻製程的可調整製程參數與DTPHMO CD之間的關係。

#### 1.4.2. 步驟二：迴歸分析與製程模型的建立

利用步驟一所找出的關係建立製程模型的關係，利用迴歸分析法建立投入變數與產出變數的輸入與輸出模型，挑出適當的輸入與輸出模型參數並求出各個參數所需的相關係數值，據此建立FF + EWMA製程模型，用以模擬與實作。

#### 1.4.3. 步驟三：設定製程參數與係數規格上下限

根據產品的前製程規格(DT Litho CD)、後製程規格(DTPHMO CD)與製程配方參數(Recipe Parameter)對產品後製程規格的敏感度來訂定製程配方參數規格的上下界限，同時設定控制器所需之相關係數與每次調整製程參數的最大與最小幅度，以降低過度修正或是修正不足的現象。



#### 1.4.4. 步驟四：補償及回饋機制

建立EWMA的更新模型(EWMA Update Model)，動態地根據DT Litho CD結果與製程站點的氧氣流量，搭配DTPHMO CD的回饋，隨時修正下一個Lot所要使用的製程配方參數值。同時預測未來應用於生產線上效能，以了解模型的功能與正確性。此步驟係為了定期自動計算與更新EWMA 控制器所需要的相關係數，當機台發生故障或是例行性的保養時，會伴隨發生相關部品與耗材的更新或汰換，或是機台的相關製程參數都會隨著時間而有不盡相同的製程表現，因此設計了讓EWMA控制器可以有兩種更新模型。

- 一、在發現機台做了例行性的保養或是維修之後，藉由接收製程機台所報出的相關機台常數，如 RF hour、Chamber used wafer count，以被歸零或重新設定作為判斷依據，讓 EWMA 控制器可以將相關的 EWMA 係數還原成初始設定值，再重新開始從事生產。



二、當製程機台連續生產特定批次數量之後，將啟用 EWMA 自動更新機制，以使製程機台能夠隨時依據最近的特定批次數量作 EWMA 相關係數的定期更新。

#### 1.4.5. 步驟五：資料模擬與相關係數的計算

利用步驟一所得到的歷史量測資料，DT Litho CD與DTPHMO CD與歷史製程配方參數等資料帶入步驟二所建立的模型進行模擬，以計算出EWMA所需使用到的相關係數(Coefficients)。

#### 1.4.6. 步驟六：實驗結果驗證

比較在相同機台上、相同期間內，使用R2R控制與沒有使用R2R控制所生產出來的產品，或是比較在相同期間內使用不同的製程機台使用R2R控制與沒有使用R2R控制所生產出來的產品，在深DTPHMO CD的表現上，是否有較接近製程規格目標值與較小的變異程度。



### 1.5. 本文組織架構

本文共分六章，第一章緒論，說明了研究動機，研究目的、文獻回顧與研究方法等；第二章深溝多晶遮罩開口製程與量測介紹，分別對微影製程、深溝微影製程、蝕刻製程、DTPHMO製程機台、DTPHMO製程以及關鍵尺寸量測介紹、量測機台與原理、DT Litho量測與DTPHMO量測作說明；第三章製程控制之系統架構，包含了晶圓廠R2R控制之系統整合架構、DTPHMO製程R2R之系統規劃等章節；第四章研究方法與步驟，說明了資料蒐集與相關性分析、迴歸分析法、製程配方參數與相關係數規格上下限設定、補償及回饋機制並分別說明基礎EWMA控制方法、FF + EWMA控制器在DTPHMO製程上之建立、以及FF + EWMA控制方法在DTPHMO製程上實作等；第五章模擬結果與實驗驗證，說明如何以控制器模擬實際的製程模型以及透過實驗來驗證模擬的結果；第六章結論與未來研究的建議，對本研究提出結論，並對提出可供未來進行相關研究的注意方向。

## 第二章 深溝多晶遮罩開口製程與量測介紹

在半導體製程當中，微影製程與蝕刻製程經常是前後製程的關係，其目的係為了達成圖案轉移的目的；當微影製程藉由光罩將圖案定義在光阻上，便需要蝕刻製程將光阻上面的圖案再一次的定義到薄膜上，此一過程稱為圖案轉移，在這個圖案轉移的步驟裡，微影製程所定義在光阻的圖案與蝕刻製程所定義在薄膜上的圖案，除了圖樣的愈近似之外，關鍵尺寸的規格也要愈近似愈好。[13]

本章將針對與DTPHMO製程相關的微影製程、蝕刻製程以及深溝開口的孔徑量測依序作說明。在下面的章節將逐一介紹微影製程概要、DT Litho製程、蝕刻製程概要，DTPHMO製程概要，當中將會分別說明深溝多晶遮罩開口製程所使用的設備和深溝多晶遮罩開口製程的介紹；最後將介紹深溝製程量測，包含了量測機台設備與原理、量測機台在本研究當中DT Litho CD量測和DTPHMO CD量測的應用介紹等。

### 2.1. 微影製程

微影(Photolithography)，為半導體製程中，最關鍵的步驟之一[14]。通常以一個製程所需要的微影次數，或是所需要的光罩(Reticle)數量，來表示這個製程的難易程度，業界常以工廠的微影製程能力(指最小線寬或關鍵尺寸)，來評斷工廠的技術層次。微影製程技術的基本原理為在晶片的表面上覆上一層感光材料(Photo-Sensitive Material)，來自光源(Light Source)的平行光，經過以玻璃為主體的光罩後，便打在這層感光材料得以進行選擇性的(Selective)感光，於是光罩上的圖案，便完整的轉移(Transfer)到晶片表面的感光材料上了，這個步驟稱之為曝光(Exposure)，晶片曝光之後便可以移除不必要的光阻，這一連續的製程便稱為微影製程。

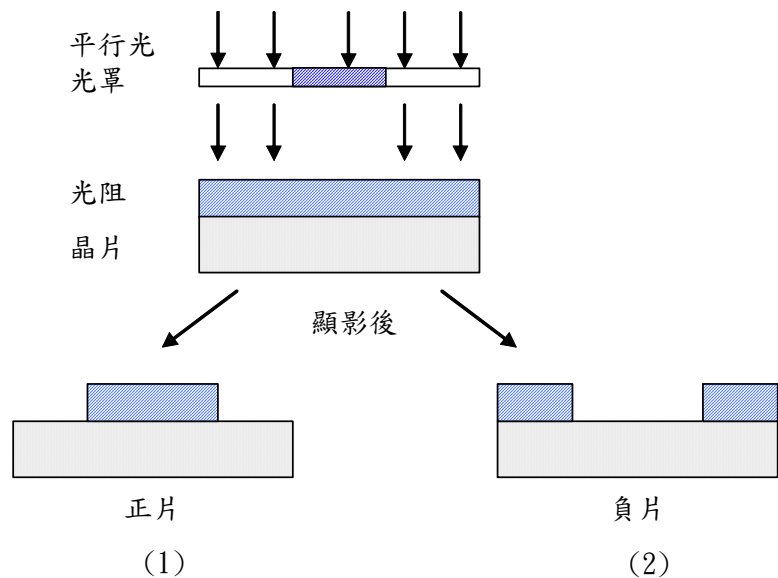


圖 2-1 正片(1)與負片(2)等兩種不同的微影製程的差別

進行曝光的方式主要有兩種：一種稱為正片(Positive)；一種稱為負片(Negative)。假如曝光之後，經過顯影(Deposition)，感光材料所獲得的圖案與光罩上的相同，這種圖案轉移(Pattern Transfer)的方式便稱為正片；反之，如果彼此剛好呈互補(Complementary)，則稱為負片，如圖2-1。而這層覆蓋在晶片表面上的感光材料則稱為光阻(Photo-resist)。

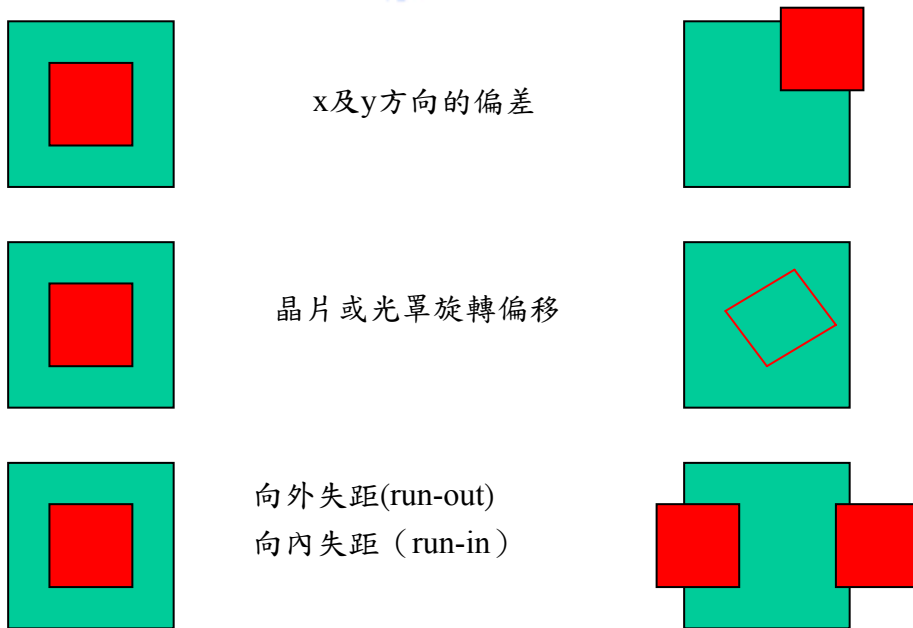


圖 2-2 定位偏移

由於在微影製程當中，現今大多採用非接觸式光罩，再加上微影製程原來就有的定位(Alignment)與重疊(Overlaying)問題，常見的晶片與光罩定位與重疊偏移如圖2-2所示，這將會影響到微影製程本身的量測結果是否與落在規格範圍之中，以及後續的蝕刻製程的量測結果是否與落在規格範圍之中，微影製程在這裡扮演著非常重要的角色。

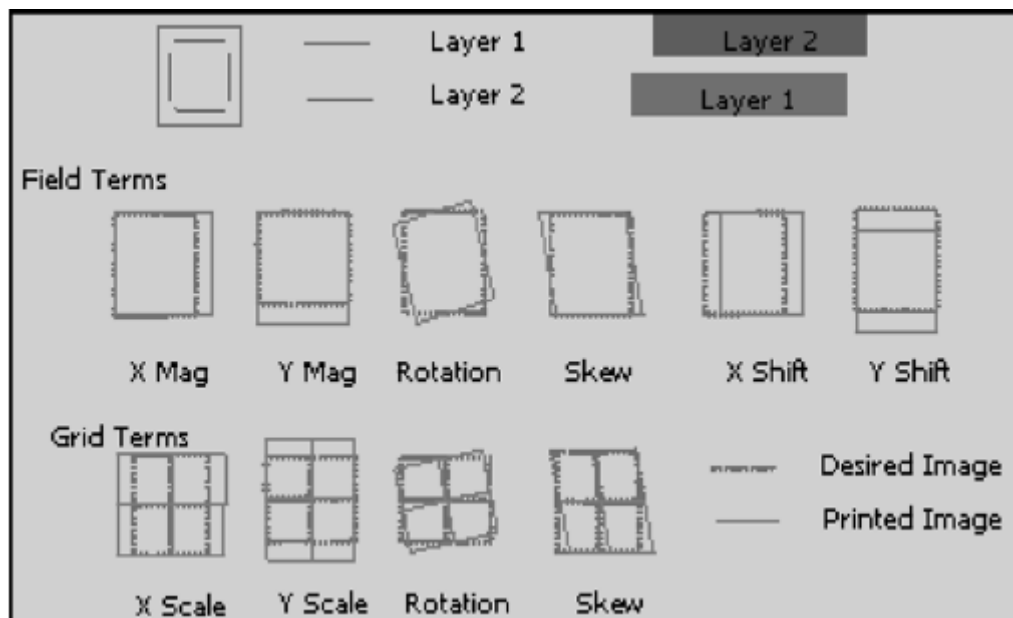


圖 2-3 影響關鍵尺寸的類型

在微影製程中常見有十種影響到關鍵尺寸的大小[15]，分別可以區分為Field與Grid兩大類，在單一區塊(Field)當中有X方向的擴大(X-magnification)、Y方向的擴大(Y-magnification)、旋轉(Rotation)、偏斜(Skew)、X方向平移(X-Shift)與Y方向平移(Y-Shift)等；在格子化(Grid)當中又有X方向的比例(X-Scale)、Y方向的比例(Y-Scale)、旋轉與偏斜等，如圖2-3所示，這些都會影響到微影製程本身的量測結果是否落在規格範圍之中，以及後續的蝕刻製程的量測結果是否也落在規格範圍之中，也就是說在微影製程控制的不好，將會造成蝕刻製程CD與圖案轉移不佳的表現。

## 2.2. 深溝微影製程

在DT Litho製程當中，由於是溝槽式DRAM的第一道微影製程，因此後續的微影製程皆需要以深溝微影的定位點(Alignment Mark)為準，以作為後續微影製程的定位基準，因此在深溝微影製程中可以不考慮定位點的問題，但是仍需要考慮關鍵尺寸大小是否落在製程規格範圍內的問題。

多晶遮罩製程適用於蝕刻製程的選擇比(Selectivity)較為接近的製程，或是阻抗層厚度不足以保護欲保留下來的材質與結構，而可能會傷及欲保留下來的材質與圖樣結構或是因為蝕刻時的反應氣體對不同材質薄膜之間選擇比考量時，便需要先行成長一層額外的異質阻抗層，待完成期望的圖樣轉移(Pattern Transfer)且定義出圖樣的尺寸大小、形狀之後，再予以移除阻抗層。多晶遮罩與一般的微影製程後所留下來的光阻功用相當近似，都是用來當作保護層，其與光阻最大的不同是材質並非經曝光、顯影、烘烤後的光阻，而是由薄膜製程所沉積的異質材料，這層異質材料的主要功用便是作為後續遮罩孔徑的基準。此一製程係先行以薄膜沉積的方式沉積一層或是多層的犧牲層，待圖樣轉移完成後再將犧牲層予以移除，而殘留下來的薄膜結構則成為遮罩，後續的製程便以此遮罩的圖樣作為保護圖樣與定義尺寸，對未受遮罩保護的區域進行深溝製程的蝕刻，而完成製程所需的元件構造或是恰當的製程深度。

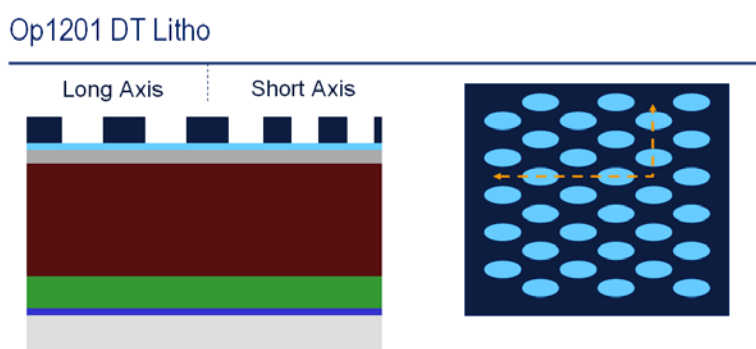


圖 2-4 深溝微影圖案轉移

深溝多晶遮罩微影製程主要是將光罩上的圖樣忠實的轉移到光阻上，使其下方的抗反射塗佈層(Anti-reflection Coating, ARC)與Un-doped Poly層能被後續的蝕刻製程依據光阻所定義出來的圖案(如圖2-4所示)，再做一次圖案轉移的動作。

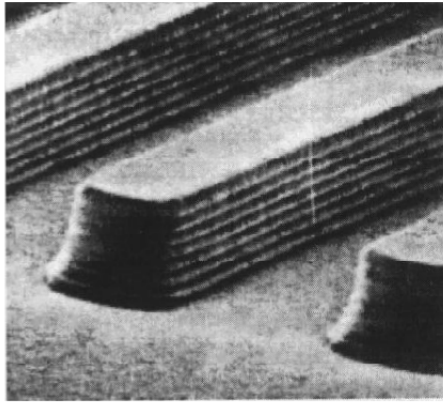


圖 2-5 駐波效應(Standing Wave Effect)

抗反射塗佈層為光阻與其下層薄膜材質之間的介質層，其主要作用有二[16]：

- 一、用來作為增加光阻與其下層薄膜材質的黏著性(Adhesion)，抗反射塗佈層使得光阻能夠與下層材質薄膜緊密的黏接，當光阻在經過烘烤的過程當中仍然能夠與下方的下層材質薄膜緊密的結合，而不致發生變形或剝離現象。
- 二、降低光源的反射波所造成駐波效應(Standing Wave Effect)，駐波為頻率、波長與振幅皆相同的兩週期波，反向行進，會合後可能會產生一連串之節點，節點間之波只作週期性漲落，不再行進的現象。在微影製程當中，主要是來自於光源通過介層時因為光源的入射波與反射波的頻率、波長、振幅皆相同的兩週期波所造成之重疊干擾，所形成的規則且重複性的鋸齒狀表面，駐波效應如圖2-5所示。

### 2.3. 蝕刻製程

在電漿的環境中，含有大量的活性自由基(reactive radical，為中性的原子或是分子物)及帶電荷離子，可以和被蝕刻物進行化學腐蝕反應，而正離子在蝕刻物表面產生垂直撞擊的效果，可以加速蝕刻物垂直方向蝕刻率，而達到特定方向蝕刻的結果，業界目前現多採用乾式及電漿式蝕刻製程。

電漿蝕刻係應用於關鍵的電路定義步驟(Critical circuit-defining step)，且為半導體業中最常被使用到的製程，在開始蝕刻之前必須先經過微影製程，晶圓的表面上將被塗佈

一層的光阻並曝光以定義出電路的圖樣，蝕刻的製程步驟將只會移除光阻圖樣所指定移除的區域。

電漿蝕刻係利用電場與反應性氣體，例如氟(F)或是氯(Cl)化合物氣體在反應腔體(Chamber)中，將反應氣體的分子解離成對薄膜材質具有反應性的離子，然後藉著離子與暴露在晶圓表面上的薄膜材質產生化學反應與離子轟擊，把暴露在電漿下的薄膜，反應成揮發性的生成物，而後被真空系統抽離，以達到快速的圖案轉移，再將光阻圖樣所指定的區域材料移除，它的優點是能夠快速且能形成幾近完美的垂直輪廓。

蝕刻製程的主要指標是蝕刻速率(Etching Rate, ER)，其單位為每單位時間的蝕刻深度，蝕刻速率由圖2-6中反應最慢的步驟而決定。通常一個製造環境最好能有較高的蝕刻速率，然而若蝕刻速率太高，可能會使製程變得難以控制。一般希望的蝕刻速率為每分鐘數百至數千埃(Å)。蝕刻的速率越快，表示單位時間內的產能越大，對蝕刻時間的控制也就相對的敏感，在較小的蝕刻時間差異便能產生較大的蝕刻深度差異，即製程較不易控制；次要的指標則有選擇比與均勻性(Uniformity)，選擇比為不同的材料之蝕刻速率的比，也就是說，蝕刻製程對被蝕刻薄膜及其他材質，如光阻和底材的蝕刻速率的蝕刻率比值。選擇比越高，表示蝕刻大都在被蝕刻材質上進行，例如光阻相對於欲蝕刻之薄膜層的蝕刻速率。若我們說一特殊製程對於多晶矽及氧化層的選擇比為20:1，即意味著多晶矽的蝕刻速率較氧化層20倍。普遍來說，濕式蝕刻的選擇比較乾式蝕刻的選擇比為大，換句話說，使用乾式蝕刻法進行薄膜蝕刻時，雖然可以獲得相當準確的圖案轉移，但是卻必須犧牲部分蝕刻的選擇比能力。均勻性的計算是根據蝕刻速率的百分比變化，常會引用一整片晶片之間(Within Wafer)甚至是晶片與晶片之間(Wafer to Wafer, Within Lot)的資料，蝕刻的均勻性越高，則代表晶片品質的控制越完善晶片的良率也就越好。

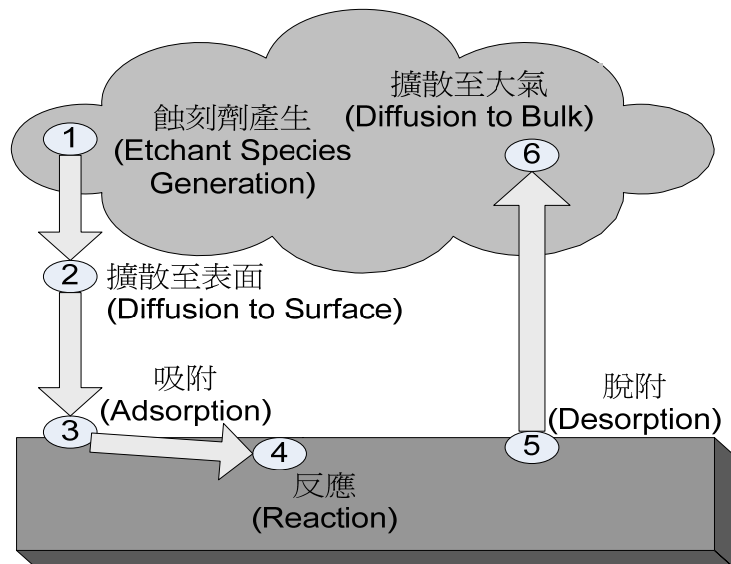


圖 2-6 乾式蝕刻示意圖

電漿蝕刻製程的進行，必須包含下述六項步驟，如圖2-6所示。首先，供應至反應室中的氣體必須被電漿破壞成化學上的活性物種，這些物種必須擴散至晶片的表面並被吸附。一旦這些物種存在於晶片的表面上，則可能會在晶片表面上移動(表面擴散)直到與暴露出來的薄膜起反應。反應後的產物必須要解除吸附並從晶片表面擴散離開，在以氣體流運離蝕刻反應室，蝕刻速率則由這些步驟最慢的一個來決定。

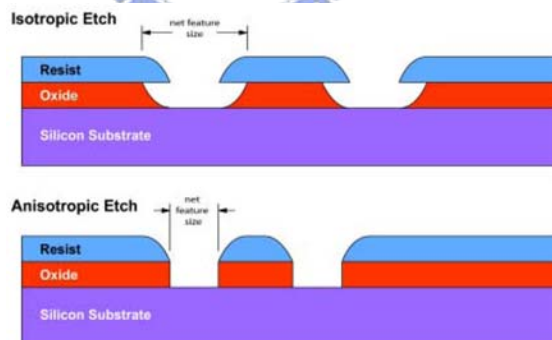


圖 2-7 等向性蝕刻與非等向性蝕刻

乾式蝕刻的最主要優點就是可以進行非等向性蝕刻，等向性蝕刻與非等向性蝕刻如圖2-7所示。因此乾蝕刻的設計與操作的首要，便擺在如何使得乾蝕刻在垂直(Vertical)方向上的蝕刻速率大於水平方向上的蝕刻速率，以便使薄膜經蝕刻之後所轉移的圖案與光罩上的原圖案相同，並減低底切(Undercut)現象發生的可能性。不過，因為乾蝕刻的非等



向性主要是利用粒子轟擊的物理現象來進行的，這種粒子轟擊的現象，不但可以在被蝕刻的薄膜上進行，也可以在光阻上發生。也就是說，粒子將是同時對晶片上的光阻及裸露出的薄膜執行蝕刻的，所以其選擇比將會較濕式蝕刻還來的差。

### 2.3.1. 深溝多晶遮罩開口蝕刻製程機台介紹

本論文之深溝多晶開口蝕刻製程機台係使用美商應用材料(Applied Materials)所生產的Centura DPS II 之乾式電漿(Plasma)蝕刻機台，如圖2-8所示

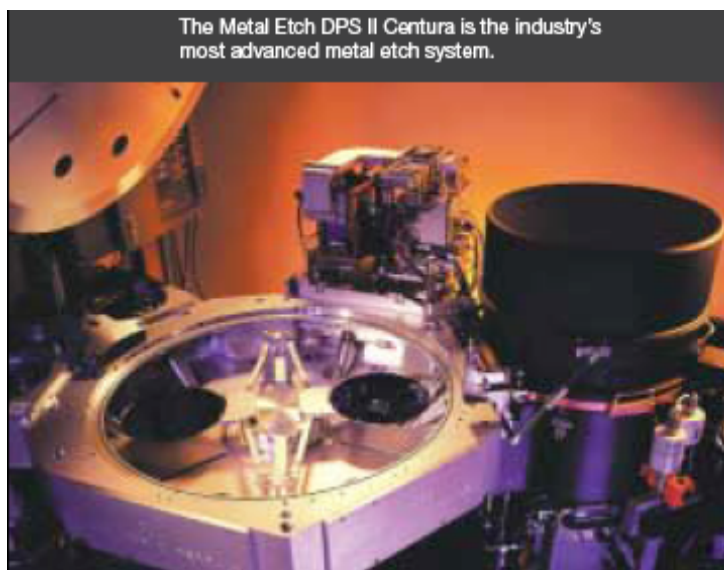


圖 2-8 乾式蝕刻機台 AMAT Centura DPS II 機台圖

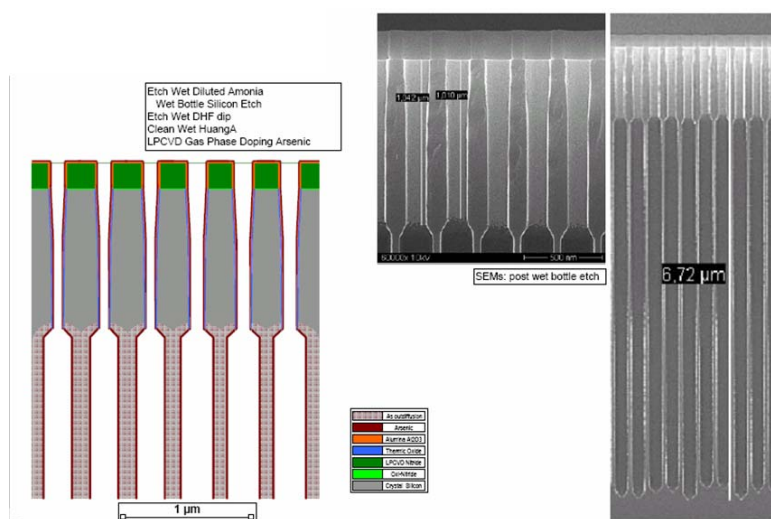


圖 2-9 深溝(Deep Trench)電容結構圖

Centura DPS II機台目前係業界較為廣泛使用於的機型，本製程當中係以Centura DPS II機台用來移除多晶矽(Poly silicon)材質，作為底層BSG(硼矽玻璃Boron Silicon Glass)的遮罩層(Hard Mask)，以利後續的製程能夠蝕刻出深達6~8 $\mu\text{m}$ 的深溝(Deep Trench)如圖2-9所示。

### 2.3.2. 深溝多晶遮罩開口之蝕刻製程

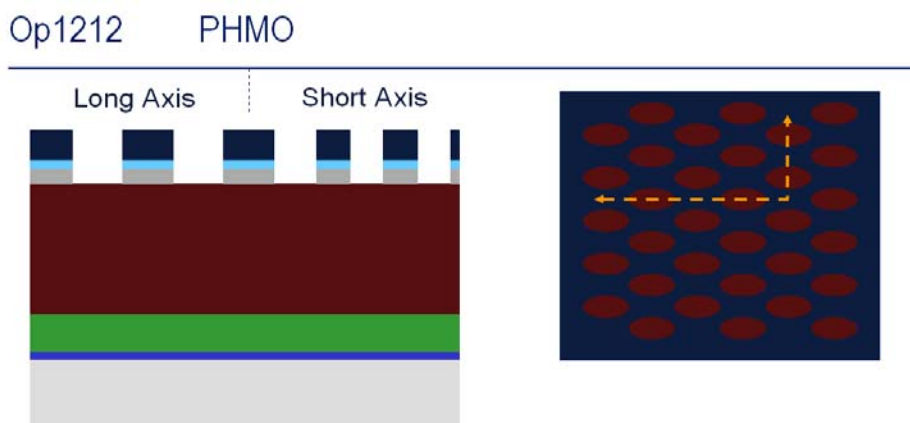


圖 2-10 深溝多晶遮罩開口蝕刻

深溝多晶遮罩開口之蝕刻製程主要是將深溝微影製程在光阻上所完成的圖樣，轉移到光阻下方的抗反射塗佈層與下方的Un-doped Poly薄膜，作圖案轉移的動作，使光阻所定義的圖案轉移到Un-Doped Poly薄膜上(如圖2-10所示)。

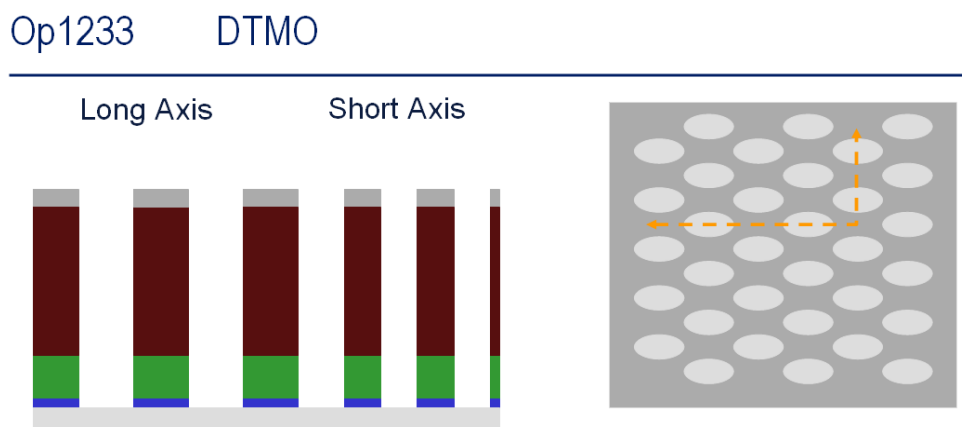


圖 2-11 深溝氧化層遮罩開口蝕刻

此一遮罩開口之蝕刻製程，稱之DTPHMO製程，在這個製程步驟上，深溝微影製程所定義出來的關鍵尺寸與深溝多晶遮罩開口製程所定義出來的關鍵尺寸，需要被限制在一定的製程規格之內，而其主要的功能便是使得Un-Doped Poly薄膜成為後續蝕刻製程的遮罩，如圖2-11所示。

Op1260

DT Etch

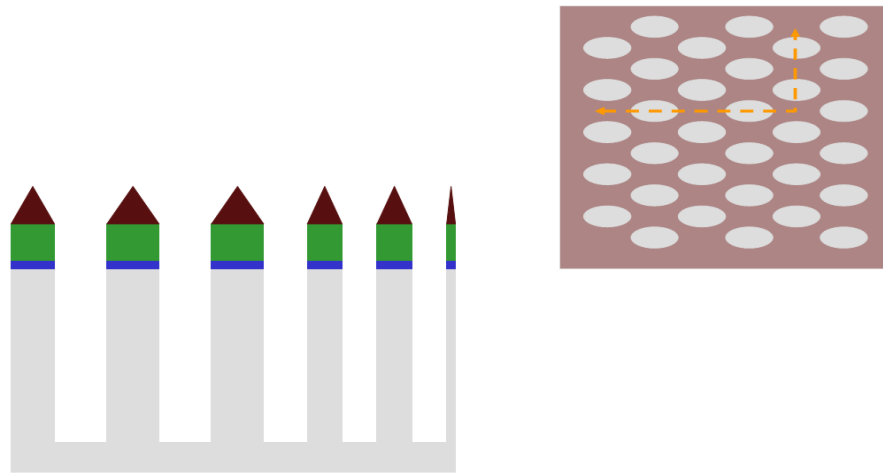


圖 2-12 深溝蝕刻製程最終結構

此遮罩與光阻曝光顯影之後的圖案相同，並將在後續的製程遭到移除，如圖2-12所示。

在製程的掌握上，需要了解蝕刻製程需要控制的相關參數，諸如製程的壓力、溫度、氣體流量、功率等，並要以蝕刻前薄膜的厚度減去蝕刻後的殘膜厚度再除以蝕刻時所花費的時間而計算出蝕刻時的蝕刻速率，或是以蝕刻之後的溝槽深度除以蝕刻時所花費的時間而計算出蝕刻時的蝕刻率，藉以調整蝕刻製程的相關製程參數，而量測蝕刻製程的最終的規格參數有：CD(又可區分為長徑Length與短徑Width)、蝕刻深度(Depth)等，而影響蝕刻製程的最終結果則會受前製程，也就是微影製程孔徑(CD Length與CD Width)的大小以及蝕刻製程諸多製程參數(蝕刻時間、壓力、氣體流量、RF power...)的影響。

## 2.4. 關鍵尺寸量測介紹

無論是DT Litho或是DTPHMO製程，在製程結束後都需要經過量測站點，以監控其製程結果是否落在製程規格內，又由於DT Litho製程量測的輸出項目和DTPHMO製程量測的輸出項目皆為CD的大小，故其所使用的量測儀器皆為CD SEM，本節將針對DT Litho量測和DTPHMO量測的CD量測一併介紹其所使用之CD SEM量測機台與原理。

### 2.4.1. 量測機台與原理



圖 2-13 掃描式電子顯微鏡 CD SEM (Scanning Electron Microscopes)

DT Litho與DTPHMO所需量測的製程規格項目為深溝的Length與Width CD，在這裡所使用的量測機台為美商應用材料所生產的掃描式電子顯微鏡CD SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscopes)量測儀器(機型為NanoSEM)如圖2-13所示

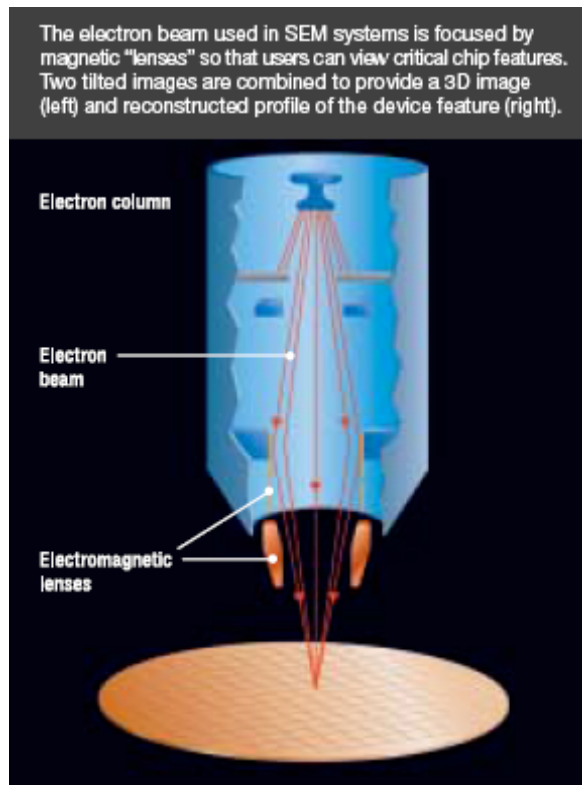


圖 2-14 掃描式電子顯微鏡成像示意圖

CD SEM係利用電子束在高磁場中一次次的掃描過晶片表面，將晶片的表面高低起伏予以成像如圖2-14所示。

SEM係利用電子槍產生入射電子束[17]，與試片相互作用激發出二次電子與散射電子，經偵測器偵測到後，再經過訊號放大處理後可得試片表面的訊號資料。影像因此分成二次電子影像(Secondary Electron Image)和散射電子影像(Back Scattered Electron Image)，後者具元素分辨力。二次電子影像藉由電子束在樣品表面上的反射來形成樣品表面之影像，就如同一般光學顯微鏡，將可見光照射在樣品上後反射，經調整焦距後而成為放大的影像。由於電子束極小，所以電子在空間中之運動如同波動的行為，而電子波動的波長比可見光還小，故SEM的放大倍率比傳統的光學顯微鏡(Optical Microscopy, OM)高上千倍或是萬倍以上，且景深高出數百倍，對於表面起伏大的試片，如破斷面，不易用光學顯微鏡觀察，SEM則相當容易。

試片被電子束掃描的面積稱為網格(Raster)，電子與試片發生作用，將產生各種放射過程，包括背向散射電子、二次電子、Auger電子、X射線和陰極激發光

(Cathodoluminescence)...等，這些放射皆能提供很多在電子束底下材料有用的資訊。然而在一般情況下，SEM是利用二次電子來成像。因為二次電子是直接從網格的表面而來，所以分解力很好。

掃描式電子顯微鏡安裝有掃描線路，以便依序將電子束掃描過網格的每一個位置。將二次電子的訊號打在螢光幕上，便可以直接觀察影像，整個掃描過程每十三分之一秒重複一次，亦即在視覺暫留的時間之內。

入射電子與試片交互作用的結果產生二次電子(對表面起伏敏感)即背向散射電子。二次電子影像用以觀察微米或是奈米材料及元件表面形貌，包含其形狀、大小和方向性。電子束射入試片後，只有距離試片表面約5~50nm的二次電子才有機會被偵測到，所以二次電子影像可以觀察到試片表面的形貌特徵。

#### 2.4.2. 深溝微影量測與深溝多晶遮罩開口量測

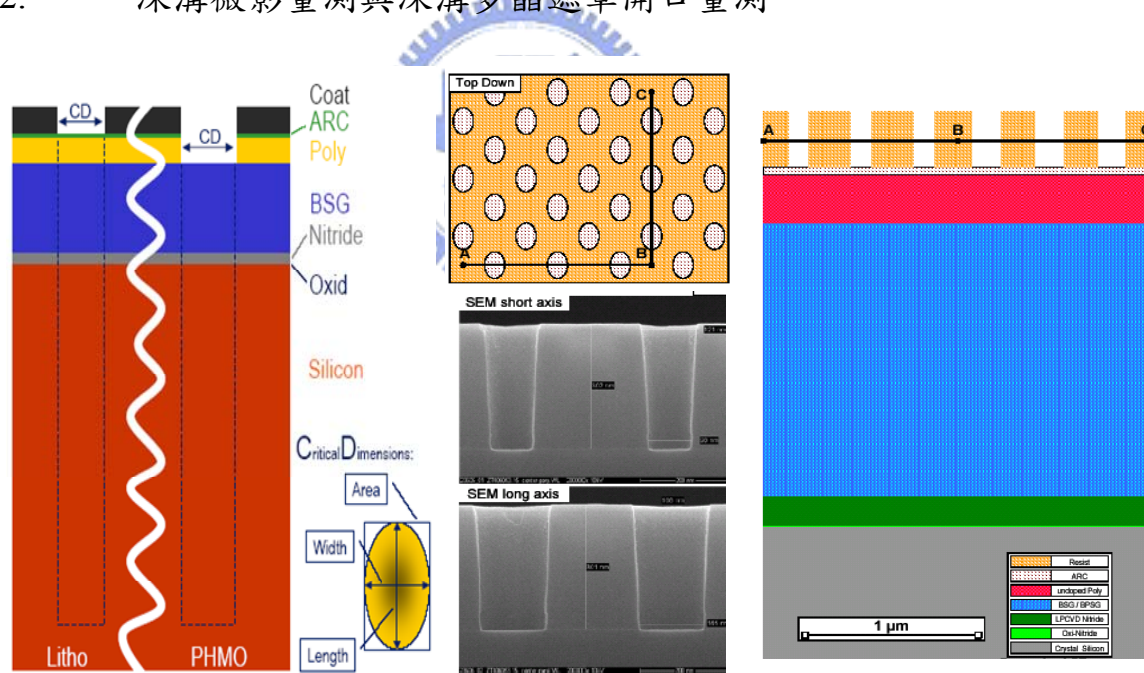


圖 2-15 深溝微影與深溝多晶遮罩開口蝕刻量測

在 DTPHMO 製程中，由於 DT Litho 與 DTPHMO 製程所進行的是圖案轉移的動作，因此如何能夠確保圖案轉移的精確程度就必須要透過量測結果所訂定的規格來作為檢視指標，在 DT Litho 製程之後便先行 CD 量測或稱為前量測(Pre-Measurement)，待完成

DTPHMO 製程後再進行一次 CD 量測或稱為後量測(Post-Measurement)的動作，若兩者的差值愈趨近於零，則表示圖案轉移的愈精確，如圖 2-15 表示了 DTPHMO 製程的前量測與後量測示意圖。

在本研究當中的 DT Litho 與 DTPHMO 皆以深溝孔徑的 CD Width 作為量測時檢驗的指標，用以檢驗製程是否符合規格，在此 DT Litho 量測與 DTPHMO 量測皆以相同的量測機台做量測並適用相同的量測原理。

DT Litho 所量測的 DT Litho CD 為圖 2-15 當中去除光阻之後的抗反射層下方的短徑大小，而 DTPHMO 所量測的 DTPHMO CD 則為圖 2-15 當中完成 DTPHMO 之後的多晶矽下方的短徑大小。



### 第三章 製程控制之系統架構

#### 3.1. 晶圓廠 Run-to-Run 控制之系統整合架構

本研究規劃之APC R2R控制系統與現行晶圓廠的自動化系統架構結合後將如圖3-1所示，整個系統可以概分為R2R GUI區塊、R2R控制器區塊與CIM/R2R Interface區塊三大區塊與機台端，下面將分別對各個區塊加以說明。

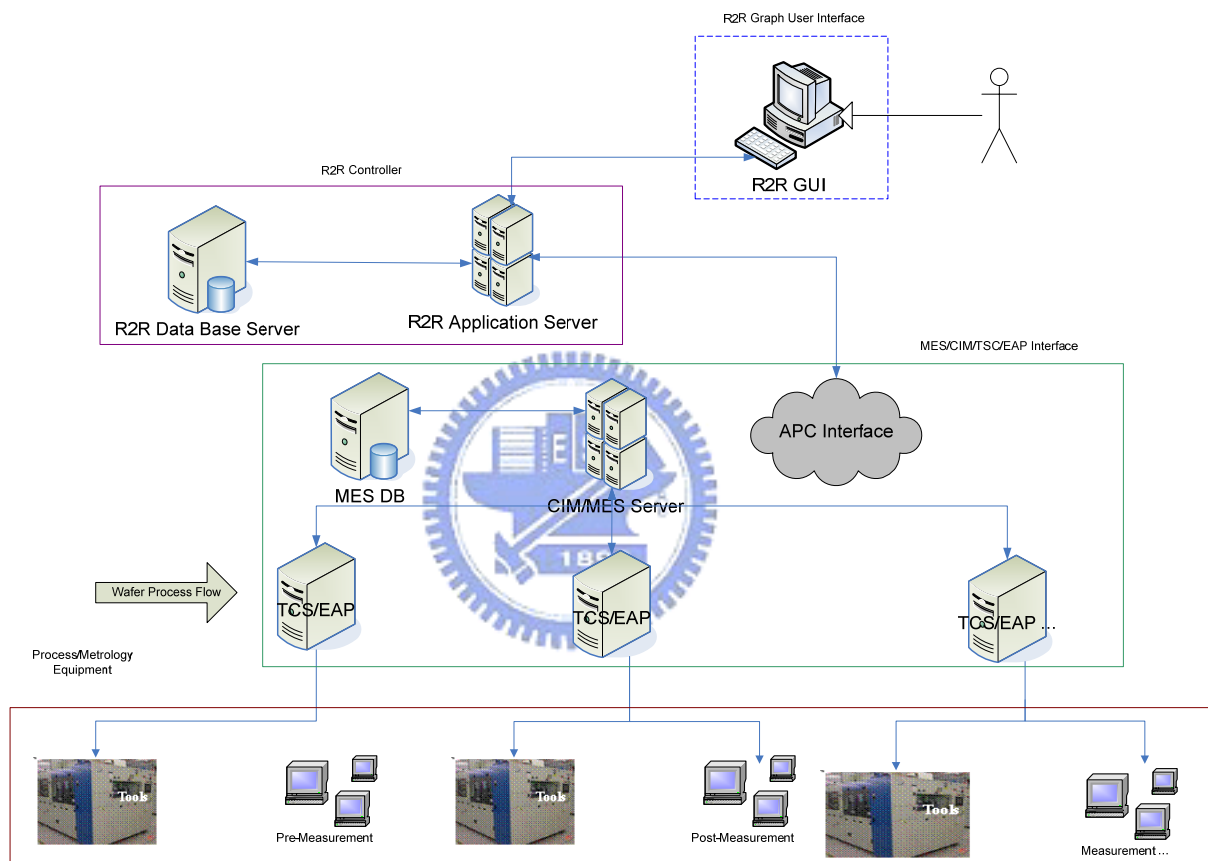


圖 3-1 FAB R2R 系統架構之示意圖

R2R GUI區塊：

使用者可以在R2R圖形化使用者介面(Graphic User Interface, GUI)上進行相關參數的設定與查詢R2R控制器與產品生產的歷史資料；而R2R GUI係透過內部網路連結到R2R Servers。



### R2R控制器區塊：

R2R控制器是由數部應用程式伺服器與資料庫伺服器所組成，在應用程式伺服器端設計了Load Balance的機制使各個應用程式伺服器的負載不會因為負荷過重而影響伺服器本身與R2R的控制，應用程式伺服器為整個R2R控制模組的核心所在，其主要角色為負責蒐集與運算出製程參數建議值給機台端所使用，同時將相關的資訊與資料儲存至資料庫伺服器當中，其主要角色為資料的儲存供應用程式伺服器做資料存取的动作。資料庫伺服器隨時保持著只有一部資料庫伺服器在運作供應用程式伺服器將相關資料儲存至資料庫伺服器，另一部則是處於待命的狀態，兩部資料庫伺服器間有著Fail Over的機制，防止當其中一部資料庫伺服器發生異常時整個R2R控制器因此而失效。

### MES/CIM/TCS/EAP Interface區塊：

此區塊扮演了R2R控制器與機台之間的橋樑，CIM(Computer Integrated Manufacturing) Servers係包括了製造執行系統(Manufacturing Execution System, MES)、機台控制系統(Tools Control System, TCS)以及機台自動化程式(Equipment Automation Program, EAP)等主要系統，當產品進入R2R控制時，R2R控制器會依據資料庫當中的數據與資訊計算出一份建議的製程參數給機台端，而這些資料便必須透過R2R Interface轉譯成CIM Servers所能夠辨識的資料格式，最後再透過機台自動化程式將建議值傳送給機台端將調變的製程參數交由機台端執行，而CIM Servers便會將機台端所傳送出來的資料加上產品的相關資訊(產品代號Product ID、晶圓代號Wafer ID分別在哪個機台Tool ID的反應腔體Chamber完成)再傳送給R2R Interface轉譯給R2R控制器。

### Process/Metrology Equipment 區塊：

機台扮演了接收與執行EAP端所送下來的命令並在機台端執行終了的時候，機台會傳送出一份機台內各腔體的使用狀態(如Chamber used count、RF Hours)給EAP/TCS/CIM Servers。

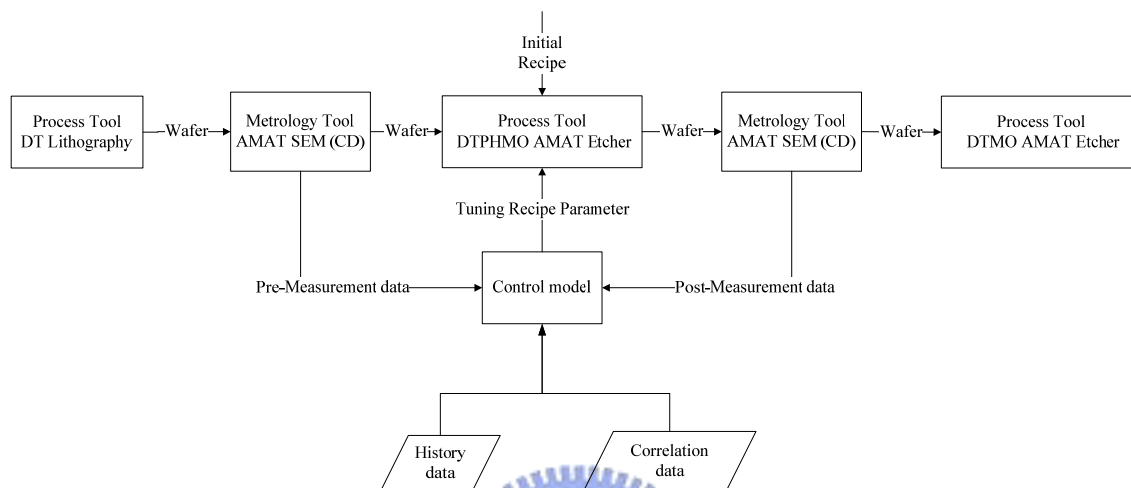


圖 3-2 資料流與晶圓製造流程示意圖

本研究規劃之APC R2R控制系統的資料流與晶圓製造流程將如圖3-2所示，晶圓將如圖3-2由左而右依序經過DT Litho製程機台、DT Litho CD量測、DTPHMO製程、DTPHMO CD量測以及後續的DTMO等製程。

在使用R2R控制器運作之前機台端會有一組初始的製程配方用以從事生產。R2R控制器的控制模型，主要是依據過往的歷史資料以及利用歷史資料所做出的輸入製程參數、量測參數的輸出值，所建立的關聯性資料或是實驗設計(Design of Experiment)的結果所建立而來。在使用R2R控制器運作時，R2R控制器會參考當批產品的深溝微影製程量測值、上一批產品的製程參數使用值、上一批產品的深溝多晶遮罩開口量測值、歷史的製程參數使用值等資訊，將上述資料代入控制模型以計算出當批產品所適用的製程參數供機台從事生產。



### DT Litho CD量測(Deep Trench Litho Critical Dimension Measurement)：

蒐集產品相關資訊與產品量測的CD大小，用以作為前饋控制項目調整後製程蝕刻時所需要的氧氣流量，以達到補償微影製程時CD過大或是過小的現象。控制器此時分別紀錄了產品的型號、批號、晶片代號、各個量測點的原始資料、依原始量測資料除以量測點數所得到的整片晶圓平均值，並儲存該筆量測資料係來自於哪一部量測機台等資訊，並將這些資訊以前饋的方式傳到R2R控制器，作為前饋控制的輸入項目，作為前饋時調整深溝多晶遮罩開口製程所需的氧氣流量。

### DTPHMO製程(Deep Trench Poly Hard Mask Open)：

蒐集產品相關資訊產品型號、批號、晶片代號與實際使用的氧氣流量，並紀錄了R2R控制器所提供的各個腔體的氧氣流量建議值、製程機台等，這些資訊是為了提供相同的製程機台、腔體、產品型號的過往氧氣流量給未來使用相同製程機台、腔體的產品使用，供R2R控制器作為調整下一批次產品氧氣流量時的運算參考。另外在此製程結束後R2R控制器還要求機台將各個反應腔體的使用狀態如RF Hours、Used chamber counts傳送到R2R控制器，作為判斷該反應腔體是否剛做過週期性保養，用以決定是否需要將控制器所使用到的相關係數恢復成預設值。

### DTPHMO CD的量測(Deep Trench Poly Hard Mask Open Critical Dimension Measurement)：

蒐集產品相關資訊如產品型號、產品批號、晶圓代號、每個量測點CD大小的原始資料與該晶片量測結果計算出的平均值與量測機台等，以回饋的方式傳送到R2R控制器儲存下來，供下一批次相同產品、製程機台時計算各個不同腔體所需的氧氣流量，以達到修正下一批次產品CD過大或是過小的現象。

批次控制器(R2R Controller)：

批次控制器需先建立製程投入與產出的預測模型，並引入前饋與回饋控制的調整概念，利用適當投入變數的改變，對前饋製程項目與製程機台所發生的變化進行補償。

前饋與回饋控制模組是主要利用相關性分析法與迴歸分析法建立投入變數與產出變數的預測迴歸模型，以作為回饋控制調整投入變數的依據，若預測模型建立得好，將使初始偏差較小，並根據實際產出值與預測值的差異，來決定下一批次投入變數的調整量，其目的是希望下一批次的製程產出能夠接近目標期望值，同時使後製程產出的量測值變異極小化。

在多部量測機台之間會即使量測相同的晶片也會有不同的量測結果，因此不同的量測機台之間會存在著量測的變異，在這裡需要對多部量測機台的量測結果施以權重調整以降低因為不同量測機台之間量測差異所造成的量測干擾。



## 第四章 研究方法與步驟

本章節將介紹 R2R 在 DTPHMO 製程所使用的相關控制方法與流程，如圖 4-1 所示，並說明基本的 EWMA 方法以及 FF + EWMA 控制器在深溝多晶遮罩開口製程的應用。

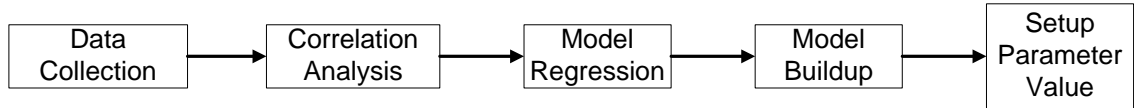


圖 4-1 DTPHMO R2R 控制方法研究流程圖

本研究中所使用的控制方法及流程如下所列：

- 一、資料蒐集：藉由蒐集一段時間的量測資料與人為控制所調整之製程參數之歷史資料作為控制器學習的樣版。
- 二、相關係數分析：在歷史資料中找出各個量測項目與製程參數間的較大相關性找出主要的輸入與輸出因子。
- 三、迴歸分析：將相關係數分析所得到的主要輸入與輸出因子進行迴歸分析。
- 四、模型建立：以迴歸分析的結果建立輸入與輸出模型(Input/Output Model)與預測模型(Prediction model)。
- 五、根據深DT Litho CD量測和DTPHMO CD量測與可被允許的製程參數範圍，建立各個相關係數的規格上下界限。

### 4.1. 資料蒐集與相關性分析

相關係數分析的實際做法，係蒐集過去一段期間的製程歷史資料以及量測歷史資料做相關係數的分析，以找出可供調變的製程參數與前後製程輸出結果之間的相互關係，而相關係數數值愈大則代表參數間的相互關係愈強烈，反之，相關係數數值愈小則代表各參數之間的相互關係愈弱，待計算出各個參數間的相關係數值後，便以較大相關係數值的項目作為主要的輸入與輸出製程因子。

在 CD 的量測項目中又可以分為 Length、Width CD 以及面積等三種，如圖 2-15 左

側所示，由於面積的計算係 Length 與 Width CD 的乘積，因此在做相關係數分析時，前製程的 DT Litho CD 量測便會有 Length 與 Width CD 兩個量測項目，後製程的 DTPHMO CD 也會有 Length 與 Width CD 兩個量測項目，再加上深溝多晶遮罩開口製程本身的主要調變參數氧氣流量，共有五個相關參數。相關係數分析便是找出這五個項目中哪些項目是主要的輸入與輸出項目。

在深溝多晶遮罩開口製程當中，可供調變的製程參數係氧氣的流量，另有兩項製程量測參數分別為前製程的 DT Litho CD，以及後製程的 DTPHMO CD，其中 DTPHMO CD，又是後續製程的 CD 基礎，故 DTPHMO CD 係最終所要檢驗的量測項目。

因此可以決定主要的製程輸入項目為氧氣流量，而參考的前饋項目為前製程的 DT Litho CD，以及主要的回饋項目為後製程的 DTPHMO CD。

在此只需要找出可供調變的製程參數氧氣流量究竟是與後製程 DTPHMO CD 的 Length 或是 Width CD，有著較大的關係係數值，便可以決定究竟是要使用可供調變的製程參數氧氣流量來調整後製程的 DTPHMO CD 的 Length 或是 Width CD 的輸出結果，才可以達到較佳的 R2R 控制。



表 4-1 各個相關製程參數間的關係性

Correlations	Gas Flow	Pre-Measure	Pre-Measure	Post-Measure
	(O <sub>2</sub> )	Width	Length	Width
Pre-Measure Width	0.427	1	1	1
Pre-Measure Length	0.307	0.685	1	1
Post-Measure Width	<b>0.352</b>	<b>0.855</b>	0.616	1
Post-Measure Length	0.255	0.592	0.837	0.564

表4-1為相關性分析的結果，由上表當中可以發現，深溝多晶遮罩開口量測項目CD Width CD與可供調變的製程參數氧氣流量以及前製程製程量測項目當中的Width CD，有著較高的相關性，因此我們可以挑選上述項目，作為控制深溝多晶遮罩開口量測項目CD Width CD的主要輸入因子。

## 4.2. 迴歸分析法

迴歸分析法就是利用統計運算來決定  $y = f(x)$  這個函數的方法。根據過去的經驗與實際的製程輸入輸出的結果判斷這個數學公式應該屬於線性類型。

而判斷資料符合性的作法，主要建立在殘差(residual error)之上，殘差( $e_i$ )就是量測值( $y_i$ )減去預測值( $\hat{y}_i$ )的大小，如公式4.1所示：

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.1)$$

殘差值越大，表示迴歸線越不接近現實。我們將所有的殘差予以平方再加總，即為殘差的平方和( $SS_e$ )，因為殘差的平方和受到樣本數的大小影響，所以不同的樣本數或單位無法做殘差平方和的比較，為了克服這個困難，就要讓他們放在同一個尺度上。作法就是將殘差平方和除以總平方和( $SS_t$ )。

總平方和就是所有的數減去其平均值，然後平方再加總，其實它就是變異數的分子，令 $\bar{y}$ 是平均值、 $y$ 表示資料的輸出值、 $\hat{y}$ 表示迴歸線所產生的預測值，相關公式

$$SS_e = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (4.2)$$

$$SS_t = \sum (y - \bar{y})^2 \quad (4.3)$$

經過一些換算後，可以得到總平方和減去殘差平方和就是迴歸平方和( $SS_{reg}$ )，即如公式所示：

$$SS_{reg} = SS_t - SS_e = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2 \quad (4.4)$$

$SS_{reg}$  就是迴歸平方和，它就是每個預測值減去平均數後取平方，然後再加總起來，迴歸平方和佔總平方和的百分比，就是這條迴歸線可以符合資料的部分，通稱為  $R^2$ ，又



稱為決斷係數(Coefficient of Determination)，公式表示如(4.5)所示：

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_t} = \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (4.5)$$

又因為  $SS_t = SS_{reg} + SS_e$ ，所以可以整理得出公式(4.6):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_e}{SS_t} = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (4.6)$$

也就是說，殘差平方和佔總平方和的百分比，就是這條迴歸線所不能符合或解釋資料的部分。1減去這個部分所表示的就是這條迴歸線可以符合資料的部分。 $R^2$  的值介於0與1 之間，如果迴歸運算的預測值等於平均數，那麼  $R^2$  等於0；如果這條迴歸線完全符合資料，一點殘差都沒有， $R^2$  就等於1。但是事實上不會發生  $R^2 = 0$  也不會發生  $R^2 = 1$  的現象，而是  $R^2$  的值會介於兩者之間。 $R^2$  越大表示這條線符合性比較好，也就是說較容易由輸入值預測輸出值，反之  $R^2$  越小則表示這不容易由輸入值預測輸出值。

如果兩條迴歸線的  $R^2$  值差異不多，合理性也差不多，那麼迴歸線越簡單越好，因為這才能符合科學化繁為簡的大原則，而且較合理及簡單的迴歸線。

依據前述的迴歸分析方法之後，便可以得到製程機台主要的輸入與輸出間的關係，DTPHMO CD將會與DT Litho CD以及DTPHMO所使用的氧氣流量呈現如下列的製程輸出與輸入迴歸方程式，如方程式(4.7)所示：

$$CD_{PHMO(t)} = (\alpha + \beta_1 CD_{Litho(t)}) + \beta_2 flow_{O_2(t)} + \varepsilon_t + \eta_t \quad (4.7)$$

$CD_{PHMO(t)}$ ：DTPHMO CD輸出值

$\alpha$ ：製程模型截距項

$\beta_1$ ：前饋製程DT Litho CD係數值

$\beta_2$ ：氣體流量係數值

$\varepsilon_t$ ：製程干擾

$\eta_t$ ：雜訊干擾(白噪音，White noise)

根據過往的歷史資料代入迴歸分析法，所得到如下表4-2所示的迴歸分析統計輸出摘要：

表 4-2 迴歸分析統計輸出摘要

Regression Statistics	
Multiple R	0.841245742
R Square	0.707694398
Adjusted R Square	0.706439868
Standard Error	0.001302245
Observations	469

由表 4-2 中可以得知  $R^2$  的值為 0.707694398，可以說迴歸式(4.7)所預測的輸出值可以有相當的準確性。

在這裡將4.1節中所得到的輸入與輸出項目做迴歸分析，便可以建立控制器的預測模型，如下列公式(4-8)所示。

$$\hat{CD}_{PHMO(t)} = a + b_1 CD_{Litho(t)} + b_2 flow_{O_2(t)} + \hat{\epsilon}_t \quad (4.8)$$

而預測模型中所需要的相關係數值，如表4-3所示，分別代入公式中所需的DT Litho CD與O<sub>2</sub> Gas Flow，再以表4-3當中的”α”、”β<sub>1</sub>”與”β<sub>2</sub>”等值，代入公式(4-8)所需之”a”、”b<sub>1</sub>”與”b<sub>2</sub>”，便可以得到預測模型的DTPHMO CD值。

### 4.3. 製程參數與相關係數規格上下限設定

設定製程參數與相關係數規格上下限的主要用意，係降低過度修正或是修正不足的現象，使得最終產品的製程規格能夠落在製程的安全區間內，表4-3為生產線上實際的相關的製程參數與相關係數的規格上下限設定。

表 4-3 製程參數與相關係數的規格上下限設定

Parameter	Target/Default	Upper Limit	Lower Limit
DT Litho CD (nm)	116	0.128	0.104
DT PHMO CD (nm)	104	0.118	0.091
O <sub>2</sub> Gas Flow (sccm)	27.8	40	20
RF Hour	N/A	1000	1.5
Chamber Count	N/A	10000	10
$\alpha$	0.80889	N/A	N/A
$\beta_1$	0.81225	N/A	N/A
$\beta_2$	0.32283	N/A	N/A
$\lambda$	0.15	N/A	N/A
Adjust Limit	0	3	3
Inhibit Count	3	N/A	N/A

在表4-3中由上而下分別設定了，DT Litho CD、DTPHMO CD的目標期望值、上限與下限；Gas Flow的初始值、上限與下限；RF Hour與Chamber Used Count的上限與下限，用以判斷該Chamber是否經歷過PM；” $\alpha$ ”、” $\beta_1$ ”與” $\beta_2$ ”分別為控制模型所需使用的相關係數值； $\lambda$ 為控制器的EWMA權重值；Adjust Limit為控制器調整流量時，與前次流量差異的最大值或最小值，例如前一次的流量為27 sccm則此次的流量為 $27 \pm 3$ sccm。

產品的DT Litho CD與DTPHMO CD，這兩種製程規格是以三倍的Sigma作為標準的製程規格上下界限，也可以六倍的Sigma作為更緊縮的製程規格，以求有較好的製程表現，不過越是緊縮的製程規格界限，製程規格超出管制界限愈頻繁，製程工程師便需要常常處理生產線上的異常現象。

另外製程參數的設定係針對製程配方參數，對產品的後製程規格敏感度來訂定製程參數規格的上下界限，同時要設定每次調整製程參數的最大與最小幅度，使得產品的DTPHMO CD量測，不會因為製程參數規格的設定非最佳化而發生超出製程規格上下界

限的問題，以確保產品的製程規格能落在安全的製程規格當中。

當完成製程模型建立之後，便需要針對每一項輸入與輸出參數以及相關係數，設定其所合適的規格上下界線，在本研究當中，需分別設定DT Litho CD、DTPHMO CD、氧氣流量的規格上下限，在實際的應用上可以將這些規格的上下限設定成較平時生產產品時更為緊縮，以避免使用R2R生產時，因為製程模組建立的不良，或是突發性的製程與設備異常等因素所產生的風險，這也可以在製程的輸出值接近產品的規格上下界限前及早被發現，並適當的給予修正，以做到更進一步的把關動作。

若是產品的製程量測輸出值接近規格的上下界限時，還可以透過設定相關的係數值，來加以防範製程輸出結果不佳的現象，例如可以設定禁制(Inhibit)次數當產品超出特定規格三次之後，便將R2R控制器作禁制的動作，此時必須等製程工程師確認問題的發生原因並解決之後，予以解除禁制機制後才能繼續從事生產，以防止R2R控制器失效而造成產品超出規格。

另外為了降低生產時所會遭遇到的例行保養(PM)或是故障排除(Trouble shooting)等因素的干擾，因此蒐集過往的歷史資料超過兩個月的期間，以求資料能夠涵蓋例行保養與故障排除的事件發生，使設計出來的控制器能夠將這些干擾因素降到最低，同時控制器也設計了當例行保養或是故障排除的事件發生的時候，能夠依據機台的狀態，例如：RF Hour 或是 Chamber used count 與上一批次產品生產時的數值作比較，當發現該數值小於上一批次的數值時，則視為該反應腔體為已經歷過例行保養或是故障排除，此時反應腔體的狀態應該已經改變，此時控制器可以將所有的控制器調變係數恢復為預設值。

#### 4.4. 補償及回饋控制機制

本研究中的補償與回饋機制，係將數個輸入變數，如：DT Litho CD、製程參數中的氧氣流量，與單一的輸出變數，DTPHMO CD，將製程上的前製程變化量與後製程變化量，兩個項目分別使用FF與EWMA控制，而形成多重輸入單一輸出(MISO)的前饋與指數權重移動平均(FF + EWMA)控制機制。

#### 4.4.1. EWMA 控制方法

EWMA控制方法是屬於回饋控制的一種，主要是利用觀測輸出資料點與預測資料點的殘差，經由回饋控制，將製程輸入值做調整，使製程輸出值能達到製程的目標值。

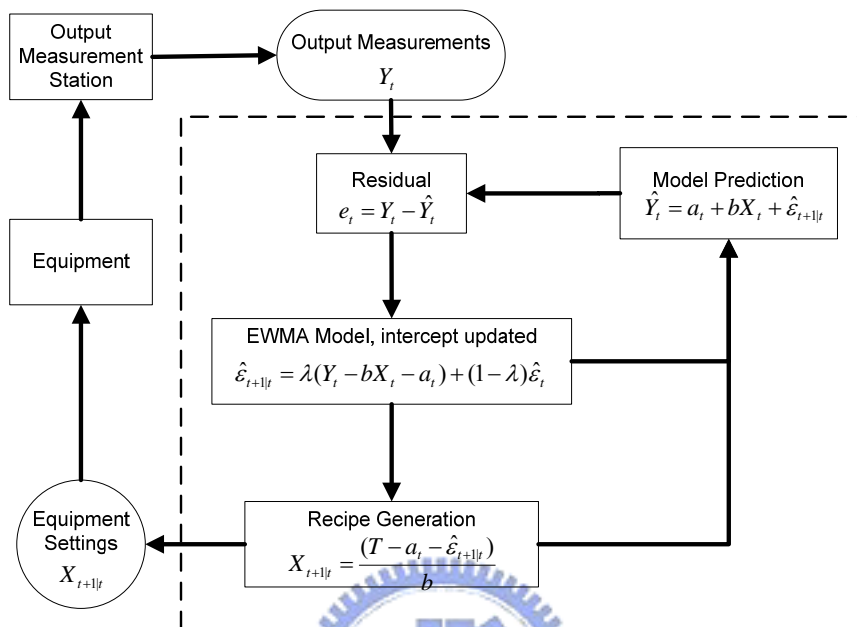


圖 4-2 EWMA 控制方法功能流程圖

假設一個製程在製造的過程中已經經由實驗設計等方法得到最佳化，在這種情形下，製程機台的輸出輸入值可以用一個線性的模型表示：

$$Y_t = \alpha + \beta X + \varepsilon_t + \eta_t \quad (4.9)$$

$Y_t$ ：第t批次的輸出值

$\alpha$ ：製程模型截距項

$\beta$ ：製程模型斜率項

$X$ ：製程輸入值

$\varepsilon_t$ ：第t批次的製程干擾

$\eta_t$ ：第t批次的White noise

而控制模型(Control Model)的輸出輸入值可以用下列的線性模型表示：

$$\hat{Y}_t = a_t + bX + \hat{\varepsilon}_t \quad (4.10)$$

$\hat{Y}_t$ ：第t批次的輸出估計值

$a$ ：控制模型的截距項

$b$ ：控制模型的斜率項

$X$ ：製程輸入值

$\hat{\varepsilon}_t$ ：第t批次的製程干擾估計值

每一批次不斷地重複上述步驟，此即為EWMA控制方法，如圖4.2所示為EWMA控制方法功能流程圖。

#### 4.4.2. FF + EWMA 控制器在深溝多晶遮罩開口製程上之建立

FF + EWMA控制器使用DT Litho CD的量測結果作為前饋控制參數，針對微影機台與蝕刻機台不同的組合分別控制，並使用DTPHMO CD的量測結果作為回饋控制參數；針對不同的蝕刻機台、Chamber與產品的個別排列組合控制調整，亦即每一部前製程機台、後製程機台、Chamber等都可以依據不同的產品組合作出個別的調整。

FF + EWMA控制器在建議蝕刻製程機台氧氣流量時，會提示氧氣流量的建議值在操作介面上供工程師作為參考，若氧氣流量建議值被許可，則透過機台自動化程式對機台下達欲使用的氧氣流量，此時機台便會依據R2R控制器之氧氣流量建議值從事製程生產；若氧氣流量建議值不被工程師許可，則工程師還可以透過CIM所提供的操作介面，將R2R控制器的建議值修改成工程師所能夠接受的數值，以避免因為R2R控制器的建議值與工程師的期望值差距過大而影響到產品的線上量測結果。

製程現況之相關資料如模組係數等係存放於資料庫當中，供製程進行修改相關係數，以使產品的DTPHMO CD的量測結果能符合製程規格。當機台的外在狀況改變如進行例行性的保養或是有一段長時間未有相同製程在該部製程機台或是Chamber從事生產時，R2R控制器會自動將控制器的模組係數作重設(Reset)回到初始狀態的動作。

在DTPHMO製程當中前製程與後製程均會影響DTPHMO CD，前製程變化量主要來自於DT Litho CD偏離目標值所造成，而後製程變化量則主要來自於機台或是反應腔體本身，耗材、零件的更換或是例行性的保養之後，到下一次耗材、零件的更換或是例行性

的保養之前，這段期間機台或是反應腔體的製程能力表現都會有著些微的變化，也可以說是來自於機台或是反應腔體所使用的耗材或是零件老化所致，進而反映在DTPHMO CD偏離目標值所造成。

在製程的控制上為了要能夠即時的控制前製程的變化量與後製程的變化量，在此導入FF + EWMA控制方法分別針對前製程變化量與後製程變化量這兩個部分，施予前饋控制以處理前製程的變化量的部分，並以回饋與EWMA控制以處理後製程的變化量。

因此將前製程變化量與後製程變化量寫成如下列FF與EWMA控制方程式(4.11)與方程式(4.12)。

前製程(DT Litho)變化量的FF控制方程式：

$$FF_{(t)} = \alpha + \beta_1 CD_{Litho(t)} \quad (4.11)$$

上式中反映了前饋的控制結果，會受到DT Litho CD量測結果所影響。

後製程(DT PHMO)變化量的EWMA控制方程式：

$$\hat{\varepsilon}_{t+1|t} = \lambda(CD_{PHMO(t)} - b_2 flow_{O_2(t)} - FF_{(t)}) + (1 - \lambda)\hat{\varepsilon}_t \quad (4.12)$$

上式中的 $\lambda$ 稱為EWMA控制器權重，權重將介於0與1之間，即 $0 \leq \lambda \leq 1$ ，當 $\lambda$ 的數值愈趨近於0則愈相信前一次之干擾估計值，反之則會趨近此一批次所求出來的變化量。

而建議值的計算將如下列方程式所示：

$$flow_{O_2(t+1)} = \frac{(T - FF_{(t)} - \hat{\varepsilon}_{t+1|t})}{b_2} \quad (4.13)$$

氧氣流量  $flow_{O_2(t+1)}$  的建議值係後製程 DTPHMO CD 規格期望值(T)減去此一批次的前饋變化量( $FF_{(t)}$ )再減去此一批次預測的製程干擾 $\hat{\varepsilon}_{t+1|t}$ 除以製程模型斜率項 $b_2$ 。

### 4.4.3. FF + EWMA 控制方法在深溝多晶遮罩開口製程上實作

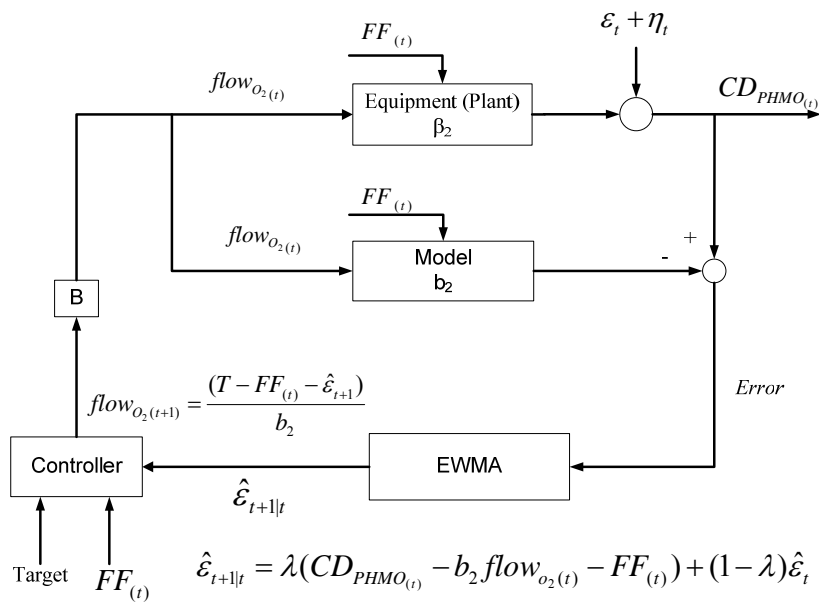


圖 4-3 深溝多晶遮罩開口製程控制器略圖

DTPHMO CD 為 DT Litho CD ( $FF(t)$ ) 與氧氣流量輸入 Plant 之後，再加上製程干擾  $\epsilon_t$  與雜訊干擾  $\eta_t$  的結果；DTPHMO CD 與 DT Litho CD 與氧氣流量代入模型後，相減所得到的差，再代入 EWMA 控制器便可以得到新的製程干擾預測值  $\hat{\epsilon}_{t+1|t}$ ；將新的製程干擾預測值  $\hat{\epsilon}_{t+1|t}$ 、前一個 Lot 的 DT Litho CD 與 DTPHMO CD 的目標值一起代入控制器，便可以得到新的氧氣流量值，如圖 4-3 所示。



## 第五章 模擬結果與實驗驗證

### 5.1. 模擬結果

本研究以歷史資料建立製程機台的輸入與輸出模型，歷史資料的深溝微影製程 CD 值(DT Litho CD)、深溝多晶遮罩開口 CD 值(DTPHMO CD)與氧氣流量關係圖如圖 5-1 所示。

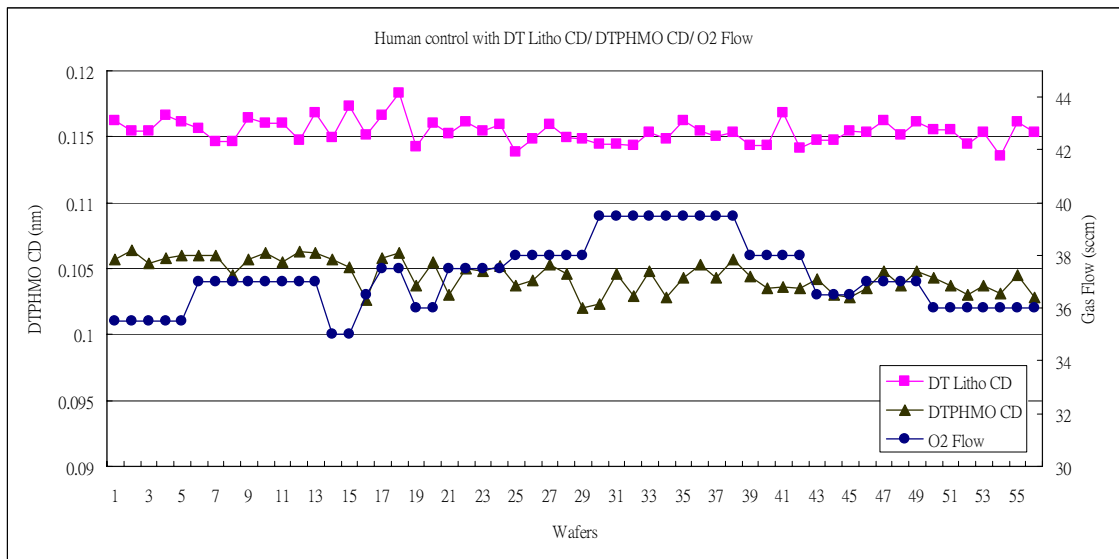


圖 5-1 歷史資料的深溝微影製程 CD 值、深溝多晶遮罩開口 CD 值與氧氣流量關係圖

接著模擬製程機台所產生的製程干擾，模擬的方法為先利用迴歸分析建立製程機台的模型如公式(4-7)所示，製程機台的干擾值  $\varepsilon_t$  可藉由將 DT Litho CD、DTPHMO CD 與氧氣流量代入下式求得。

$$\varepsilon_t = CD_{PHMO(t)} - (\alpha + \beta_1 CD_{Litho(t)}) - \beta_2 flow_{O_2(t)}$$

將兩種不同的權重 ( $\lambda = 0.13, \lambda = 0.78$ ) 代入 EWMA 控制器，若 EWMA 控制器所預測的製程干擾值  $\hat{\varepsilon}_{t|t-1}$  與實際的製程干擾值  $\varepsilon_t$  愈接近，即表示預測愈準確。

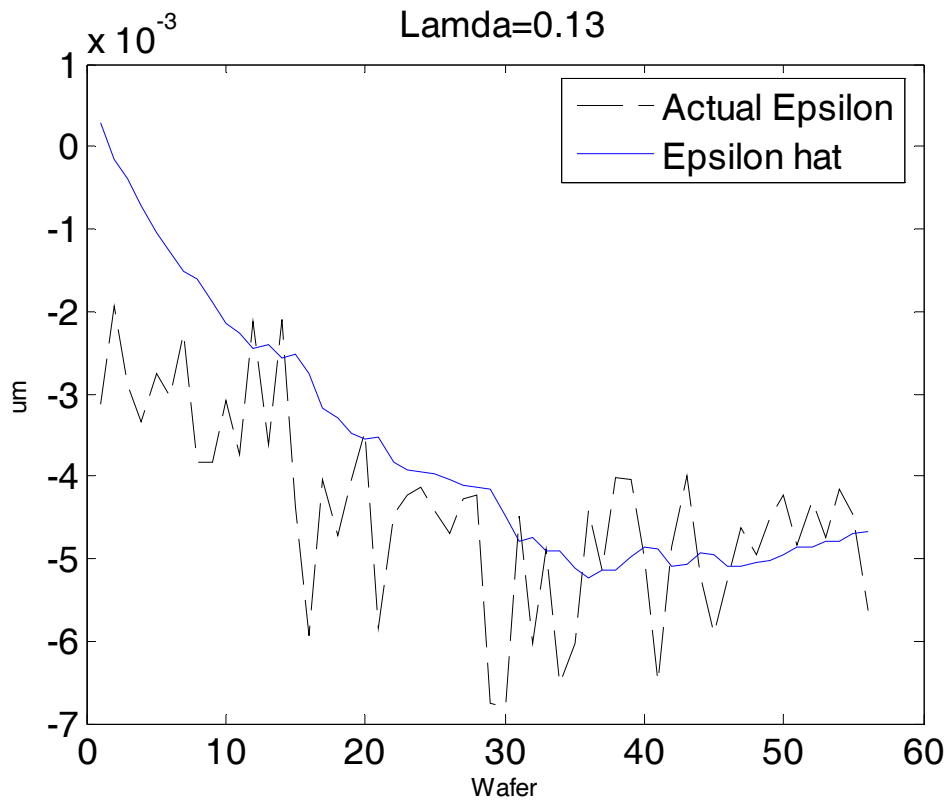


圖 5-2 實際干擾與權重為 0.13 時的預測干擾比較

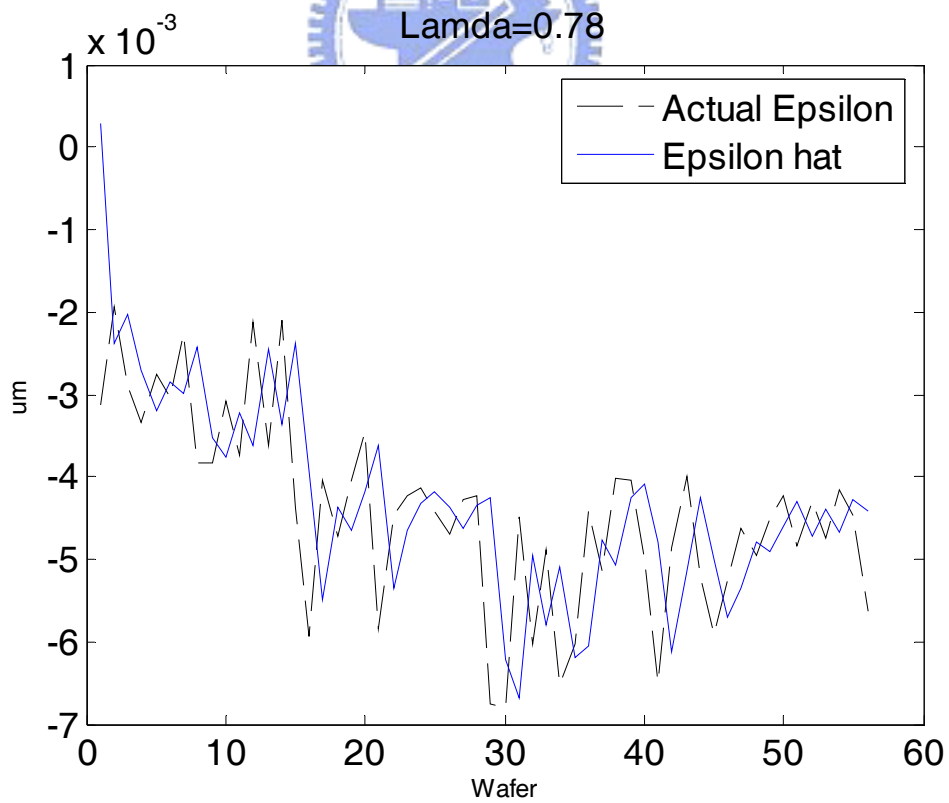


圖 5-3 實際干擾與權重為 0.78 時的預測干擾比較

表 5-1 兩種不同權重下預測干擾之 MSE 比較表

Lamda	0.13	0.78
MSE	1.77E-06	1.26E-06

圖5-2與圖5-3分別為控制器代入不同的 $\lambda$ 值所預測出來的製程干擾，在圖5-2與圖5-3當中虛線的部分為製程干擾值 $\varepsilon_t$ 變化，實線的部分為控制器所預測出來的在兩種不同 $\lambda$ 值下的製程干擾值 $\hat{\varepsilon}_{t|t-1}$ 變化，從表5-1可以看出在兩種不同的權重下， $\lambda$ 值較大時所模擬出來的製程干擾值 $\hat{\varepsilon}_{t+1|t}$ 變化與實際的製程干擾值 $\varepsilon_t$ 變化較為接近。均方差的計算公式，如公式5.1所示。

$$\text{MSE} = \frac{\sum (\varepsilon_t - \hat{\varepsilon}_{t|t-1})^2}{N} \quad (5.1)$$

考慮以下三種條件：

Case 1: 相同的產品、機台、Chamber使用單一量測機台。

Case 2: 相同的產品、機台、Chamber A使用8部量測機台。

Case 3: 相同的產品、機台、Chamber B使用8部量測機台。

未控制(歷史資料)與模擬控制後的DTPHMO CD值如圖5-4至5-6所示。

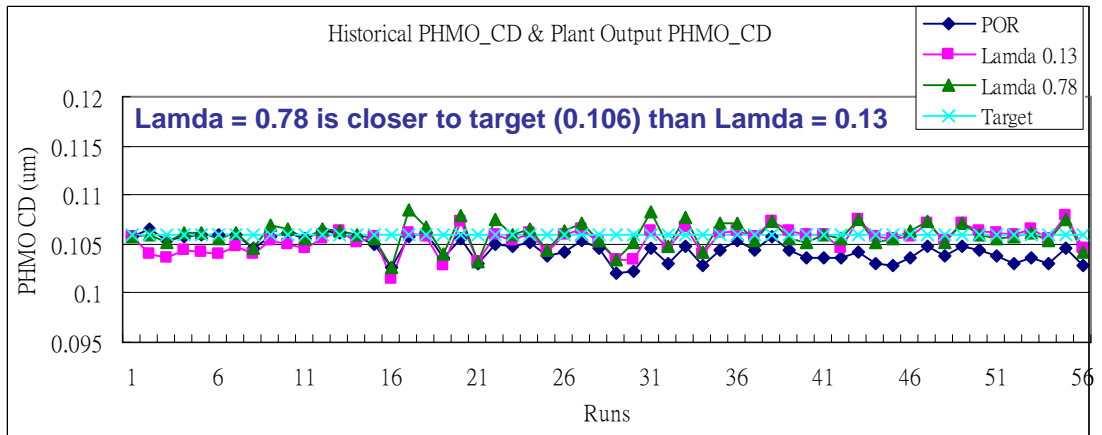


圖 5-4 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 1)

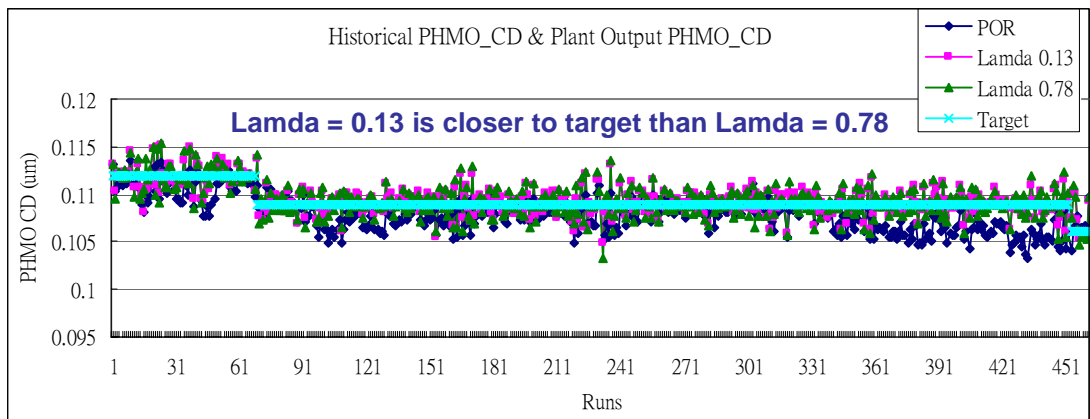


圖 5-5 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 2)

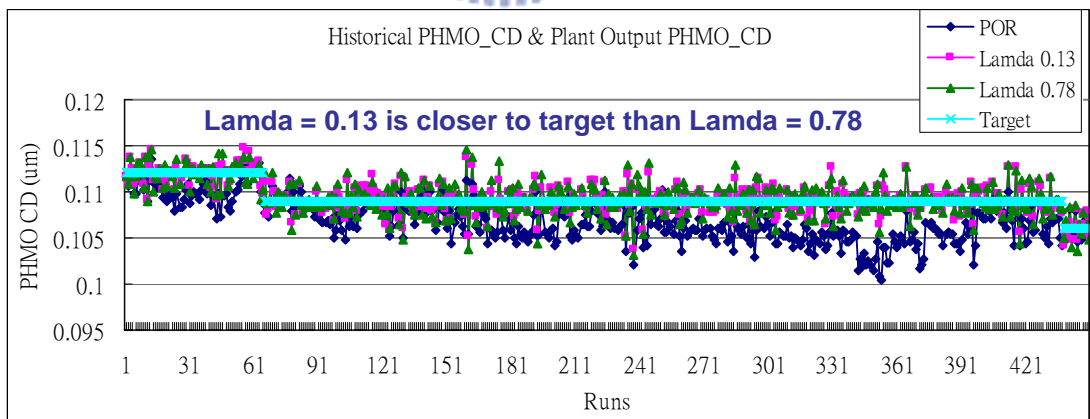


圖 5-6 未控制(歷史資料)與模擬控制後的 DTPHMO CD 值(Case 3)

模擬干擾預測值與實際值差的變化如圖 5-7 至 5-9 所示。

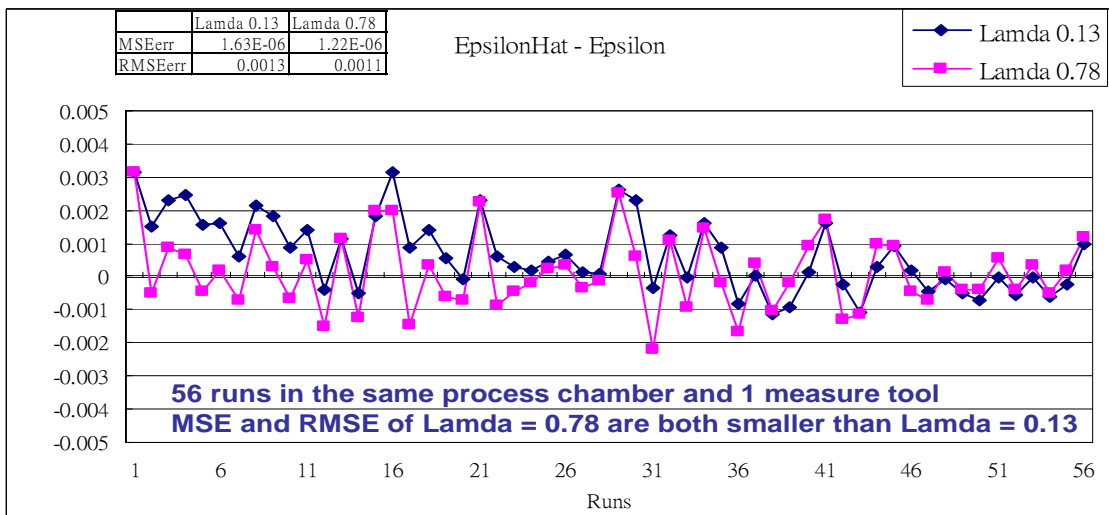


圖 5-7 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 1)

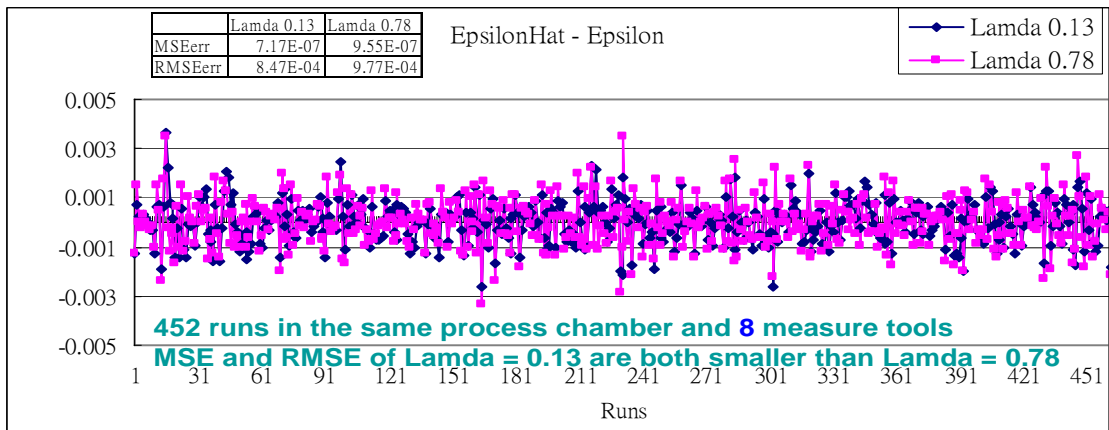


圖 5-8 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 2)

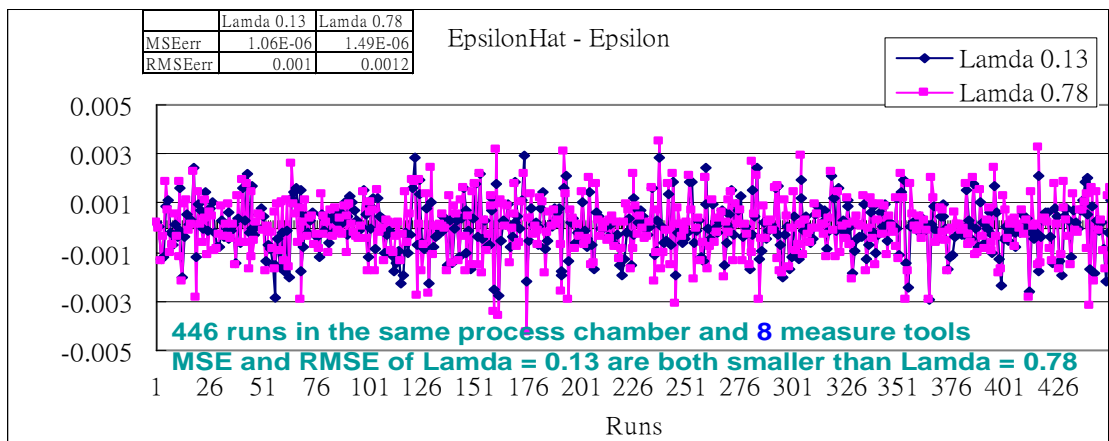


圖 5-9 模擬干擾預測值與實際值差的變化(Case 3)

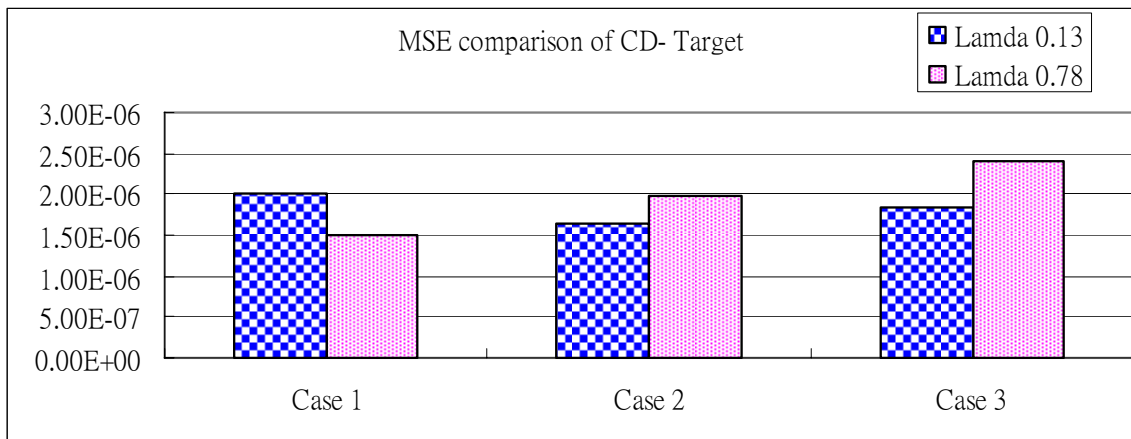


圖 5-10 三種條件下模擬不同權重的均方差比較

三種條件下的模擬兩種權重的 DTPHMO CD 量測值減去目標值所求出來的均方差如圖 5-10 所示。

由上述的圖表(圖 5-4 至圖 5-10)可以印證下列現象：

- 一、在單一量測機台的情況下，權重愈大，其製程結果較佳；而在多部的量測機台進行量測時，因為不同的量測機台所造成的量測干擾增加，因此欲得到較佳的製程結果，則應取較小權重，以降低不同的量測機台所造成干擾的影響。
- 二、在實際的工廠生產線上，會有產能調配與生產週期的考量，不可能將某一製程的產品量測全部集中於特定的量測機台上，故量測機台的數量愈多就愈有可能發生因為量測機台之間量測差異所造成的量測機台干擾，因此除非能夠確實的降低不同量測機台之間的變異，否則應取較小的權重配合R2R的製程控制，以得到較佳的製程控制。
- 三、一般製程經過一段時間，為了保持機台處於良好的狀態，都會執行例行性的保養、更新部品、更換消耗品等，這時會對製程產生干擾，使製程的特性發生改變，例行性的保養過後會使造成製程產生位移或是漂移。針對這類的製程干擾現象，利用本論文所研究之FF + EWMA控制器，經模擬與實際驗證結果，均能夠有效地將輸出值控制在我們所期望的目標值範圍之內。

## 5.2. 實驗驗證

本實驗的驗證係使用相同產品、相同Chamber，分別由工程師人為調整控制氧氣流量與使用R2R FF + EWMA控制器自動調整氧氣流量，分別生產30~50批次產品，比較其所生產出來的DTPHMO CD，比較的項目有：①量測值與目標值的差(CD Bias, DTPHMO CD-Target)、②製程能力指標(cp)與綜合製程參考指標(Complex process key index, cpk)以及③依據量測結果所求出的均方差與根均方差等。

在此實驗期間，量測機台由於產能調配(Capacity)與生產週期(Cycle Time)的考量的關係，所有的量測資料並非均來自單一的量測機台所測量而來，而是有數部不同的量測機台，因此參考實驗模擬時的結論，在多部量測機台的情況下，選擇了較低的權重，以降低不同量測機台間的量測差異所造成的量測干擾的影響，在此實驗驗證的權重 $\lambda$ 係採用”0.15”。

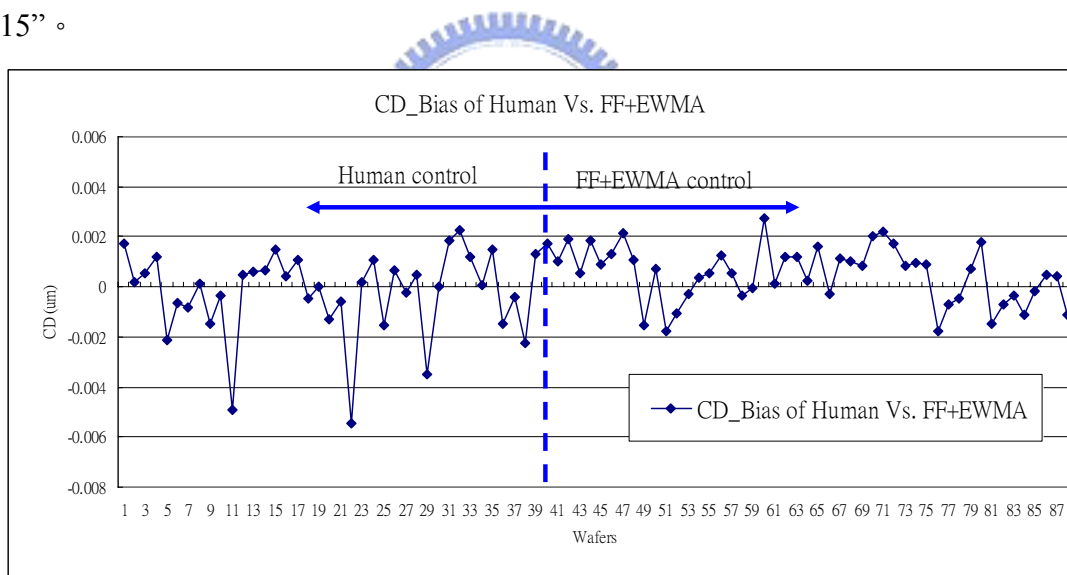


圖 5-11 兩種控制條件下量測值與目標值的差(CD Bias)

人為控制與FF + EWMA控制的DTPHMO CD量測值減去目標值所求出來的量測值與目標值的差(CD Bias, DTPHMO CD-Target)如圖5-11所示。

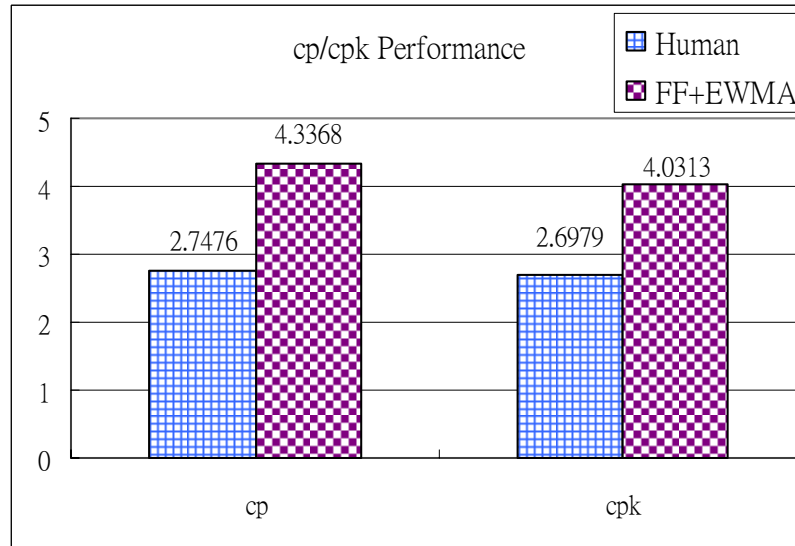


圖 5-12 兩種控制條件下的製程能力指標與綜合製程參考指標(cp/cpk)

人為控制與FF + EWMA控制的DTPHMO CD量測值所求出來的製程能力指標(cp)與綜合製程參考指標(cpk)如圖5-12所示。

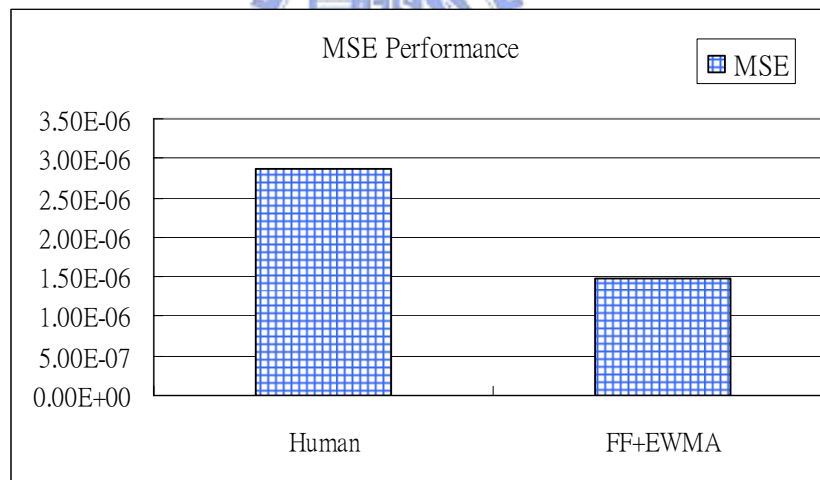


圖 5-13 兩種控制條件下的均方差(MSE)比較

人為控制與FF + EWMA控制的DTPHMO CD量測值所求出來的均方差如圖5-13所示。

經由以上的比較，可以發現FF + EWMA 控制器的輸出結果與模擬的結果一致，皆比人為控制的輸出結果佳，因此證明了FF + EWMA控制器的模擬結果與實驗結果相符合且FF + EWMA控制器較人為控制的輸出結果更接近目標值。



## 第六章 結論與未來研究之建議

### 6.1. 結論

從前面幾章的推導及模擬結果與DTPHMO製程的實例驗證，我們可以歸納出以下幾點製程優勢：

1. 由表4-1各個相關製程的關係性當中可以發現，DT Litho製程對DTPHMO製程，具有相當程度的製程影響，尤其以前量測Width CD影響較大，因此將DT Litho製程的Width CD列為前饋項目，可以有效的控制DTPHMO製程的Width CD。
2. 使用FF + EWMA控制器取DT Litho CD量測當作前饋項目並結合DTPHMO製程所使用的氣體流量與DTPHMO CD量測作EWMA控制，將能夠即時反應因DT Litho CD劇烈的變化而使得DTPHMO CD依然能夠控制在接近目標值的附近，如此便可以降低DT Litho的重工率(Rework Rate)。
3. 使用FF + EWMA控制器與同期未使用FF + EWMA控制器所生產的產品，其DTPHMO CD的量測結果，不論是歷史資料的模擬數據或是實驗驗證的結果，均發現使用FF + EWMA控制器可以有效的透過調整氧氣流量，使得DTPHMO CD的量測結果更為接近製程規格目標值，確保線上產品的製程規格穩定，證明了本研究所提出的FF + EWMA控制器對DTPHMO CD量測結果是有很好的控制方法。
4. 使用FF + EWMA控制器能夠提升生產線的自動化程度，並能夠降低製程工程師日常的工作負擔，使工程師能夠有多餘的時間可以從事高附加價值的其他工作。
5. 當製程的自動化程度愈來愈高，意味著製程變的更容易控制，不容易發生人為操作錯誤，即使是新進、沒有經驗的製程工程師也能夠輕鬆上手，如此便可以縮短工程師的學習曲線，降低企業的教育訓練與報廢晶圓成本。

## 6.2. 未來研究之建議

經由以上的研究顯示，本研究中的R2R FF + EWMA控制器對於DTPHMO蝕刻製程，當製程機台模式有一定的變動或干擾時，可以得到良好的控制績效，但是仍有一些值得再進一步探討的部分，因此對於未來的研究方向，可以提出以下幾點建議：

1. 由於FF + EWMA控制器對於緩慢的製程機台所發生的改變，可以有不錯的表現，但是當發生非屬於前製程因素所造成的重大製程位移時，控制器將會需要較長的時間方可追趕上該製程位移，此時如能依據製程的輸出結果，強制的給予一個控制器模型位移(Controller Model Offset)，則可以快速的將已經位移掉的製程拉回正常的水準，惟應針對該控制器模型位移給予作動的條件與限制，如，連續n筆資料都無法接近目標值的時候應予作動，以及對控制器模型位移，設定規格上下限，以預防修正過度所造成產品的危害。
2. 由於產品在製程機台生產結束之後，有可能會經過其他數個製程站點之後，或是因為量測機台因故無法馬上量測，而在此同時，製程機台已經繼續生產其他批次的產品，這時就會發生量測遲滯(Metrology Delay)效應，此時控制器將無法立即取得最新一批次產品的量測結果，而以上一批次產品的參數值繼續從事生產，這將會有可能導致該批次產品的量測輸出值與目標值遠離的現象，如能有效的降低量測遲滯效應，將可以更迅速準確的計算出更適當的製程輸入參數，使得該製程的量測輸出值能夠保持在目標值附近，使該製程變得更容易控制。
3. 針對多部量測機台有可能造成的量測干擾，這使得量測機台數量愈多，則權重必須愈小，如此會有量測機台的數量愈多，愈不應該相信量測機台所得到量測結果的現象，因此尋求找出最適當權重的方法，將能改善因為不同量測機台間的量測差異所造成的量測干擾。

## 參考文獻

- [1] Box G. E. and Jenkins M., “Time Series Analysis – Forecasting and Control.” Oakland, CA:Holden-Day, 1976.
- [2] Ingolfsson A. and Sachs E., “Stability and Sensitivity of an EWMA Controller.” Journal of Quality Technology, vol. 25, pp. 271-287, 1993.
- [3] Sachs E., Hu A. and Ingolfsson A., “Run by Run Process Control; Combining SPC and Feedback Control.” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, vol. 8, No. 1, pp.26-43, Feb. 1995.
- [4] Smith T. and Boning D., “A Self-Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques.” IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology C\*, vol. 20, pp. 121-132, Mar. 1997.
- [5] Castillo E. D. and Hurwitz A., “Run to Run Process Control: A Literature Review and Some Extensions.” Journal of Quality Technology, vol. 29, pp. 184-196, 1997.
- [6] Castillo E. D. and Yeh J. Y., “An Adaptive Run-To-Run Optimizing Controller for Linear and Nonlinear Semiconductor Processes.” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, vol. 11, No. 2, May. 1998.
- [7] Guo R., Chen J., Chen A. and Lu S., “A Self-Tuning EWMA Controller for Processes Subject to Small and Large Disturbances.” Journal of Chinese Engineers, vol. 22, No. 5, pp. 627-638, 1999.
- [8] Christopher G., “Advanced Process Control: Basic Functionality Requirements for Lithography.” IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2001.
- [9] Christopher G., “Advanced Process Control: Benefits for Photolithography Process Control” IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2002.
- [10] Tseng S. T., Chou R.J. and Lee S. P., “A Study of Multivariate EWMA Controller.” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, vol. 34, pp. 541-549, 2002.

- [11] Tseng S. T., Chou R.J. and Lee S. P., “Statistical Design of Double EWMA Controller.” *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, vol. 18, pp. 313-322, 2002.
- [12] 詹韻玉，“EWMA 控制器最適變折扣因子之研究” 國立清華大學統計學研究所碩士論文，2001。
- [13] 莊達人，“VLSI 製造技術”，高立圖書2004年。
- [14] 行政院國家科學委員會精密儀器發展中心，“微機電系統技術與應用”，2001年7月初版。
- [15] Mani J. and Scot G., “Real-Time Lithography Registration, Exposure, and Focus Control—A Framework for Success” *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, vol. 18, No. 4, Nov. 2005.
- [16] 游欽宏，91年上學期半導體製程設備系統工程技術課程講義，國立交通大學，中山科學研究院。
- [17] 郭正次、朝春光，“奈米結構材料科學”，全華科技圖書，2004年。

