

# 應用非線性 D-EWMA 控制器 於電漿蝕刻製程控制

學生：王志峰

指導教授：李安謙 教授

工學院精密與自動化工程學程

## 摘要

本論文主要目的為設計一套應用於 Inductively Coupled Plasma (ICP) 蝕刻製程之先進製程控制器-非線性 D-EWMA 控制器。本文利用實驗設計法(Design of Experiment, DOE)找出蝕刻  $\text{SiO}_2$  之內部輸入參數(腔體壓力、RF 偏壓和  $\text{CF}_4$  流量)與輸出參數(蝕刻率)之關係，建立批次控制之預測模型，然後利用非線性 D-EWMA 估測器(Non-linear Double Exponentially Weighted Moving Average estimator)更新每批次之控制模型截距項，再透過最小變異控制器(minimum variance controller)來更新製程配方。使機台的輸入變數可以在改變量最小的限制下，即製程的變動最小的情形下，讓輸出變數快速地到達我們所設定的目標值，由本文的模擬以及上線實驗可知非線性 D-EWMA 控制器可有效的控制 ICP 蝕刻製程並增加製程能力。

# Application of Nonlinear D-EWMA Controller to Control the Plasma Etching

Student : Chih-Feng Wang

Advisor : Prof. An-Chen Lee

Degree Program of Automation and Precision Engineering

Nation Chiao Tung University



## ABSTRACT

This thesis presents a new run-to-run (R2R) multiple-input-single-output controller, termed Non-linear D-EWMA(double exponentially weighted moving average) controller, for Inductively Coupled Plasma (ICP) Etch process. The relations between input recipes (Pressure, RF bias and  $CF_4$  flow) and output variables (Etch rate) are formed by the experimental design method and the process model is built by multiple regression analysis. The non-linear D-EWMA controller can update the process model and obtain the optimal recipes for the next run. Quantified improvements are obtained in simulations and the real etch processes.

# 目 錄

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目 錄.....	iii
圖 目 錄.....	iv
表 目 錄.....	vi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究方法.....	6
1.4 本文組織架構.....	8
第二章 蝕刻製程及ICP電漿蝕刻機介紹.....	9
2.1 蝕刻製程介紹.....	9
2.2 ICP電漿蝕刻機介紹.....	14
第三章 蝕刻製程之實驗設計法.....	17
3.1 何謂實驗設計法.....	17
3.2 蝕刻製程之實驗設計與輸出變異數分析.....	19
3.3 DOE實驗數據之迴歸分析.....	21
第四章 EWMA估測器與最小變異控制器.....	23
4.1 EWMA估測器.....	23
4.1.1 線性單變量EWMA估測器.....	23
4.1.2 線性單變量D-EWMA估測器.....	24
4.1.3 非線性多變量D-EWMA.....	25
4.2 最小變異控制器.....	26
4.3 系統控制架構.....	28
第五章 模擬結果與驗證.....	29
5.1 模擬結果.....	29
5.1.1 位移與飄移干擾之模擬.....	30
5.1.2 真實製程干擾之模擬.....	40
5.2 蝕刻製程實際驗證之結果與分析.....	43
第六章 結論與未來研究之建議.....	46
6.1 結論.....	46
6.2 未來研究之建議.....	47
參考文獻.....	48

# 圖目錄

<u>圖號</u>	<u>圖名稱</u>	<u>頁碼</u>
圖 1-1	APC 系統控制流程圖 .....	2
圖 1-2	Feedback Control Model .....	5
圖 1-3	電漿蝕刻 R2R 製程控制研究流程圖 .....	6
圖 1-4	實驗設計示意圖 .....	7
圖 1-5	結合 D-EWMA 估測器與非線性最小變異控制器之控制架構圖 ..	7
圖 2-1	蝕刻製程示意圖.....	9
圖 2-2	濕式蝕刻反應機制圖 .....	10
圖 2-3	等向性蝕刻與非等向性蝕刻 .....	11
圖 2-4	乾式蝕刻主要機制.....	11
圖 2-5	ICP 系統架構圖 .....	15
圖 2-6	實驗蝕刻機.....	16
圖 3-1	LTPS TFT Array 結構.....	19
圖 3-2	玻璃基版+3K SiO <sub>2</sub> .....	19
圖 4-1	控制流程圖.....	28
圖 5-1	Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case) .....	33
圖 5-2	Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case) .....	33
圖 5-3	Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case).....	34
圖 5-4	Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case) .....	34
圖 5-5	Etch Rate 加入 3% shift 干擾模擬控制結果.....	35
圖 5-6	壓力模擬輸入值.....	35
圖 5-7	RF bias 模擬輸入值.....	36
圖 5-8	CF4 模擬輸入值 .....	36
圖 5-9	Etch Rate 加入 0.5% Drift 干擾模擬控制結果.....	36
圖 5-10	壓力模擬輸入值.....	37
圖 5-11	RF bias 模擬輸入值.....	37
圖 5-12	CF4 模擬輸入值 .....	39

圖 5-13	廠內蝕刻率歷史資料 .....	40
圖 5-14	不同權重之 Non-linear D-EWMA 控制結果之 RMSE .....	41
圖 5-15	不同權重之 Linear D-EWMA 控制結果之 RMSE .....	42
圖 5-16	Etch Rate 加入真實製程干擾模擬控制結果 .....	43
圖 5-17	KLA Tencor Alpha- Step 表面輪廓儀 .....	44
圖 5-18	蝕刻量測圖形示意圖 .....	44
圖 5-19	實驗驗證結果 .....	45



# 表 目 錄

<u>表號</u>	<u>表名稱</u>	<u>頁碼</u>
表 2-1	MS450NEA 蝕刻機規格表.....	16
表 3-1	設計實驗之步驟大綱 .....	17
表 3-2	蝕刻率大小之實驗 .....	20
表 3-3	蝕刻率變異數分析表 .....	21
表 3-4	非線性迴歸分析表 .....	22
表 3-5	線性迴歸分析表.....	22
表 5-1	Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case).....	31
表 5-2	Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case) .....	31
表 5-3	Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case) .....	32
表 5-4	Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case) .....	32
表 5-5	蝕刻製程模擬結果比較表 (3% Shift 干擾) .....	37
表 5-6	蝕刻製程模擬結果比較表 (0.5% Drift 干擾) .....	39
表 5-7	不同權重之 Non-linear D-EWMA 模擬結果(History Case) .....	40
表 5-8	不同權重之 linear D-EWMA 模擬結果(History Case) .....	41
表 5-9	蝕刻製程模擬結果比較表 (真實製程干擾) .....	43
表 5-10	實驗結果比較表.....	45

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

當半導體已經進入了次微米（submicron）甚至是深次微米（deep submicron）的尺寸，所以深寬比的要求也越來越嚴苛，於是電漿乾式蝕刻（Plasma dry etching）便漸漸取代傳統的濕式蝕刻，重要的原因便是電漿蝕刻的非等向性（anisotropic）特性，可以達到較佳的深寬比獲致良好的電性，故能有效控制蝕刻製程顯得重要。

1995 年 MIT 學者提出了 APC（Advanced Process Control）的相關研究，認為傳統的統計製程管制（SPC, Statistical Process Control）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(Feedback control)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 APC 結合了 SPC 與回饋控制(Feedback control)，利用過去製程的資料來預測下一批製程的參數設定，可以降低因為機台老化、化學品的消耗、周圍環境條件的改變(如溫度、溼度)所造成的製程變異，因此 APC 是未來製程控制的發展趨勢。

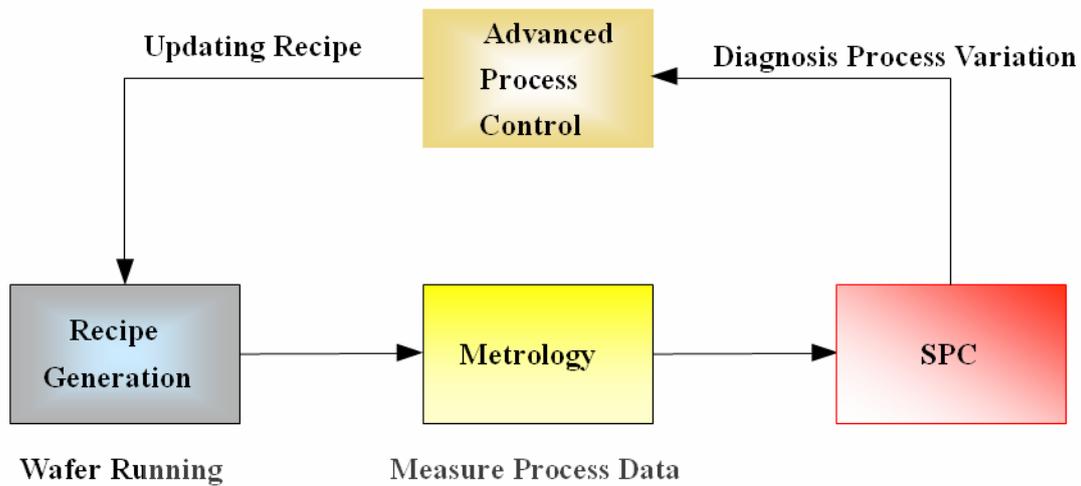


圖 1-1 APC 系統控制流程圖

而半導體製程基本上屬於批次製程 (Run to Run, R2R), R2R 發展至今以證實獲致相當良好的效果, 半導體應用上也有相當的研究成果, 近來也逐漸推廣到光電產業的 TFT-LCD 產業, 在面版產業尺寸逐漸大型化下, 如何控制製程在每一次的蝕刻率與均勻度相對重要, 本研究希望能夠針對 TFT-LCD 蝕刻製程應用一 R2R 控制方法, 能對蝕刻能力獲致良好的控制能力。

本論文主要目的為研究一套可以穩定控制蝕刻製程的飄移或是異常事件的發生所造成蝕刻製程的偏移的方法, 當察覺到蝕刻率發生飄移(Drift)或是偏移(Shift)的時候, 加以調整蝕刻時的相關製程參數, 使得後續批次的產品修正到製程規格的中心, 使其可以有效的藉以改善並增進電漿蝕刻製程之穩定性。

## 1.2 文獻回顧

近年來，多位學者相繼提出許多相關於製程控制演算法的理論與研究。1990年，An-Chen Lee [1]提出一個以時間序列為主的非線性系統模型(Non-linear system model)、k-step ahead predictor 及最小變異控制演算法(Minimum-variance control algorithm)，用以處理輸出入之間的非線性時間序列關係。Spano 等人 [2] 提出了在統計製程控制 ( statistical process control , SPC ) 上利用即時動態資訊解決了警報偵測不完整的問題，但卻無法即時控制已經偏離的製程。Sachs 等人[3]提出了一個模組化的架構做為低壓化學氣相沈積 ( low pressure chemical vapor deposition , LP-CVD ) 沈積薄膜多晶矽實現在半導體廠裡的控制架構，此系統會自動將前製程參數資料與後製程參數資料一起列入控制器中考慮並做運算，因而發展出一套新的控制方法。換句話說這套理論實現了在某單一製程中即時最佳化製程參數與控制理論。另外 Sachs 等人[4] 又提供了一個 SPC 及製程回饋控制的架構去控制類似飄移、位移等這些干擾對製程的影響。1976年 Box 和 Jenkin[5]提出了 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指數分配，亦即，離現今時點越近的資料點，所給予的資料點權重就越大。此後相關的討論及研究亦不斷的出現，如：Smith 和 Boning[6]提出自我調整控制方法，探討在 CMP 製程中研磨率與不均勻度會產生的漂移現象，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。1999年 Guo 等人[7]提出一種能夠偵測並使用修正權值方法，使發生大位移製程能快速回到穩定狀態的控制器(Self-Tuning EWMA Controller)。經由蒙地卡羅模擬大位移及漂移狀況驗證後，證明能有效處理製程中所發生的位移及漂移現象。在多輸出多輸入 ( Multi-input multi-output ; MIMO ) 的例子中，Tseng 等人[8]針對多輸出多輸入線性模型提出 MIMO EWMA 控制器。Castillo 以及 Rajagopal[9]則

是針對快速飄移製程提出 MIMO double EWMA 回饋式控制器對持續飄移製程加以控制。

1998 年 Enrique Del Castillo 等人 [10]提出了一個最佳化之適應性控制器 (Optimizing Adaptive Quality Controller, OAQC)，此控制器一方面可以修正機台之初始預測模型的係數，使機台之預測模型更能適應製程及機台的實際變化，另一方面亦可以做為回饋控制(Feedback)來計算下一批次的最佳輸入值，且可適用於線性及非線性的製程模型。然而，在此控制方法的調變之下，輸入變數常常會到達其上下限，使得控制的效果大打折扣。

2001 年 Christopher Gould [11]提出一個完整的微影製程的批次控制的理論 (Run by Run Control)架構，包含 FB(Feedback)、FF(Feed-forward)與 FB/FF Combination 三種控制模組，其中 FB(Feedback)控制模組之架構如下圖 1-2 所示，分別由四個區塊所組成；Wafer 進入微影製程，經"process"完成後，由量測機台(Measurement tool)量取後測結果，再將後測結果傳入 Controller 中，計算實際結果與目標值之差異，並得到最佳輸入參數，最後將所得到的參數 Feedback 至下一批次之 Process Recipe 中，此即為 FB(Feedback)控制模組。

在蝕刻製程方面 Bulter and Stefani[12]介紹了在 Dry-etch 多晶矽閘極蝕刻 (polysilicon gate etch)的晶圓製程中，隨著時間老化作用產生偏移現象，文章中使用了督導式 R2R 控制器 (run-to-run supervisory controller)應用 PCC (Predictor Corrector Control)控制器是類似於 DEWMA 控制方法來調整製程的輸入變數點，在改變氣體流量與 RF Power 等多輸入下使晶圓的 MER (Mean Etch Rate)落在目標值上，其方法可降低 36%的製造變異。

2005 年起，交通大學李安謙實驗室針對電漿輔助化學氣相沉積 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)、微影製程之關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)以及金屬濺鍍 (Metal Sputtering) 等製程已成功開發出相對應之製程控制機制[13-17]。其中在 CMP、PECVD 及 CD 的部分，針對製程進行實驗設計 (Design of Experiments, DOE)，找出製程模型，利用遞迴最小平方

法 (Recursive Least Squares, RLS) 修正製程模型係數，最後再利用最小變異控制器 (Minimum Variance Controller, MVC) 調變製程輸入參數。在金屬濺鍍的部分，是利用時間序列分析 (Time Series Analysis) 製程歷史資料來建立製程模型，並且利用延伸卡曼濾波器 (Extended Kalman Filter) 同時地估測製程狀態及模型之參數，藉由一步領先預測 (One-step-ahead prediction) 求得下一個批次之控制輸入參數。

而本論文將以非線性多變量 D-EWMA 結合最小變異控制器之方法探討在 TFT LCD 之 Dry etch 上之適應性。

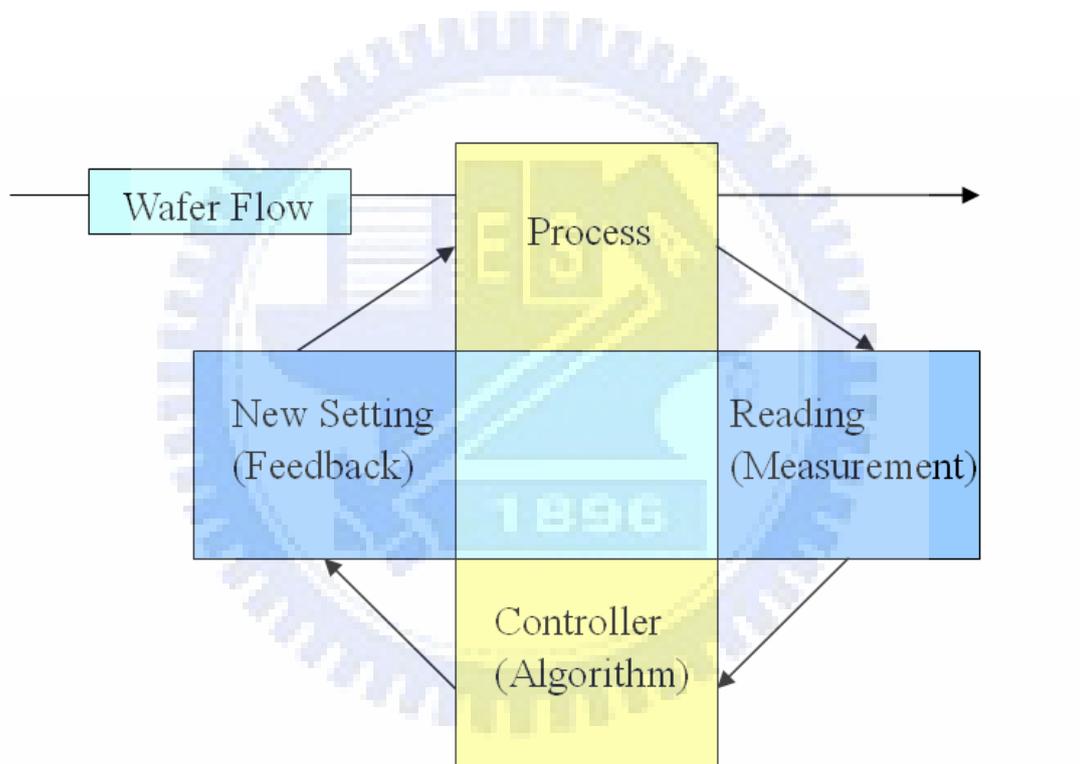


圖 1-2 Feedback Control Model

### 1.3 研究方法

本篇研究將概分成下述六個主要步驟進行研究，並如下圖 1-3 所示，



圖 1-3 電漿蝕刻 R2R 製程控制研究流程圖

本文首先利用實驗設計法(Design of Experiment, DOE)之變異數分析找出可控因子 (X)與系統輸出參數(Y)兩者之間的關係，如圖 1-4 所示；接著利用非線性迴歸分析(Non-linear Regression Analysis)，來對電漿蝕刻機(Dry Etcher)之輸入變數(RF Power、RF Bias、CF<sub>4</sub>)與輸出變數(蝕刻率)間之關係做分析，以建立製程模型。再利用非線性 D-EWMA 估測器來更新製程模型最後利用最小變異控制器產生最佳製程配方，讓製程所受到干擾的影響降至最低，以維持製程的穩定。如圖 1-5 所示，即為本論文之批次控制架構圖。最後經由模擬與蝕刻製程的實例驗證，更進一步的來證明此控制方法的控制能力及其效益。

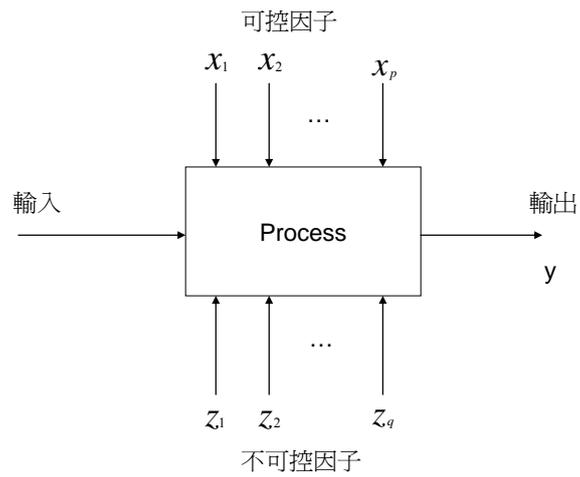


圖 1-4 實驗設計示意圖

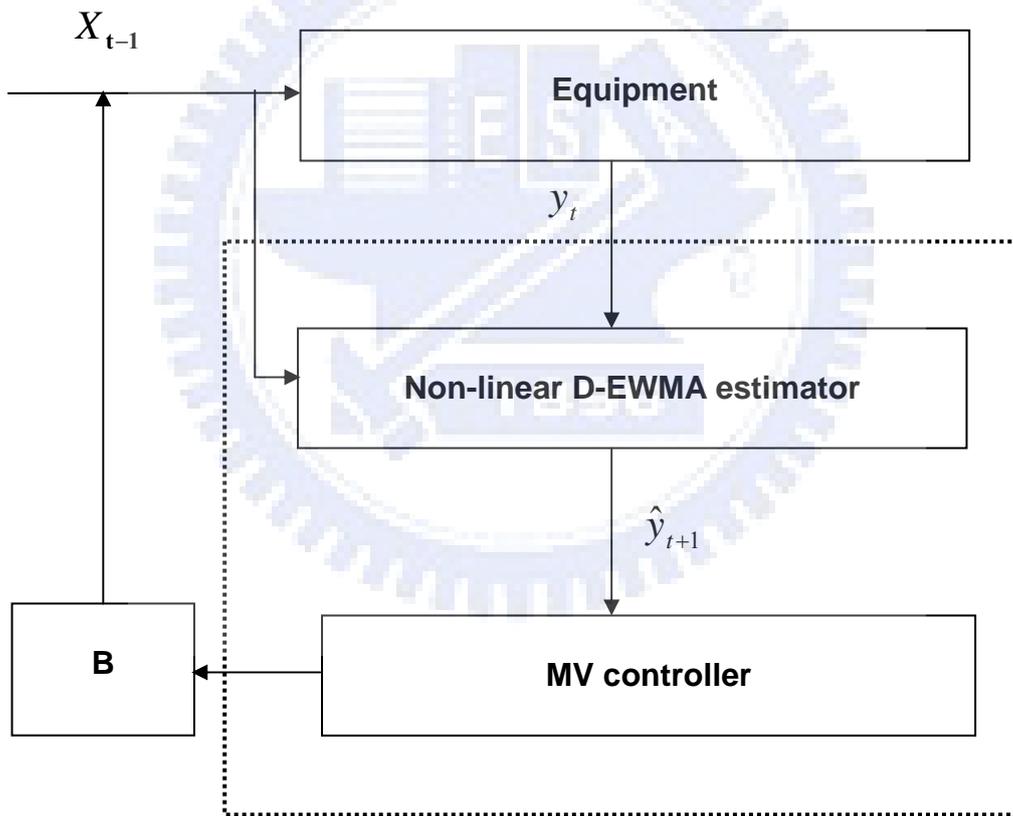


圖 1-5 結合 D-EWMA 估測器與非線性最小變異控制器之控制架構圖

## 1.4 本文組織架構

在本論文中各章節的內容及架構如下：

### 第一章 緒論

敘述本論文之研究動機與目的、相關文獻之探討與回顧、及研究方法與本文組織架構。

### 第二章 蝕刻製程與 ICP 蝕刻設備介紹

本章介紹製程中蝕刻製程及 ICP 蝕刻機台。

### 第三章 實驗設計法及資料分析

本章為應用實驗設計方法 (DOE) 來找出機台各輸入變數(recipe)與輸出變數之間的關係，並將所得的資料加以分析。

### 第四章 非線性多變量 D-EWMA 估測器與最小變異控制器

介紹非線性雙加權指數移動平均法(Non-Linear D-EWMA)之模型估測，與最小變異控制器(Minimum Variance Controller)，並說明本控制器之完整控制架構。

### 第五章 模擬結果與驗證

本章是以上述所提出完整批次控制架構來進行模擬與分析，並用線性與非線性 D-EWMA 之模擬結果作一比較與探討。最後將模擬結果進行電漿蝕刻製程之實際驗證。

### 第六章 結論與未來研究之建議

依據本論文的研究結果，說明研究的心得、及未來研究重點與研究方向。

## 第二章 蝕刻製程及 ICP 電漿蝕刻機介紹

### 2.1 蝕刻製程介紹

蝕刻製程可說是整個半導體製程中，最重要的步驟之一。一般而言，光罩上面的元件圖案，是先藉著微影製程而轉移到光阻上，然後再利用蝕刻製程，來完成整個圖案轉移到薄膜上的最終目的，如圖 2-1 所示。這層經過微影與蝕刻的薄膜，將成半導體元件的一部分。以金氧半導體元件或互補式金氧半導體元件的製程為例，這層薄膜可能是二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )，氮化矽( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )，複晶矽(Poly-Si)，鋁合金(Al alloy)或是磷矽玻璃(Phosphosilicate, PSG)等。也就是說，幾乎構成半導體元件的主要材料，都必須經過薄膜沈積、微影、以及蝕刻的這個流程，以便一層一層地進行元件的製作。

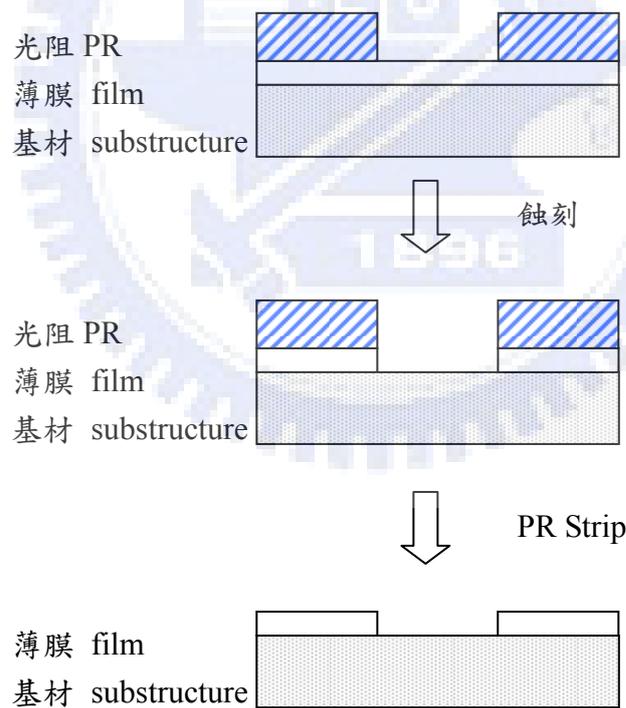


圖 2-1 蝕刻製程示意圖

常用的蝕刻技術可分為：

濕式蝕刻法(wet etching)：主要是利用化學溶液和待蝕刻物之間產生反應，而與其他的材質不產生反應的方式來得到預定的圖案，通常是將晶圓放在一個有化學

溶液的蝕刻槽中進行。此方法最大的優點就是簡單、有良好的選擇性(selectivity)，但由於使用化學溶液具有等方向性(isotropy)，蝕刻後將形成圓弧的輪廓，遮罩(Mask)下形成底切效應(Under cutting) 及關鍵尺寸(CD)的損失，此謂之等向性蝕刻。等向性蝕刻通常對下層物質具有很好的選擇比，但線寬定義不易控制當元件尺寸變很小時影響就很明顯此法也就不適用了。

濕蝕刻三步驟為擴散→反應→反應生成 如圖 2-2 所示

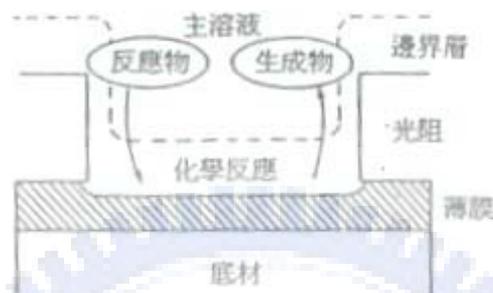


圖 2-2 濕式蝕刻反應機制圖

乾式蝕刻法(dry etching)：而乾蝕刻通常是一種電漿蝕刻(plasma etching)，電漿蝕刻中的蝕刻的作用，可能是電漿中離子撞擊晶片表面的物理性轟擊(Physical Bombardment)，或者是電漿中活性自由基(Active Radical)與元件(晶片)表面原子內的化學反應(Chemical Reaction)，或是兩者的複合作用，可分為三大類：

一、 物理性蝕刻：(1) 濺擊蝕刻(Sputter Etching) (2) 離子束蝕刻(Ion Beam Etching)

二、 化學性蝕刻：電漿蝕刻(Plasma Etching)

三、 物理、化學複合蝕刻：反應性離子蝕刻(Reactive Ion Etching)

由於蝕刻反應不涉及非以濕式的溶液來進行薄膜蝕刻的一種技術，所以稱為乾式蝕刻。利用低溫氣體輝光放電(glow discharge)，所產生的電漿來進行蝕刻，藉助具有方向性離子撞擊，造成特定方向的蝕刻，其最大優點就是具有達到異向性(anisotropy)的蝕刻能力，如圖 2-4，而蝕刻後形成垂直的輪廓。可定義較細微的線寬所以在做精細圖案轉移製程中幾乎都是採用此種方法。

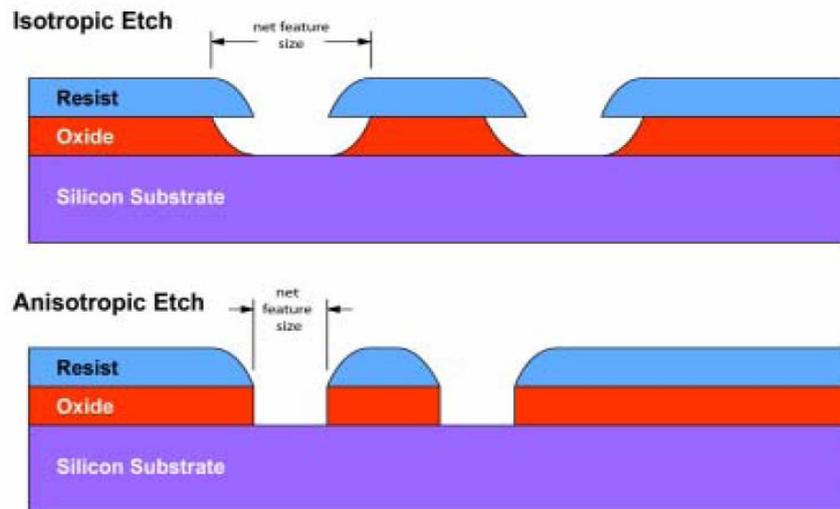


圖 2-3 等向性蝕刻與非等向性蝕刻

當最小的圖形尺寸縮小到 3 微米以下時候，濕式蝕刻就逐漸被乾式（電漿）蝕刻所取代。乾蝕刻由於蝕刻作用不同有四種主要的機制用以移去晶圓表面的物質，如圖 2-4 所示，分別為濺擊(sputtering)、純化學蝕刻(pure chemical etching)、離子能量趨入蝕刻(Ion energy driven etching)及離子增強-抑制物蝕刻(Ion-enhanced Inhibitor etching)。

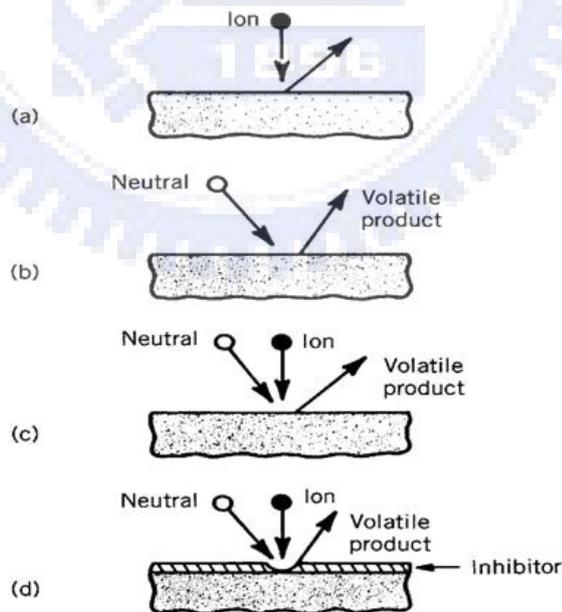


圖 2-4 乾式蝕刻主要機制

(a)濺擊(sputtering)，蝕刻過程皆為物理反應主要是利用高能離子撞擊薄膜，將欲蝕刻之原子打出，因此其主要優點有較佳的準直性，可減輕底切

(undercut)情形的發生。但離子不僅會撞擊在欲蝕刻之薄膜上，也會撞擊在光阻上，所以薄膜對光組的選擇性(selectivity)也會隨之降低。在蝕刻速率方面，由於打出一個原子需依靠蝕刻離子的撞擊，但離子通量(ion flux)與其他方法相比較之下小很多，故其蝕刻速率也相對較慢。

(b)純化學蝕刻(pure chemical etching)，利用氣相的蝕刻原子或分子和欲蝕刻之薄膜產生化學反應，把暴露在電漿下的薄膜，反應成揮發性(volatile)的生成物，而後被真空系統抽離。由於氣相的原子或分子到達薄膜時幾乎是均勻的角度分佈，因此在準直性方面就沒有濺擊來的佳。在蝕刻速率方面，由於到達薄膜的蝕刻物(etchant)通量很大，蝕刻率也就相對提升。此外，蝕刻率通常不是由蝕刻物(etchant)的通量所限定，而是由形成蝕刻產物(etch product)的化學反應所決定。

(c)離子驅策蝕刻(Ion energy-driven etching)，包括了蝕刻物(etchant)及高能離子至薄膜表面上，而這種組合的效應，比單純的濺擊及純化學蝕刻之蝕刻率都來的高。此蝕刻反應的主要機制為化學反應，但蝕刻速率卻由高能離子的撞擊所決定，若高能離子的能量大於臨界能量(threshold energy)約數伏特，則蝕刻速率會隨者離子能量上升而上升。由於離子撞擊薄膜時其方向幾近垂直，故蝕刻出來的外型也有非常好的垂直剖面。在選擇率方面，離子驅策蝕刻由於有高能離子的關係，選擇率並不如純化學蝕刻來的高。因蝕刻製程的需要，選擇率跟準直性必須做一取捨。

(d)離子增強-抑制物蝕刻(Ion-enhanced inhibitor etching)，此蝕刻機制與離子驅入蝕刻主要的差別為在蝕刻的過程中加入抑制物。抑制物的主要功用為，在蝕刻時吸附或沈積在薄膜上形成保護層或聚合物(polymer)。蝕刻物需選擇當缺乏離子撞擊或抑制物時，能和欲蝕刻之薄膜有較高的化學反應速率。離子撞擊的功用為避免抑制物的形成或清除抑制物，使得欲蝕刻薄膜之表面能完全接觸到蝕刻物。在離子未到達的部分，抑制物便會形成保護層，避免蝕刻物接觸到薄膜。舉例而言，以  $\text{CCl}_4 / \text{Cl}_2$  蝕刻鋁溝渠(trench)時，氯原子和氯分子對鋁的蝕刻速率

非常快，但此化學反應是均向性的，而在飼氣(feedgas)中加入碳，便會在薄膜表面形成碳氯化物的保護層，由於離子撞擊的準直性很好，便可清除在溝渠底部的保護層，使得氯原子及氯分子能和底部的鋁反應而繼續往下蝕刻，但在溝渠側壁的保護層不會受到離子的撞擊，便可避免側壁的鋁和氯原子及分子發生反應，如此一來便可得到相當好的垂直剖面

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。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(Selectivity)與均勻性(Uniformity)



## 2.2 ICP電漿蝕刻機介紹

在積體電路元件日益縮小化時，製程上對於更細微線寬的控制、蝕刻非等向性、蝕刻率、選擇比及電漿損害等等的要求越來越嚴格，也往往造成半導體廠良率不穩定的瓶頸。在低壓(< 50m torr)環境下，能將氣體解離出高密度電漿(high density plasma, HDP)的系統即因此需求而產生。在低壓下操作由於氣體分子的平均自由路徑比在高壓環境中來的大，因此粒子與分子間的碰撞機率也相對的減低，這有助於粒子對晶片所造成的蝕刻方向趨近於垂直。除了蝕刻截面的控制外，在低壓下還可降低微負載效應(microlading)和微粒的產生。另外高密度電漿系統具有獨立的電漿源與偏壓源可個別調整電漿的密度與離子的偏壓，對於蝕刻特性的掌握與蝕刻破壞的降低更能有效的達成。所以這種獨立控制電漿產生與低壓高密度的電漿蝕刻技術，已成為今後蝕刻技術發展的主要趨勢。

ICP (Inductively Coupled Plasma)感應耦合電漿源因其產生之電漿密度較高所以一般也稱為高密度電漿源，其系統之特徵為具有產生電漿之感應耦合線圈，ICP系統架構如圖 2-5 所示，在 ICP 電漿蝕刻機中，是利用放置於電漿腔體(chamber)頂端之 Antennas，通以一時變 RF 電流(頻率約在 13.56Mhz)，而這個時變電流便會在電漿腔體內感應出一時變磁場、電場及電流，在能量超過電漿產生的能階後，電漿便會生成，當 chamber 內達到擊穿電壓時，便發生電子雪崩反應，氣體因而電離，伴隨等量的正離子發生，氣體絕緣性崩潰，電漿形成，最終形成一個平衡態，使整個放電過程平穩持續，這便是 ICP 電漿的基本原理。而位於腔體下方之 RF 電源則主要是產生 Bias (偏壓)，用以產生自偏壓(self-bias)，此偏壓場會加速上方離子撞擊晶圓，並使離子有較佳的方向性，從而得到較佳的蝕刻輪廓，故一般亦有研究以改變 RF Bias 之電場分佈來改變離子方向性進而矯正腔體中間離子電場分佈較強問題以改善蝕刻均勻度，但這屬於蝕刻設備機制硬體研究，不在本論文討論範圍。目前感應式耦合電 ICP 源泛用於高密度電漿機台系統之設計，已有許多應用於奈米積體電路之蝕刻製程結果，然

而對於其電漿特性之研究則較少被提出，本論文不在討論這些特性，在於利用數學模型解決這些難以捉摸的因素，進而快速調整製程達到穩定。

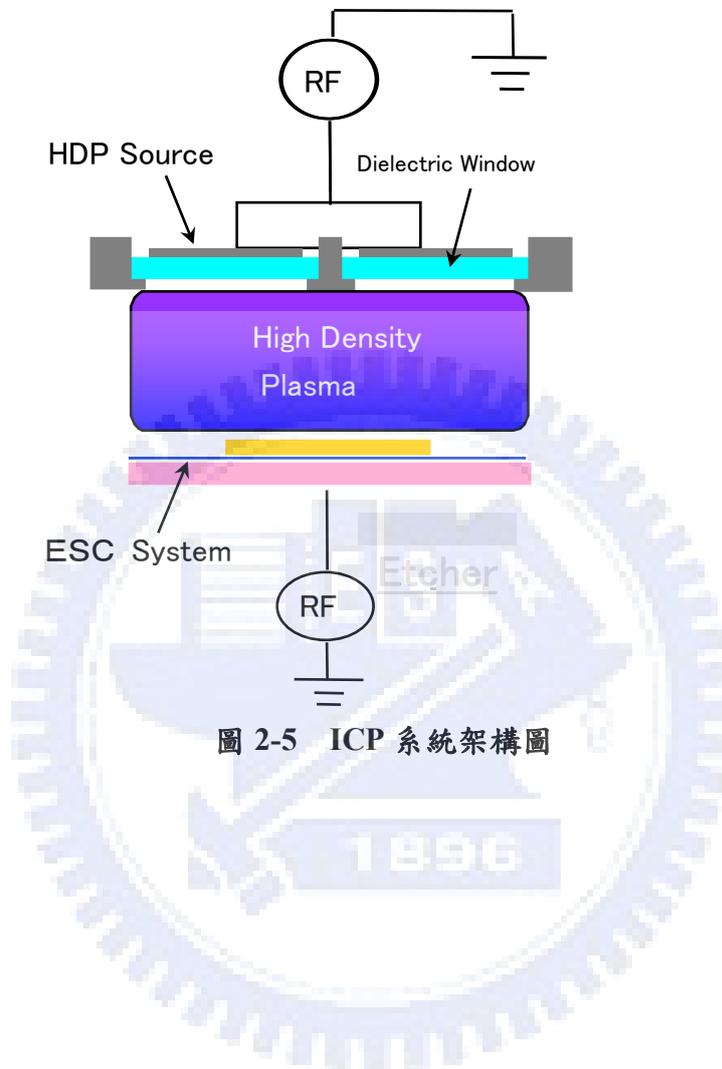


圖 2-5 ICP 系統架構圖

本論文使用 DES- MS450NEA 為實驗設備規格如表 2-1，設備如圖 2-6

表 2-1 MS450NEA 蝕刻機規格表

廠牌／型號：	YAC/DES-MS450NEA (YAC450)
使用材料：	主要針對 370×470mm、厚度 0.7~1.1mm 之玻璃基板，可進行乾蝕刻和光阻灰化(Ashing)功能。
製程原理簡介：	YAC450 為利用乾式蝕刻中的感應偶合/反應式離子蝕刻(CIP/RIE)方式將未被光阻覆蓋的 MoW、a-Si、SiNx、Al...等薄膜材料及光阻材料有效地移除乾淨，完成基板上電路佈局的圖形轉移。
功能說明：	此大面積乾式蝕刻機台提供平面顯示器 Array 製程所需之各種薄膜沈積後的蝕刻應用，該設備係據以進行 SiO <sub>2</sub> 、Al 及 ITO 等蝕刻製程，和 PR 去光阻製程。
製程規格及能力：	<p><u>a-Si 蝕刻</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 蝕刻率 1100±150 A/min</li> <li>* 蝕刻均勻度 ≤ 10 %</li> </ul> <p><u>Oxide 蝕刻</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 蝕刻率 1650±330 A/min</li> <li>* 蝕刻均勻度 ≤ 12%</li> </ul>



圖 2-6 實驗蝕刻機

## 第三章 蝕刻製程之實驗設計法

### 3.1 何謂實驗設計法

實驗設計是探討實驗進行的方式以及對實驗觀測值的解析法，以提高獲得情報的效率且使實驗成本最低的一門學問。亦即利用事前有計劃及考慮周詳的資料蒐集程序來進行實驗，而使得實驗結果的再現性很高、配置實驗的伸縮性大、實驗次數較少、實驗配置容易與解析方法較為簡便的方法。為達成上述之目標，我們必須採用科學的途徑來規劃實驗。所謂科學的途徑即是以統計方法的實驗設計來規劃實驗的過程，使得以利用統計方法來分析的合宜資料可被蒐集，而得到正確、客觀的結論。而且當資料牽涉到實驗誤差時，統計方法是分析的唯一客觀途徑。

要以統計方法來設計並分析一個實驗，相關人員必須在事前就對到底要研究什麼、資料要如何蒐集，及至少定性瞭解資料要如何分析等事情有一個清晰的概念。如表 3-1 所示，為實驗設計人員提供一個設計實驗的步驟大綱：

表 3-1 設計實驗之步驟大綱

1、	問題的認知及陳述
2、	因子、水準及範圍的選擇
3、	反應變數的選擇
4、	實驗設計的選擇
5、	執行實驗
6、	資料的統計分析
7、	結論與建議

在這整個設計實驗的過程裡，還必須注意三個重要的基本實驗設計原

理，即重複（replication）、隨機化（randomization）和區集劃分（blocking）。

所謂重複，我們指基本實驗的重複再作。重複有兩個重要的性質。第一、它允許實驗者可以估計實驗誤差的變異數。第二、如果樣本平均值是用來估計實驗中因子效應，則重複使得實驗者可以得到更精確的效應估計值。

隨機化是實驗設計中使用統計方法的背後基石。所謂的隨機化，我們指的是實驗材料的配置及各個試驗的進行順序兩者。統計方法要求觀測值（或誤差）為分配獨立的隨機變數。隨機化的過程通常可以確保這個假設成立。實驗透過適當的隨機化，亦有助於“扯平”（average out）可能出現的外來因子的干擾。一般而言，隨機實驗順序由可由亂數產生器（random number generator）產生。

區集劃分是一個設計技巧，它用於眾多因子比較時，改善比較的精確度。區集劃分常用於減低或者消除干擾因子（nuisance factors）形成的變異。

以上所提的三個實驗設計的基本原理將是每一個實驗所必須包含的重要部份。

### 3.2 蝕刻製程之實驗設計與輸出變異數分析

本論文以目前工研院之低溫多晶矽 LTPS (Low Temperature Polysilicon) 之製程為案例，此製程之結構如圖 3-1 所示，我們希望能控制閘極氧化層(Gate Oxide)之蝕刻，此一蝕刻製程為金屬層 II(Metal II)之前製程，需進行深度的接觸孔(contact hole)製程，將蝕刻  $\text{SiO}_2$  達  $4\text{K}\text{\AA}$  之深度 (Interlayer + Gate insulator)

但為了實驗容易進行我們採用玻璃基版上鍍  $\text{SiO}_2$   $3\text{K}\text{\AA}$ ，如圖 3-2 所示，來進行 DOE 實驗，這樣可以容易的進行驗證，不需要每次進行前製程耗費人力財力。

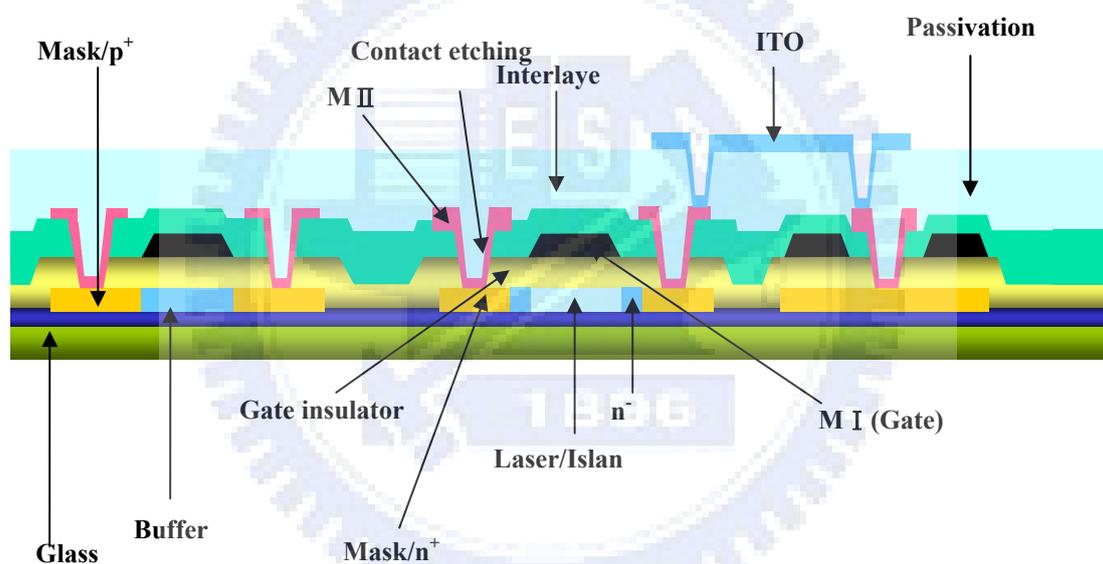


圖 3-1 LTPS TFT Array 結構



圖 3-2 玻璃基版+ $3\text{K}\text{\AA}$   $\text{SiO}_2$

本實驗設計之目的主要是為了建立電漿蝕刻製程中主要控制因子（腔體壓力、RF Bias 及  $\text{CF}_4$  流量）與品質要求（蝕刻率）之關係，並依此模型做為批次控制之依據。

此實驗為  $3^2$  全因子實驗（三因子，兩水準），重複次數為兩次。

實驗設計及實驗結果如表 3-2 所示。

表 3-2 蝕刻率大小之實驗

	Pressure	RF bias	CF4	Etch Rate
1	30	465	410	1119
2	30	465	410	1105
3	30	465	430	1190
4	30	465	430	1198
5	30	485	410	1158
6	30	485	410	1172
7	30	485	430	1205
8	30	485	430	1198
9	40	465	410	1210
10	40	465	410	1233
11	40	465	430	1295
12	40	465	430	1278
13	40	485	410	1265
14	40	485	410	1277
15	40	485	430	1330
16	40	485	430	1318

將上述的實驗數據與結果利用 STATISTICA 統計軟體來進行資料的統計分析與計算。經由變異數分析後發現，上述三項輸入皆對輸出有顯著的影響，且 RF Bias 與 CF<sub>4</sub> 間也有明顯的交互作用。如下表 3-3 所示：

表 3-3 蝕刻率變異數分析表

Univariate Tests of Significance for ER (450E_DOE2_asi)					
Sigma-restricted parameterization					
Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	23890100	1	23890100	237269.8	0.000000
Pressure	46333	1	46333	460.2	0.000000
RFbias	5439	1	5439	54.0	0.000080
"CF4"	13983	1	13983	138.9	0.000002
Pressure*RFbias	176	1	176	1.7	0.223203
Pressure*"CF4"	0	1	0	0.0	0.980733
RFbias*"CF4"	827	1	827	8.2	0.020984
Pressure*RFbias*"CF4"	281	1	281	2.8	0.133615
Error	806	8	101		

### 3.3 DOE實驗數據之迴歸分析

迴歸分析(Regression Analysis)之主要目的，是在探討依變數(Y)與各個自變數(X)之間的關係，將其相互關係以數學方程式表示之，以便預估依變數的值，並用它來解釋變數之間的相關特性，當簡單的線性迴歸模型不能擬合變數間關係時，即可考慮用非線性數學模型加上非線性迴歸法來建立最適當之擬合曲線。

在本文中將製程的輸入與輸出項目利用統計分析軟體做非線性迴歸分析，便可以建立基本的輸入輸出模型(Input/Output Model)，而依據迴歸分析也可以建立控制器的預測模組(Predict Model)。

迴歸分析乃利用 DOE 實驗檢定出之對輸出參數有顯著影響因子去擬合找出最佳之非線性迴歸係數，結果如下列所示：

$$Y = 9.046X_1 + 7.432X_2 + 7.141X_3 - 0.015X_2 * X_3 - 2614.713 + \varepsilon \quad (3.1)$$

$$R_{adj}^2 = 0.971$$

最佳之線性迴歸係數，結果如下所示：

$$Y = 10.765X_1 + 1.847X_2 + 2.964X_3 - 1272.156 + \varepsilon \quad (3.2)$$

$$R_{adj}^2 = 0.9614$$

其中

Y：為輸出變數，即蝕速率。

X<sub>1</sub>：為一輸入變數，腔體壓力。

X<sub>2</sub>：為輸入變數，RF Bias。

X<sub>3</sub>：為輸入變數，CF<sub>4</sub> 流量。

R<sup>2</sup><sub>adj</sub>：調整的 R<sup>2</sup> 統計量 (adjust R<sup>2</sup> statistic)。

ε：為製程干擾  $\varepsilon \sim NID(0, 0.00525^2)$ 。

另外，假設製程在時間 t 的輸出值 Y<sub>t</sub> 可表示為輸入值 X<sub>t-1</sub> 之下述關係模型，  
即將(3.1)式改寫為：

$$Y_t = 9.046X_{1,t-1} + 7.432X_{2,t-1} + 7.141X_{3,t-1} - 0.015X_{2,t-1} * X_{3,t-1} - 2614.713 + \varepsilon_t \quad (3.3)$$

表 3-4 非線性迴歸分析表

Model is: ER=b0+b1*Pressure+b2*RFbias+b3*CF4+b4*RFbias*CF4 (450E_DOE3_asi)						
Dep. Var. : ER						
Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 11	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
b0	-2614.71	3064.417	-0.85325	0.411715	-9359.45	4130.024
<b>b1</b>	<b>9.05</b>	<b>1.834</b>	<b>4.93109</b>	<b>0.000449</b>	<b>5.01</b>	<b>13.084</b>
b2	7.43	6.583	1.12914	0.282861	-7.06	21.921
b3	7.14	6.317	1.13051	0.282309	-6.76	21.045
b4	-0.02	0.014	-1.10362	0.293316	-0.05	0.015

表 3-5 線性迴歸分析表

Regression Summary for Dependent Variable: ER (450E_DOE3_asi)						
R= .98448938 R2= .96921935 Adjusted R2= .96152418						
F(3,12)=125.95 p<.00000 Std.Error of estimate: 13.192						
N=16	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(12)	p-level
Intercept			-1272.16	210.4026	-6.04629	0.000058
<b>Pressure</b>	<b>0.826401</b>	<b>0.050646</b>	<b>10.76</b>	<b>0.6596</b>	<b>16.31708</b>	<b>0.000000</b>
RFbias	0.283146	0.050646	1.84	0.3298	5.59064	0.000118
CF4	0.453993	0.050646	2.96	0.3298	8.96397	0.000001

# 第四章 EWMA 估測器 與最小變異控制器

## 4.1 EWMA 估測器

由上述之實驗設計法可以得知，本 Dry-etch 系統為一非線性系統，為了較為準確的估測此非線性系統，本文延伸原本線性單變量 EWMA 估測器為非線性多變量 D-EWMA 估測器，以正確的估測此系統之位移干擾與飄移。

### 4.1.1. 線性單變量 EWMA 估測器

EWMA 之估測方式主要是利用製程輸出的量測值與預測模型輸出值之間的殘差，以及歷史的製程模型截距項，來得到最佳的截距估測值更新製程模型，吾人假設一個已經經由實驗設計得到最佳化，且具有位移干擾的情形發生之製程的輸入與輸出值可用一個線性的模型表示為：

$$y_k = \alpha + \beta u_{k-1} + \varepsilon_k \quad (4.1)$$

其中  $y_k$  為真實製程的輸出值， $u_{k-1}$  為製程配方的輸入， $\alpha$  為真實製程模型的截距項之初始值， $\beta$  為真實製程模型的斜率， $\varepsilon_k$  為製程干擾， $k$  為製程的批次數。

假設真實製程模型如(4.1)所示，使用一個預測模型來估計真實的製程模型，其預測模型為：

$$\hat{y}_k = a_{k-1} + b u_{k-1} \quad (4.2)$$

其中  $\hat{y}_k$  為預測模型的輸出值， $a_{k-1}$  為預測模型的截距項， $b$  為預測模型的斜率。當每一批次的製程完成後，收集輸出的量測值，然後用來計算輸出的量測值與預測值的殘差：

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (4.3)$$

每當獲得一個輸出的量測值之後，使用指數加權移動平均的方法來更新製程

模型的截距項  $a_k$ ，則  $a_k$  定義如下：

$$a_k = w(y_k - bu_{k-1}) + (1-w)a_{k-1} \quad (4.4)$$

其中  $w$  為 EWMA 方法的權值，若權值為 0 表示不更新截距項的估計，權值為 1 則表示完全依照前一批次的量測值來更新截距項的估計，權值越大則截距項的估計越依賴最近量測的資料，預測模型截距項調整的幅度越大；權值越小則預測模型截距項調整的幅度越小。

#### 4.1.2. 線性單變量 D-EWMA 估測器

在半導體製程中由於機器設備的磨損、材料的消耗，通常會使製程輸出值隨著批次增加，而慢慢偏離預設的目標值，便形成漂移，D-EWMA 估測方法的原理與 EWMA 估測方法很相似，不同處是它用了兩個 EWMA 的演算法，一個用來彌補製程干擾所造成的變異，另一個用來估計批次與批次之間的單位漂移量。如此一來，D-EWMA 估測方法能更有效估測漂移干擾中的製程。

假設真實製程模型如(4.5)所示

$$y_k = \alpha + \beta u_{k-1} + \delta \times k + \varepsilon_k \quad (4.5)$$

其中  $y_k$  為真實製程模型的輸出值， $u_{k-1}$  為真實製程模型的輸入， $\alpha$  為製程模型的初始截距項， $\beta$  為製程模型的斜率， $\varepsilon_k$  為製程干擾， $\delta$  為製程單位漂移量。

D-EWMA 控制方法的預測模型為：

$$\hat{y}_k = a_{k-1} + p_{k-1} + bu_{k-1} \quad (4.6)$$

其中  $\hat{y}_k$  為預測模型的輸出值， $a_{k-1}$  為預測模型第 k-1 批次的截距項， $p_{k-1}$  為預測模型第 k-1 批次的截距項漂移量， $b$  為預測模型的斜率。

每當獲得一個輸出的量測值之後，使用指數加權移動平均的方法來估計控制模型的截距項  $a_k$  與截距項的漂移量  $p_k$ ，其定義如下：

$$a_k = w_1(y_k - bu_{k-1}) + (1-w_1)(a_{k-1} + p_{k-1}) \quad (4.7)$$

$$p_k = w_2 (y_k - bu_{k-1} - a_{k-1}) + (1 - w_2) p_{k-1} \quad (4.8)$$

其中  $w_1$  和  $w_2$  分別為 D-EWMA 控制方法截距項與截距項漂移量的權值，估計出新的預測模型截距項與截距項的漂移量後，可以將兩者所估計出的製程干擾程度，反應在新的預測模型中。

#### 4.1.3. 非線性多變量 D-EWMA

目前半導體廠在機台製程控制上，大部分利用簡單的線性單變量 EWMA 控制器，處理具有多輸入多輸出(MIMO)線性模型之系統，但許多製程系統(如 CVD、CMP 等)，其輸入與輸出項間的關係都是具有非線性之結構，因此本論文延伸傳統線性單變量 D-EWMA 變為非線性多變量 D-EWMA，以求得更準確之製程估計模型。

為了估計 3.3 節利用迴歸分析所求得之非線性製程模型之干擾與長期漂，

(3.2) 式可以改寫為

$$Y_k = LU_{k-1} + NZ_{k-1} + A + \Delta \times k_{k-1} + E_k \quad (4.9)$$

其中  $Y$  為輸出目標矩陣， $Z$  為線性項輸入矩陣， $U$  為非線性項輸入矩陣， $L$  線性項係數矩陣， $N$  為非線性項係數矩陣， $A$  為截距項矩陣， $\Delta$  為單位漂量矩陣， $E$  為製程干擾矩陣。

而非線性 D-EWMA 控制方法的預測模型為：

$$\hat{Y}_k = LU_{k-1} + NZ_{k-1} + A_{k-1} + P_{k-1} \quad (4.10)$$

其中  $\hat{Y}_k$  為預測模型的輸出值矩陣， $U_{k-1}$  為線性項輸入矩陣， $Z_{k-1}$  為非線性項輸入矩陣， $L$  線性項係數矩陣， $N$  為非線性項係數矩陣， $A_{k-1}$  為預測模型第  $k-1$  批次的截距項矩陣， $P_{k-1}$  為預測模型第  $k-1$  批次的截距項漂移量矩陣。

控制模型的截距項  $A_k$  與截距項的漂移量  $P_k$ ，其定義如下：

$$A_k = \Omega_1 (Y_k - LU_{k-1} - NZ_{k-1}) + (1 - \Omega_1)(A_{k-1} + P_{k-1}) \quad (4.11)$$

$$P_k = \Omega_2 (Y_k - LU_{k-1} - NZ_{k-1} - A_{k-1}) + (1 - \Omega_2)P_{k-1} \quad (4.12)$$

其中  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分別為 D-EWMA 控制方法截距項與截距項漂移量的權值矩陣，估計出新的預測模型截距項與截距項的漂移量後，可以將兩者所估計出的製程干擾程度，反應在新的預測模型中。

## 4.2 最小變異控制器

在估出控制系統模型後，本論文利用最小變異控制器在非線性系統中，求出最佳輸入參數（製程配方），因此本論文先定義出最小變異之品質函數（cost function）希望在此函數最小的情況下，得到新的輸入值，即在輸入值變動最小的情況下，使得預測的目標值能最接近期望值的目標，得到最佳輸入值。

下列式子為最小變異控制器的品質函數：

$$J_k = (\hat{Y}_{k+1} - T)^T W (\hat{Y}_{k+1} - T) + (U_k - U_{k-1})^T \Gamma (U_k - U_{k-1}) \quad (4.13)$$

上式： $\hat{Y}_{k+1}$  為預測之輸出矩陣、 $T$  為目標矩陣、 $W$  為輸出權重矩陣、 $\Gamma$  為輸入權重矩陣， $Z_k$  為輸入矩陣。

下列為輸入與輸出兩個個限制式

$$Low_u \leq U_k \leq Up_u$$

$$Low_y \leq \hat{Y}_{k+1} \leq Up_y$$

上式  $Low_u$ 、 $Up_u$ 、 $Low_y$ 、 $Up_y$  分別輸入值與輸出值之上限與下限

將 (4.10) 式代入 (4.13) 式中

$$\begin{aligned}
 \mathbf{J}_k &= (\hat{Y}_{k+1} - T)^T \mathbf{W} (\hat{Y}_{k+1} - T) + (U_k - U_{k-1})^T \mathbf{\Gamma} (U_k - U_{k-1}) \\
 &= (LU_k + NZ_k + A_k + P_k - T)^T \mathbf{W} (LU_k + NZ_k + A_k + P_k - T) \\
 &\quad + (U_k - U_{k-1})^T \mathbf{\Gamma} (U_k - U_{k-1})
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

由於無法得到  $Z_k$  四次方的解析解，只好以 Davidon Fletcher Powell Method

(DFP) 數值解的方式求解  $U_k$ 。

DFP 法求解的步驟如下：

步驟 1：設定起始參數  $\mathbf{X}_1$ ，矩陣  $\mathbf{B}_1 = \mathbf{I}$ ，迭代數  $i=1$ 。

步驟 2：計算  $\nabla J_{i,k}$  在  $\mathbf{X}_i$  的梯度向量，並設

$$\mathbf{S}_i = -(\mathbf{B}_i) \nabla J_{k,i} \tag{4.15}$$

步驟 3：在  $\mathbf{S}_i$  的方向找尋最佳的步長  $\lambda_i^*$ ，並設

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{X}_i + \lambda_i^* \mathbf{S}_i \tag{4.16}$$

步驟 4：嘗試新的  $\mathbf{X}_{i+1}$  直到最好。假如  $\mathbf{X}_{i+1}$  為最佳解則停止運算

，否則到步驟 5。

步驟 5：更新  $\mathbf{B}_i$

$$\mathbf{B}_{i+1} = \mathbf{B}_i + \mathbf{M}_i + \mathbf{N}_i \tag{4.17}$$

其中  $\mathbf{M}_i$ 、 $\mathbf{N}_i$  為相關性矩陣， $\mathbf{g}_i = \mathbf{S}_{i+1} - \mathbf{B}_i$

$$\mathbf{M}_i = \lambda_i^* \frac{\mathbf{S}_i \mathbf{S}_i^T}{\mathbf{S}_i^T \mathbf{g}_i} \quad , \quad \mathbf{N}_i = -\frac{(\mathbf{B}_i \mathbf{g}_i)(\mathbf{B}_i \mathbf{g}_i)^T}{\mathbf{g}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{g}_i}$$

步驟 6 設定新的迭代數  $i = i + 1$ ，並到步驟 2。

### 4.3 系統控制架構

結合上述之估測器與控制器，本研究之控制架構，如下圖 4-1 所示， $U_{k-1}$  為機台配方，當  $U_{k-1}$  輸入機台進行製程並同時受到製程干擾後可量得製程輸出  $Y_k$ ，預測模型根據先前之製程估測值與最近一步之量測值  $Y_k$  估計出在  $k+1$  時間之製程模型，最後最小變異控制器再依照本系統所設定出來之品質函數，找到最佳之製程配方  $U_k$ 。

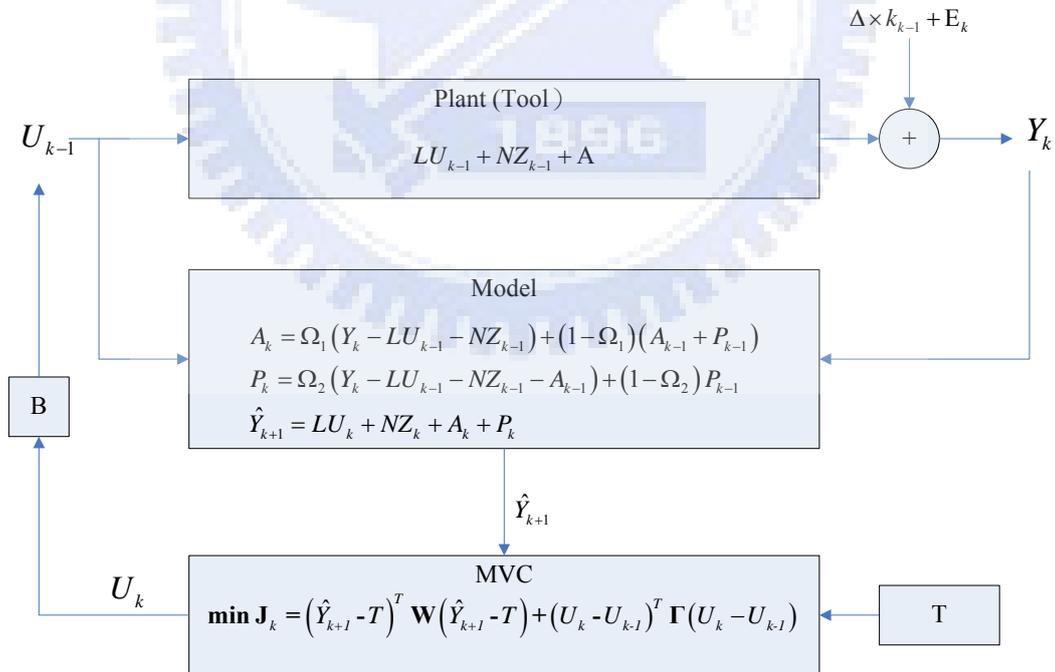


圖 4-1 控制流程圖

## 第五章 模擬結果與驗證

### 5.1 模擬系統設定

本論文之模擬分為兩個部分進行，第一部份是針對製程中最常發生之位移干擾與飄移現象，給予不同程度之位移與飄移干擾。第二部分乃是利用從廠內真實機台中取出之歷史資料來模擬真實製程中之干擾。而控制效能之展現則是與線性 D-EWMA 比較。

根據 3.3 節之迴歸分析，本論文將模擬的製程模型(plant)如下：

$$Y_t = 9.046X_{1,t-1} + 7.432X_{2,t-1} + 7.141X_{3,t-1} - 0.015X_{2,t-1} * X_{3,t-1} - 2614.713 + \varepsilon_t$$

$Y_t$ ：為真實系統輸出，即蝕刻率。

$X_{1,t-1}$ ：為輸入變數，腔體壓力。

$X_{2,t-1}$ ：為輸入變數，RF Bias。

$X_{3,t-1}$ ：為輸入變數，CF4 流量。

$\varepsilon_t$ ：為製程干擾

非線性預測模型則（非線性 D-EWMA model）為：

$$\hat{Y}_{non,t} = 9.046X_{1,t-1} + 7.432X_{2,t-1} + 7.141X_{3,t-1} - 0.015X_{2,t-1} * X_{3,t-1} + a_{t-1} + p_{t-1}$$

$\hat{Y}_{non,t}$ ：為非線性模型預測之系統輸出

$$a_0 = -2614.73 ; p_0 = 0$$

而將實驗資料作線性迴歸可得線性預測模型（線性 D-EWMA model）：

$$\hat{Y}_{line,t} = 10.765X_{1,t-1} + 1.847X_{2,t-1} + 2.964X_{3,t-1} + a_{t-1} + p_{t-1}$$

$\hat{Y}_{line,t}$ ：為線性模型預測之系統輸出

$$a_0 = -1272.156 ; p_0 = 0$$

## 5.2 模擬結果

本論文模擬分成以下兩部分，模擬結果比較非線性 D-EWMA 線性 D-EWMA 與未控制之輸出值，比較指標包括：均方根誤差、平均值與標準差。

### 5.2.1. 位移與漂移干擾之模擬

第一部份模擬是分別給予不同程度的之模擬製程位移干擾與飄移干擾，且假設本製程無任何雜訊，藉以分析系統及控制器性能，模擬設定如下：

干擾部分：

1、位移干擾模擬：在第 5 個批次加入大小為截距的 3% 之 Shift disturbance

2、漂移干擾模擬：在第 5 個批次到第 25 個批次加入 Drift disturbance 其增量分別為每步 0.5%

D-EWMA 權重部分：

為了找出針對兩種情況最適合權重，本論文採用窮舉搜尋法找出最佳權重，兩個權重  $\Omega_1$  與  $\Omega_2$  分別從 0.1~1，以 0.1 為間隔，總共 100 個案例，從中找出 RMSE 最低之案例，以此權重為最佳權重。搜尋結果如下表 5-1 至 5-4 與圖 5-1 至 5-4 所示，因此本論文選擇以下權重為最後模擬權重。

位移干擾模擬: Non-Linear EWMA  $\Omega_1 = 1$   $\Omega_2 = 0.1$

Linear EWMA  $\Omega_1 = 1$   $\Omega_2 = 0.1$

漂移干擾模擬: Non-Linear EWMA  $\Omega_1 = 1$   $\Omega_2 = 1$

Linear EWMA  $\Omega_1 = 1$   $\Omega_2 = 0.4$

表 5-1 Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case)

		Non-Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.1	31.9527	24.1786	20.391	18.2272	16.8571	15.9455	15.3353	14.9454	14.7329	14.6771
0.2	0.2	32.3621	24.5128	20.6903	18.5128	17.14	16.2337	15.6361	15.266	15.0813	15.0636
0.3	0.3	32.9199	24.8698	21.0052	18.8134	17.4387	16.5393	15.9561	15.6084	15.4555	15.4818
0.4	0.4	33.5155	25.2505	21.3362	19.1303	17.7549	16.8641	16.298	15.9765	15.8609	15.9391
0.5	0.5	33.8284	25.6323	21.6842	19.4649	18.0902	17.2103	16.6646	16.3739	16.3021	16.4421
0.6	0.6	34.3884	26.0283	22.0501	19.819	18.4466	17.5802	17.0587	16.8044	16.7847	16.9988
0.7	0.7	34.9507	26.4682	22.4377	20.1945	18.8264	17.9766	17.484	17.273	17.3155	17.6193
0.8	0.8	35.4261	26.9034	22.8471	20.5937	19.2322	18.4029	17.9448	17.7854	17.9028	18.3167
0.9	0.9	36.1006	27.3902	23.2813	21.0189	19.6671	18.8629	18.4463	18.3488	18.5574	19.1083
1	1	36.6314	27.8798	23.7431	21.4733	20.1347	19.3612	18.9946	18.9724	19.2932	20.0169

表 5-2 linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case)

		Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.1	36.2025	26.6181	21.7971	19.1065	17.4739	16.421	15.7129	15.2263	14.8948	14.6836
0.2	0.2	29.9924	23.1033	19.746	17.9243	16.8317	16.1218	15.6341	15.2904	15.0534	14.908
0.3	0.3	25.9463	21.2551	18.9418	17.6694	16.8772	16.3314	15.9308	15.6313	15.4165	15.2847
0.4	0.4	24.5802	21.0909	19.2615	18.1801	17.452	16.9113	16.4891	16.1589	15.9149	15.7622
0.5	0.5	26.0013	22.3827	20.4271	19.2235	18.3753	17.7233	17.2035	16.7929	16.488	16.2952
0.6	0.6	28.782	24.4808	22.0901	20.5717	19.4868	18.6514	17.9892	17.4708	17.0896	16.8504
0.7	0.7	32.6902	27.091	23.9964	22.0479	20.6638	19.6084	18.7829	18.1469	17.6876	17.4059
0.8	0.8	36.718	29.7535	25.941	23.5267	21.8198	20.5328	19.541	18.7906	18.2613	17.9493
0.9	0.9	40.6901	32.4175	27.8177	24.9251	22.8963	21.3834	20.2347	19.383	18.7999	18.4761
1	1	44.6442	34.8456	29.5305	26.1887	23.8557	22.134	20.8473	19.9149	19.3006	18.9891

**表 5-3 Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case)**

		Non-Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.1	19.5488	16.3582	14.3165	12.7269	11.4393	10.3815	9.5043	8.7716	8.1559	7.6358
0.2	0.1	18.1566	13.4564	11.1509	9.776	8.8141	8.075	7.4782	6.9832	6.5669	6.2143
0.3	0.1	12.5687	10.4023	9.1239	8.1722	7.4301	6.8413	6.3658	5.9763	5.6543	5.3874
0.4	0.1	11.3607	9.2657	8.009	7.1576	6.5313	6.0435	5.6509	5.3301	5.0673	4.8537
0.5	0.1	11.4626	8.6393	7.2696	6.473	5.9222	5.5003	5.1625	4.8884	4.667	4.4918
0.6	0.1	9.8801	7.6409	6.6146	5.9738	5.4975	5.1219	4.8203	4.5781	4.3867	4.2416
0.7	0.1	8.2973	6.9605	6.2114	5.6465	5.2036	4.8537	4.5756	4.3564	4.1888	4.0695
0.8	0.1	8.2355	6.8942	6.0347	5.4312	4.9923	4.6575	4.3966	4.1965	4.0503	3.9558
0.9	0.1	8.8706	6.9287	5.8732	5.2523	4.8279	4.5081	4.2634	4.0818	3.9573	3.8889
1	0.1	8.8476	6.6257	5.6481	5.0944	4.696	4.392	4.1645	4.0029	3.9017	3.8627

**表 5-4 Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case)**

		Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.1	16.5152	15.3244	14.2067	13.1427	12.1565	11.2658	10.4767	9.7882	9.197	8.7005
0.2	0.1	12.7118	12.0649	11.2059	10.3903	9.6697	9.0376	8.4836	8.0031	7.5966	7.2671
0.3	0.1	16.5784	13.2654	11.3238	10.0769	9.1725	8.4595	7.8775	7.4022	7.0245	6.7419
0.4	0.1	16.6762	13.1525	11.313	10.0833	9.1331	8.3651	7.7421	7.245	6.8645	6.5969
0.5	0.1	17.2224	13.8604	11.8653	10.4289	9.3301	8.4712	7.796	7.2732	6.8869	6.6303
0.6	0.1	20.619	15.6306	12.7461	10.8946	9.6042	8.6509	7.9274	7.3834	6.9958	6.7542
0.7	0.1	22.844	16.6104	13.2469	11.2127	9.8363	8.8324	8.0803	7.5269	7.1471	6.9282
0.8	0.1	23.1643	16.7282	13.4236	11.4189	10.0259	8.997	8.2318	7.6816	7.3208	7.1342
0.9	0.1	22.6775	16.7481	13.6332	11.6275	10.1951	9.1416	8.3736	7.8394	7.5095	7.3657
1	0.1	23.1804	17.2778	13.9824	11.8306	10.3291	9.2592	8.5037	7.9998	7.7133	7.6227

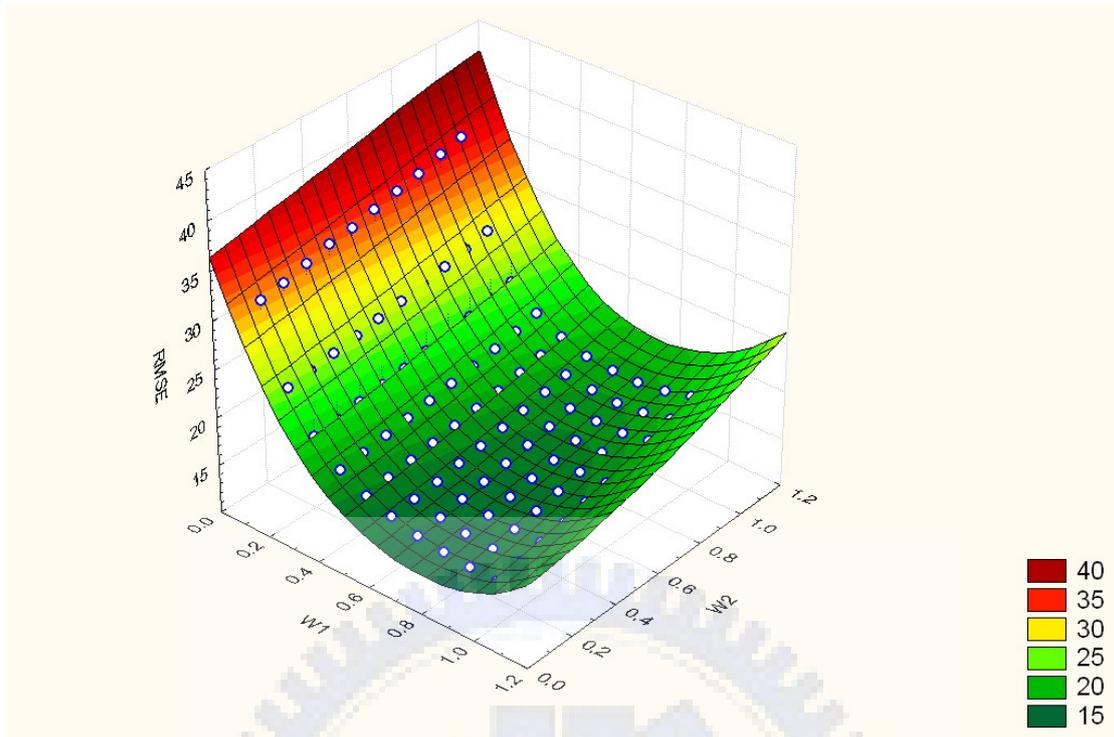


圖 5-1 Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case)

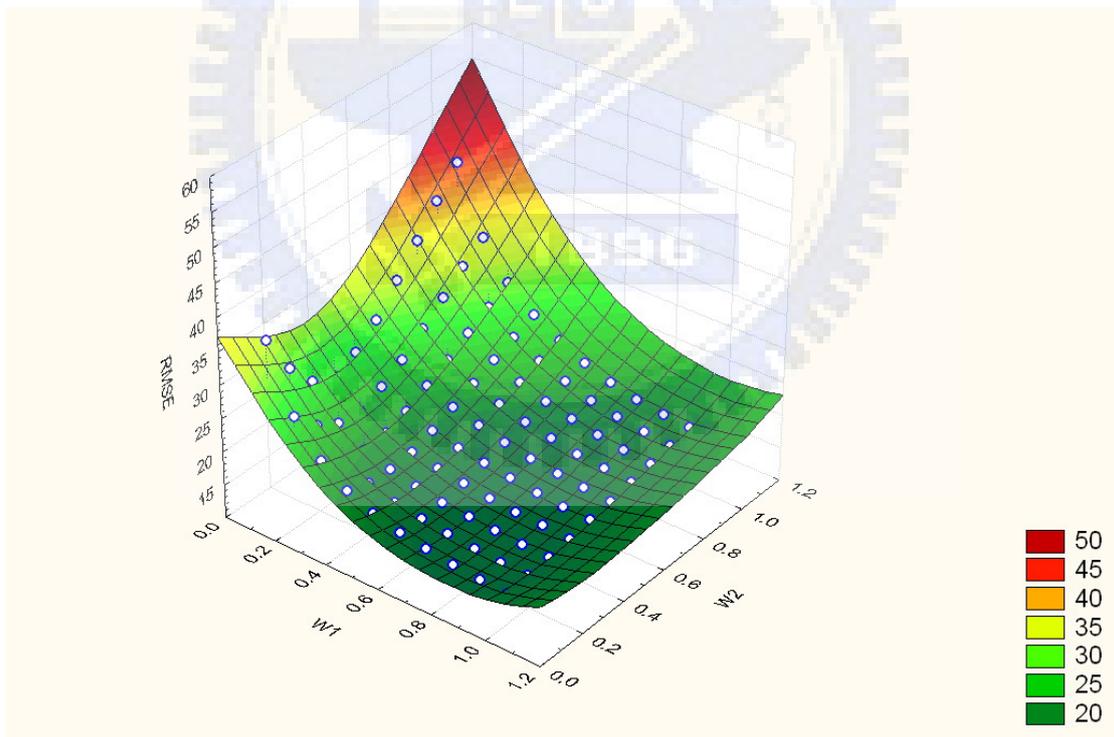


圖 5-2 Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Shift Case)

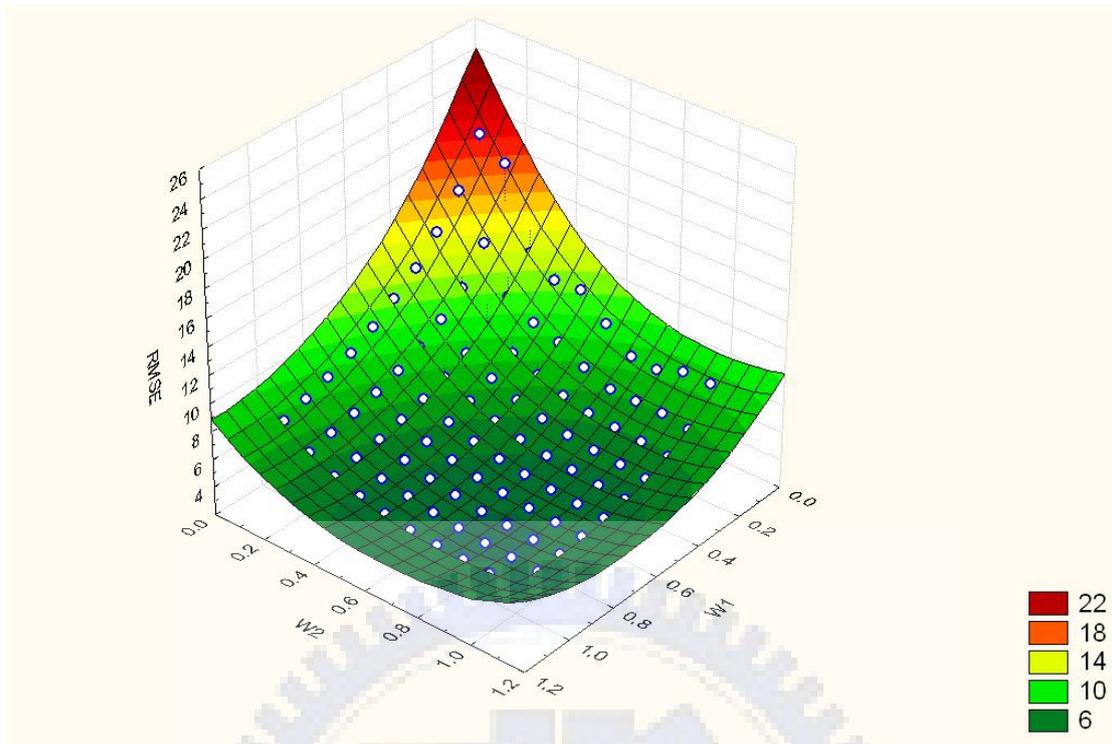


圖 5-3 Non-linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case)

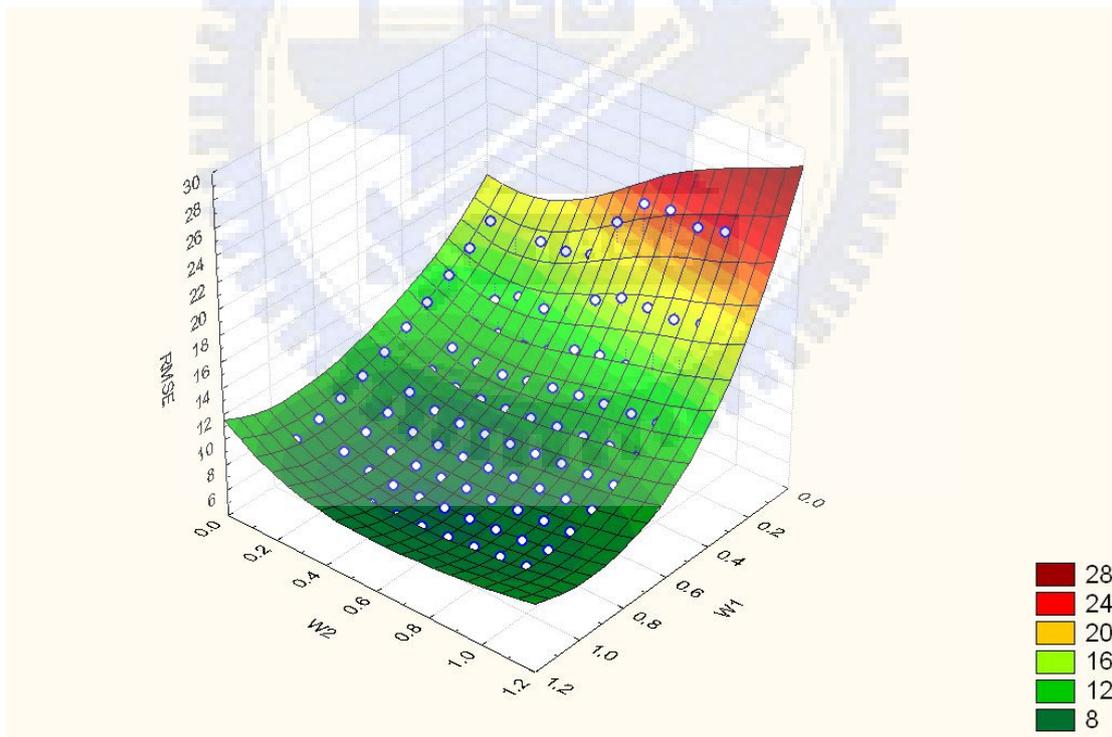


圖 5-4 Linear D-EWMA 不同權重之均方根誤差(Drift Case)

圖 5-5 至圖 5-8 表示在平移干擾下利用非線性 D-EWMA 控制之輸出結果與輸入值，並與製程未經控制及線性 D-EWMA 控制方法控制之比較。

圖 5-5 顯示在 Shift 干擾發生時，兩個 D-EWMA 控制器皆可以快速的拉回目標值附近，在各項指標上兩個控制器差異不大，但非線性 D-EWMA 控制器仍優於線性 EWMA 控制器，其輸入值如圖 5-6 至圖 5-8 所示。表 5-5 也說明非線性 D-EWMA 不管是在均方根誤差(RMSE)或標準差(STD)都比線性 D-EWMA 好。

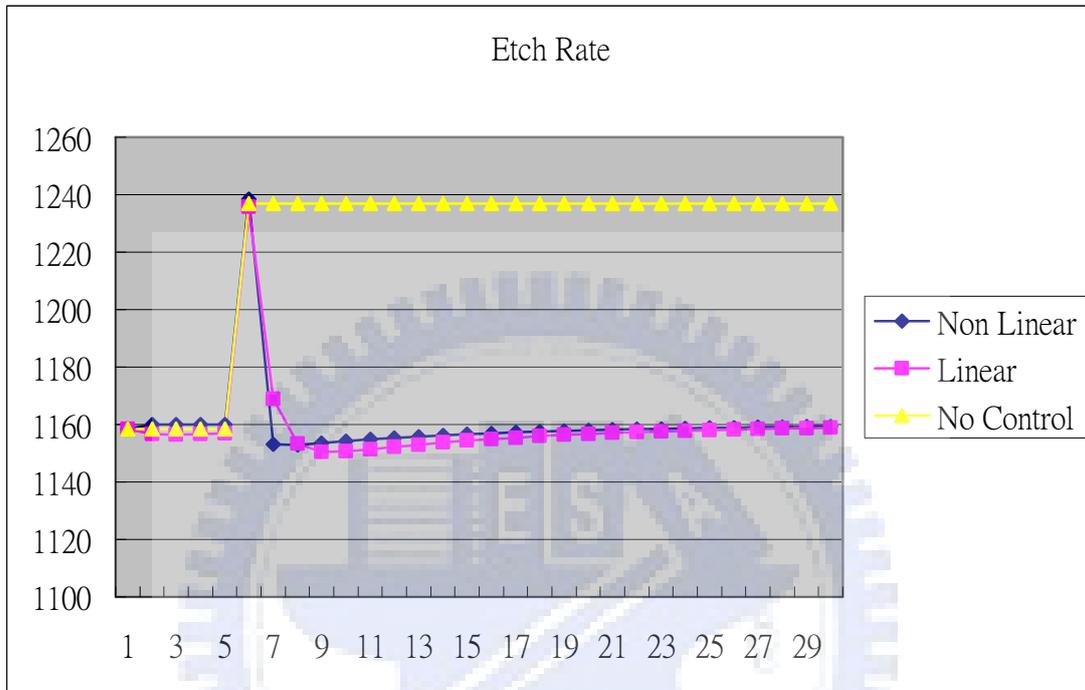


圖 5-5 Etch Rate 加入 3% shift 干擾模擬控制結果

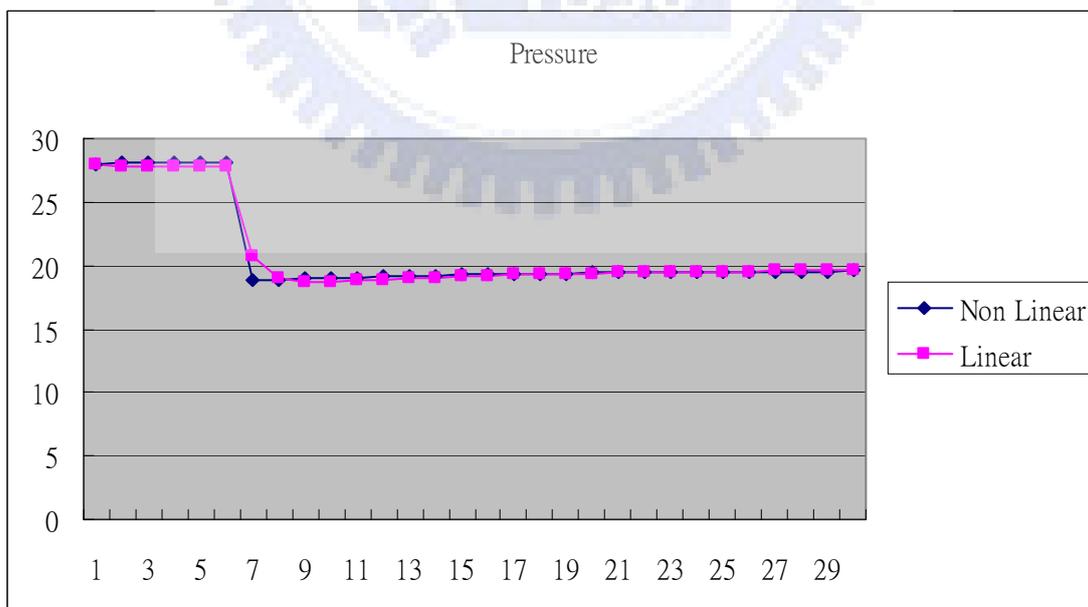


圖 5-6 壓力模擬輸入值(Shift Case)

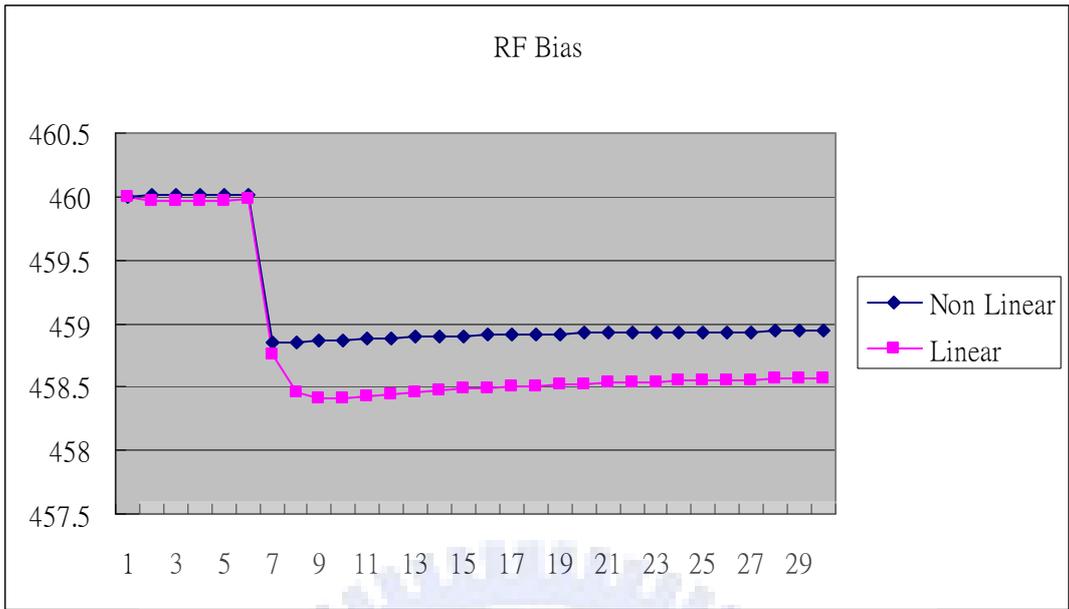


圖 5-7 RF bias 模擬輸入值(Shift Case)

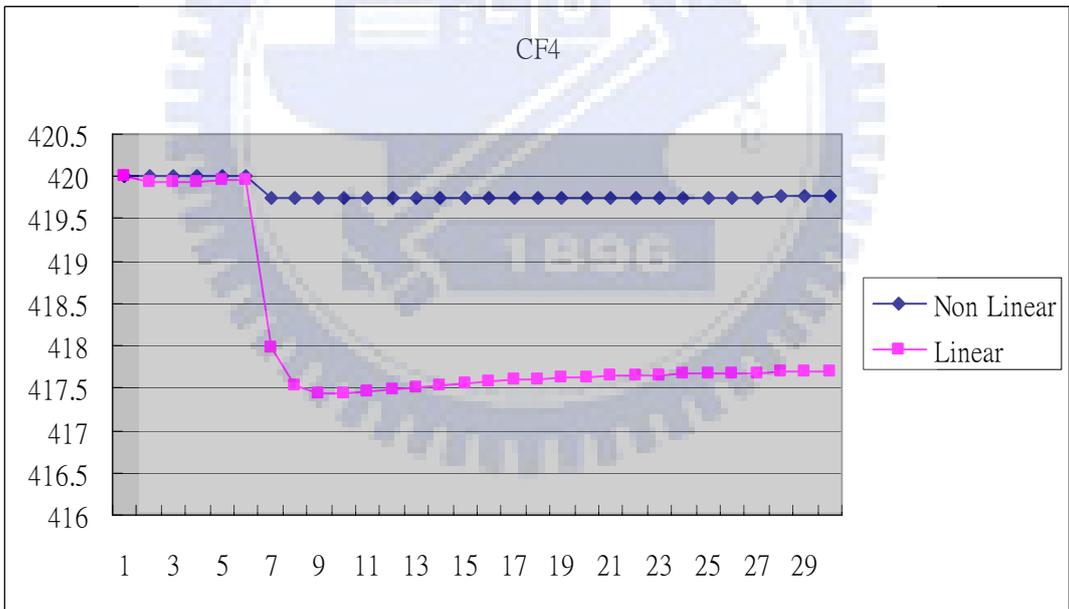


圖 5-8 CF4 模擬輸入值(Shift Case)

表 5-5 蝕刻製程模擬結果比較表 (3% Shift 干擾)

	Non-Linear D-EWMA			Linear D-EWMA		
	RMSE	STD	MEAN	RMSE	STD	MEAN
Etch Rate	14.6771	14.9268	1160.1902	14.6836	14.8978	1158.9693

圖 5-9 至圖 5-12 表示在連續漂移干擾下利用非線性 D-EWMA 控制之輸出結果與輸入值，並與製程未經控制及線性 D-EWMA 控制方法控制之比較。

圖 5-9 顯示兩種控制方法之控制器在一開始有著幾乎一樣的輸出，在干擾發生時，因為非線性 D-EWMA 沒有模型誤差(model mismatch)所以產生的控制誤差會比使用線性 D-EWMA 控制器小，收斂速度也比線性 D-EWMA 控制器快，其輸入值如圖 5-10 至圖 5-12 所示。模擬結果整理如下表 5-6 所示，此表中也說明非線性 D-EWMA 不管是在 RMSE 或 STD 都比線性 D-EWMA 好。

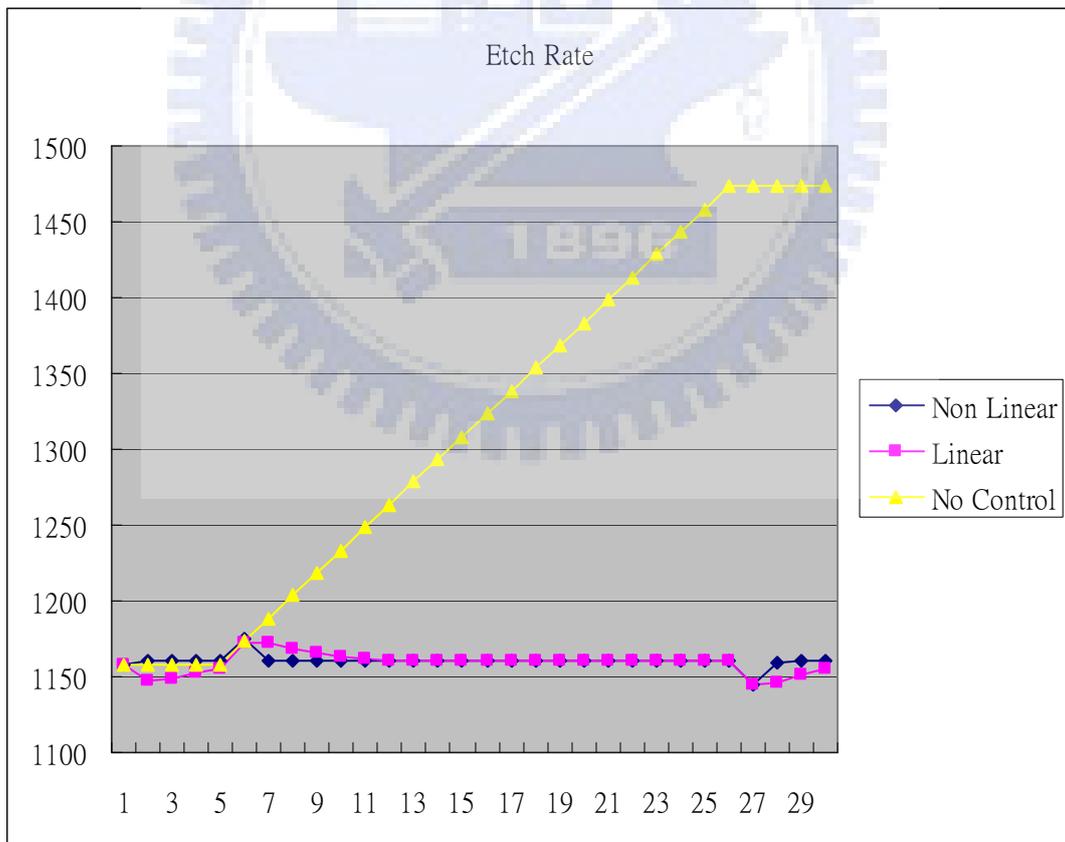


圖 5-9 Etch Rate 加入 0.5% Drift 干擾模擬控制結果

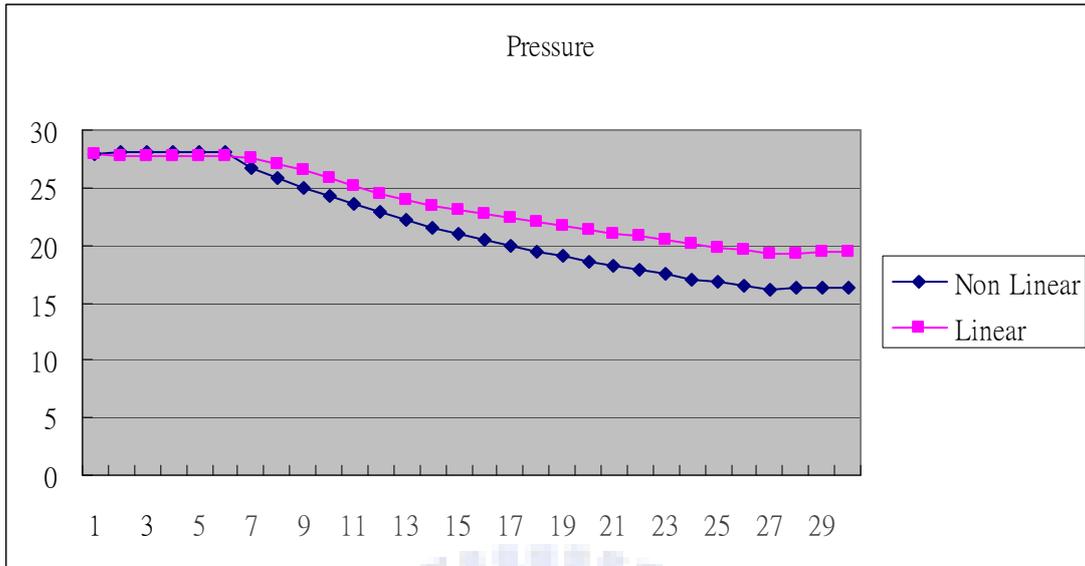


圖 5-10 壓力模擬輸入值(Drift Case)

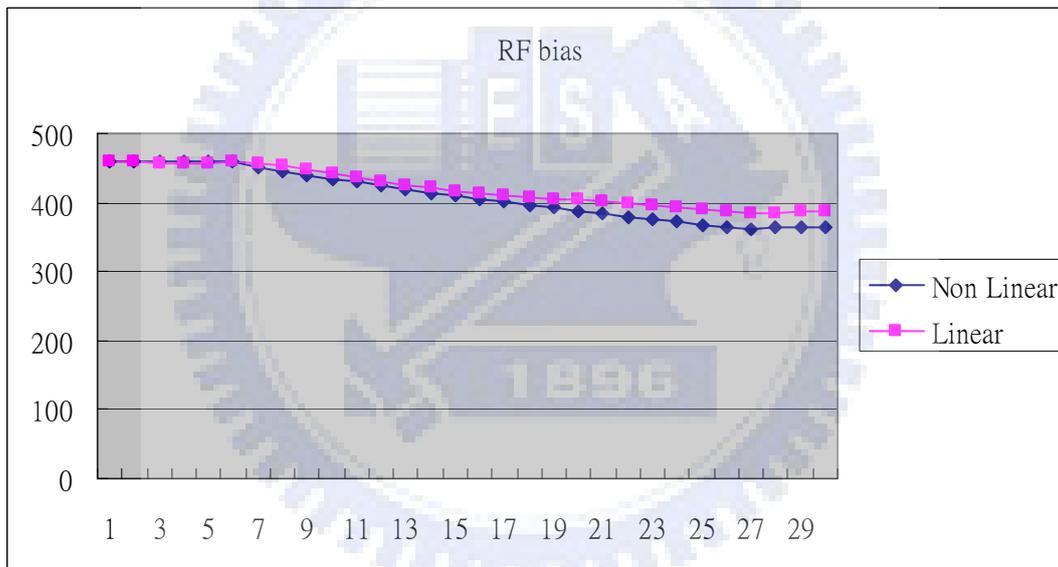


圖 5-11 RF bias 模擬輸入值(Drift Case)

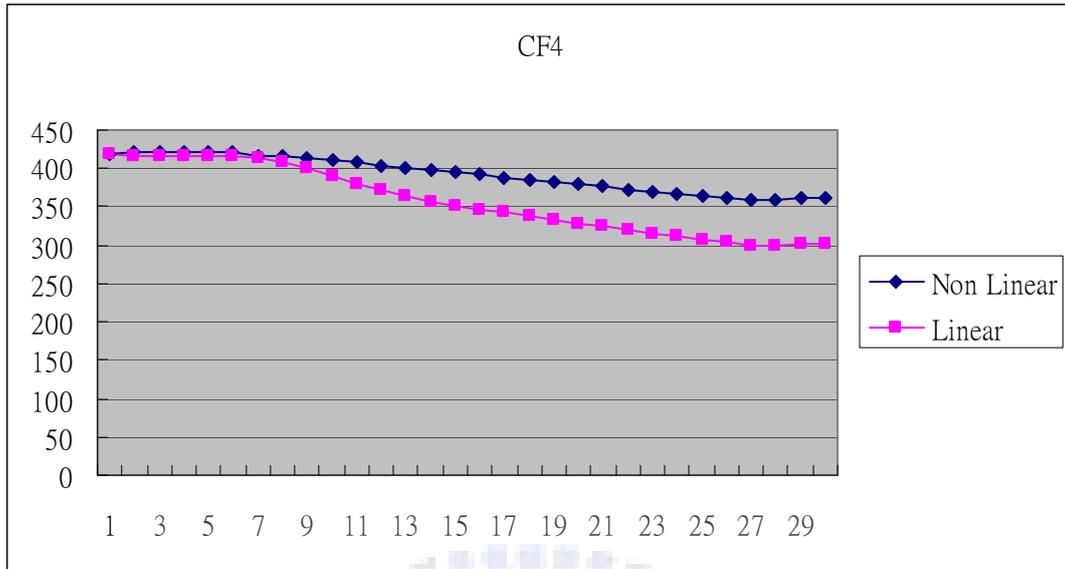


圖 5-12 CF4 模擬輸入值(Drift Case)

表 5-6 蝕刻製程模擬結果比較表 (0.5% Drift 干擾)

	Non-Linear D-EWMA			Linear D-EWMA		
	RMSE	STD	MEAN	RMSE	STD	MEAN
Etch Rate	3.8627	3.9279	1160.0761	6.5969	6.6161	1158.9022

由上述結果可以瞭解到無論是線性或非線性 D-EWMA 控制器，皆可以有效對付本蝕刻製程之位移與飄移干擾，但是我們可以發現在系統有變動時（或干擾產生時）利用非線性 D-EWMA 控制器可以較快速的將系統輸出拉回我們所期望的目標值，而線性 D-EWMA 控制器則是要經過比較多次的修正，雖然上面兩個案例兩種控制器之控制效果差異不大，但因為本模擬案例乃是採用最佳權重之案例，由上表 5-1 至 5-4 可以得知，線性 EWMA 控制器若所設定之權重非最佳權重，則輸出誤差會遠遠高過非線性 D-EWMA 控制器，而在真實製程中干擾是無時無刻產生且變化的，若利用線性 D-EWMA 控制器則可能會無法尋得最佳權重而使系統輸出永遠無法達到原本所設定的目標。

### 5.2.2. 真實製程干擾之模擬

模擬原始資料取得是從工業技術研究院顯示中心，在 MS450NEA 蝕刻機 Chamber1 之  $\text{SiO}_2$  3K 蝕刻率日測機，從 2007-1 月到 2007-8 月七個月共 200 筆之原始資料，如下圖 5-13 所示。

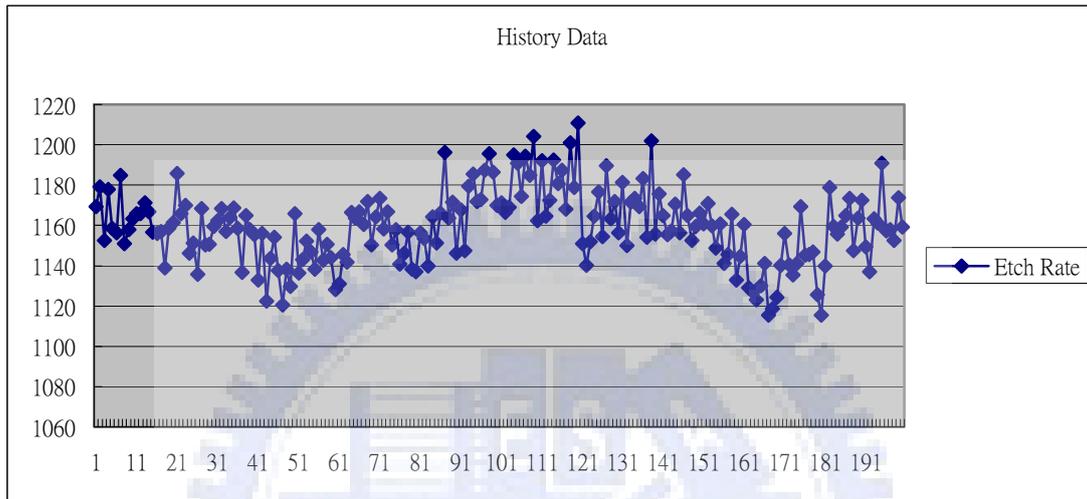


圖 5-13 廠內蝕刻率歷史資料

模擬的第二部分是利用歷史資料，先利用已建立之製程模型求得當時期之截距，並假設模擬時之截距變化與歷史製程相同，來比較控制之效果。

在 D-EWMA 權重選擇部分，為了因應真實製程中複雜的干擾本論文與上節同採用窮舉搜尋法找出最佳權重，以此權重為最佳權重。搜尋結果如下表 5-7、5-8 與圖 5-14、5-15 所示：

表 5-7 不同權重之 Non-linear D-EWMA 模擬結果(History Case)

		Non-Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1		15.5455	15.3485	15.2673	15.2206	15.1915	15.1778	15.1774	15.1885	15.2103	15.244
0.2		15.6041	15.3636	15.2713	15.2118	15.1793	15.1685	15.1733	15.1905	15.2194	15.2618
0.3		15.5338	15.3809	15.2602	15.1918	15.1643	15.1611	15.1732	15.1977	15.2348	15.2874
0.4		15.3598	15.2862	15.2482	15.2205	15.2	15.1878	15.1847	15.191	15.2068	15.2329
0.5		15.2631	15.2274	15.2273	15.22	15.2091	15.1997	15.1954	15.198	15.2086	15.2281
0.6		15.299	15.2534	15.2459	15.2383	15.2279	15.2178	15.2111	15.2099	15.2155	15.2291
0.7		15.837	15.4603	15.3465	15.2949	15.2653	15.2458	15.2332	15.2271	15.2278	15.2359
0.8		16.3616	15.71	15.4739	15.3685	15.3134	15.2812	15.2613	15.25	15.2461	15.2494
0.9		15.5813	15.5414	15.4667	15.3997	15.3513	15.3182	15.2961	15.2821	15.275	15.2746
1		15.6879	15.5311	15.4788	15.4445	15.4146	15.3885	15.367	15.3504	15.3391	15.3332

表 5-8 不同權重之 linear D-EWMA 模擬結果(History Case)

		Linear D-EWMA									
$\Omega_2 \backslash \Omega_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1		22.2082	19.4863	18.1125	17.321	16.8426	16.5475	16.3651	16.1651	16.1931	16.255
0.2		22.3156	19.3573	18.0919	17.4261	17.041	16.8052	16.6561	16.561	16.5026	16.4708
0.3		20.4622	18.7757	18.0374	17.6227	17.3547	17.1674	17.0314	16.9316	16.8596	16.8107
0.4		20.9807	19.8923	19.0752	18.5047	18.1017	17.8079	17.5878	17.4207	17.2943	17.201
0.5		25.5574	22.1711	20.5269	19.5734	18.9494	18.5075	18.1791	17.9292	17.738	17.5936
0.6		25.1676	22.6861	21.2682	20.3178	19.6283	19.1062	18.7019	18.3864	18.1408	17.9523
0.7		25.3092	23.3862	22.0175	21.0086	20.2373	19.6346	19.1595	18.7852	18.4926	18.2671
0.8		26.7455	24.4246	22.878	21.7195	20.8194	20.1137	19.5601	19.1278	18.7929	18.5369
0.9		27.7775	25.5646	23.793	22.4075	21.3379	20.5163	19.8862	19.4039	19.0365	18.7594
1		29.9616	26.9302	24.6285	22.939	21.7013	20.7877	20.1076	19.5985	19.2171	18.9333

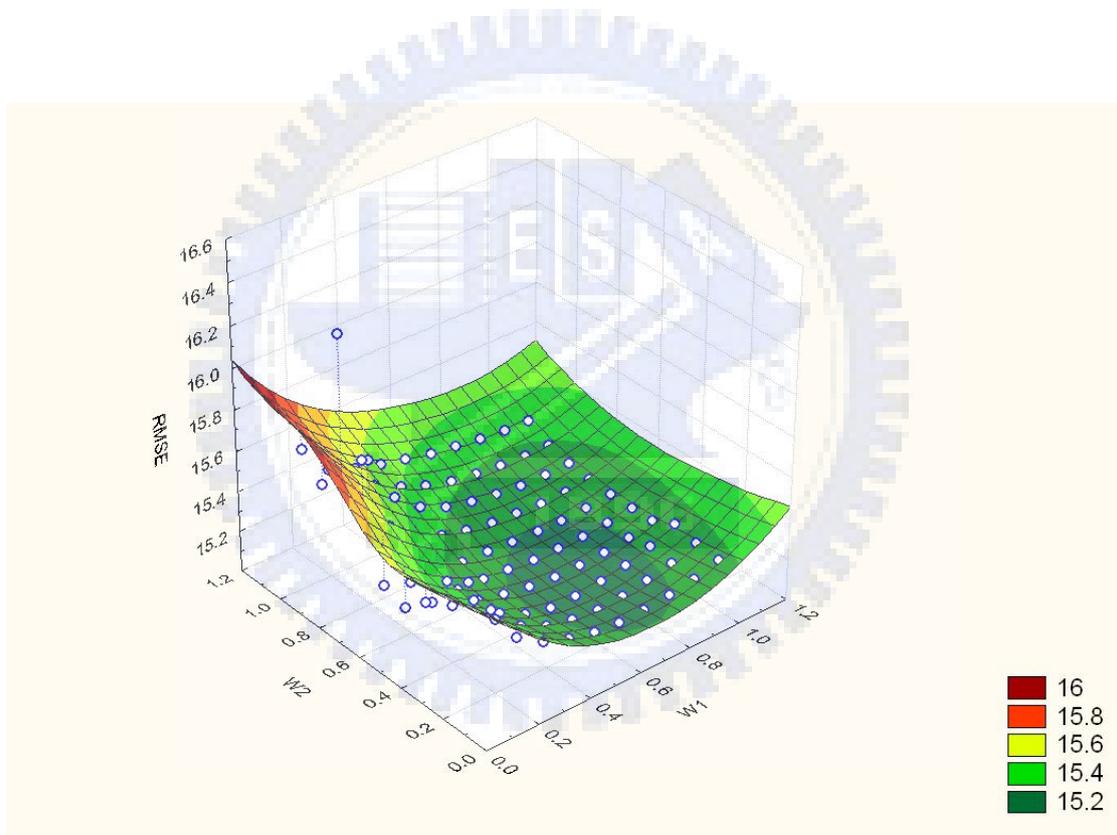


圖 5-14 不同權重之 Non-linear D-EWMA 控制結果之 RMSE(History Case)

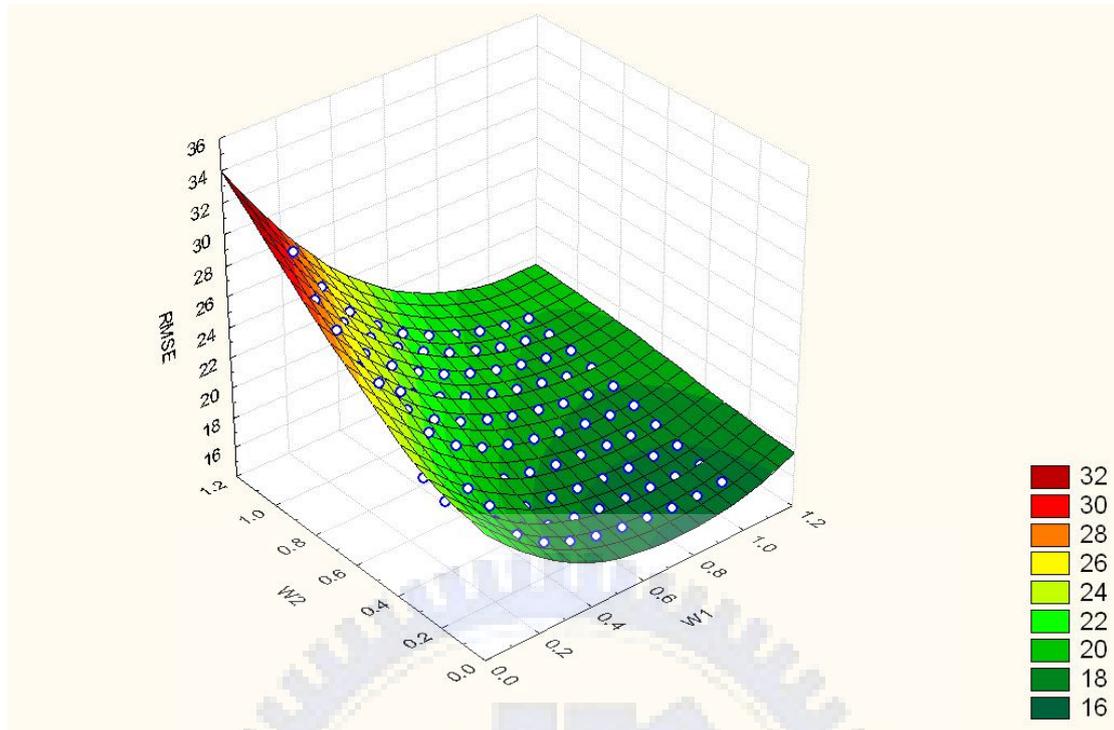


圖 5-15 不同權重之 Linear D-EWMA 控制結果之 RMSE(History Case)

對於權重的調變，利用兩種控制器所模擬出的 RMSE 值，有著類似的趨勢，最好的  $\Omega_1$  皆落在 0.6~0.8 之間，而當  $\Omega_2$  過大時則模擬結果會明顯的變差，由上述結果可知，本實驗之蝕刻製程以位移干擾為主，飄移干擾較不顯著，而利用非線性 D-EWMA 控制器在所有不同的權重下，其製程輸出 RMSE 皆會優於線性 D-EWMA 控制器。

另外我們可以發現非線性 D-EWMA 控制器在選擇權重時，即使無法選擇最佳的權重，其對模擬結果的影響也會遠小於線性 D-EWMA 控制器，由此可知在有 model mismatch 的情況底下，權重之調變或選擇範圍將嚴重的被壓縮。

由上述結果，本論文選擇  $\Omega_1=0.6$ 、 $\Omega_2=0.3$  為非線性 D-EWMA 之權重， $\Omega_1=0.8$ 、 $\Omega_2=0.1$  為線性 D-EWMA 之權重，模擬結果整理如圖 5-16 與表 5-9 所示，在所有各項指標的表現中兩種控制器皆可以改善製程干擾，並且非線性 D-EWMA 控制器優於線性 D-EWMA 控制器。

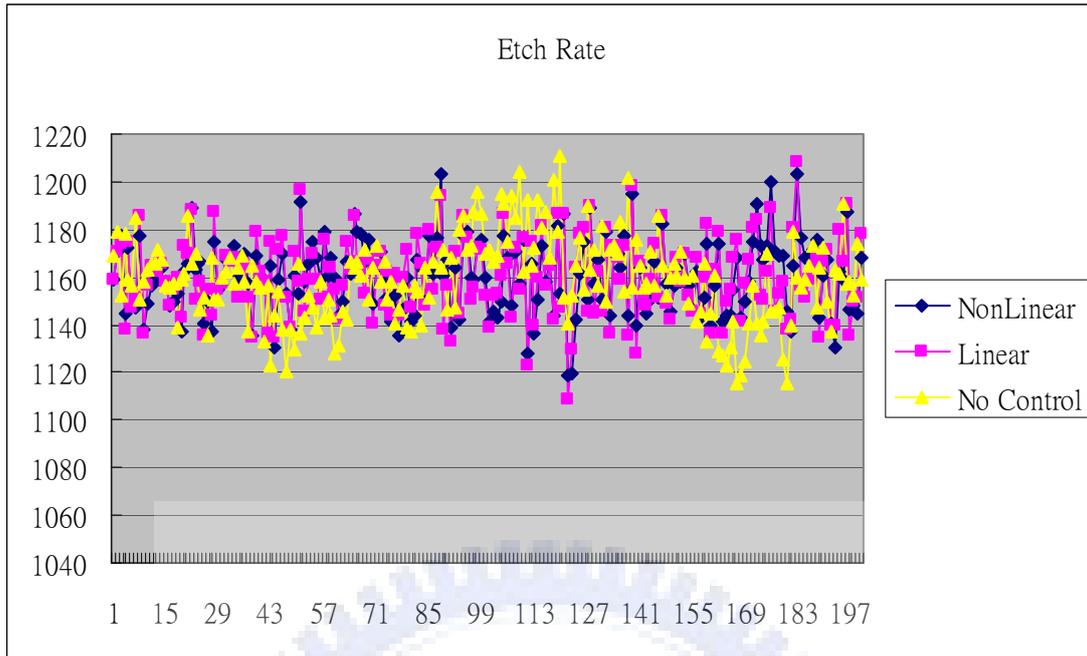


圖 5-16 Etch Rate 加入真實製程干擾模擬控制結果

表 5-9 蝕刻製程模擬結果比較表 (真實製程干擾)

	History Data			Non-Linear			Linear		
	RMSE	STD	Mean	RMSE	STD	Mean	RMSE	STD	Mean
Etch Rate	18.08	18.11	1159.16	15.16	15.20	1160.03	16.16	16.20	1160.03

### 5.3 蝕刻製程實際驗證之結果與分析

從前面幾章的推導與模擬結果，皆為了證實我們所討論的控制方法能真正運用於實際的製程，接下來我們將以一實際的蝕刻製程來做驗證並以 MSD(Mean Square Deviation)為評估指標。

本實驗以第三章中由實驗設計及複迴歸分析方法所找出之關係式當作初始模型來做為預測並估計真實的製程機台模型，控制器之權重則利用上節所搜尋之最佳權重  $\Omega_1=0.6$ 、 $\Omega_2=0.3$  為非線性 D-EWMA 控制器之實驗權重， $\Omega_1=0.8$ 、 $\Omega_2=0.1$  為線性 D-EWMA 控制器之實驗權重。我們期望的目標值為  $1160 \text{ \AA/s}$ 。在本次的驗證過程中，所使用的機台皆固定，以減少機台間差異的干擾，增加驗

證的準確性。量測設備以 KLA  $\alpha$ -STEP(FP-20AH) 大面積針觸式厚度量測儀，如圖 5-17 所示，來進行蝕刻後量測。



圖 5-17 KLA Tencor Alpha- Step 表面輪廓儀

本實驗共量測玻璃上九個測試點，如圖 5-18 蝕刻量測圖形示意圖（左側示意表量測分佈右側表蝕刻圖形），量測出九點平均蝕刻深度  $T$  再計算出蝕刻率。

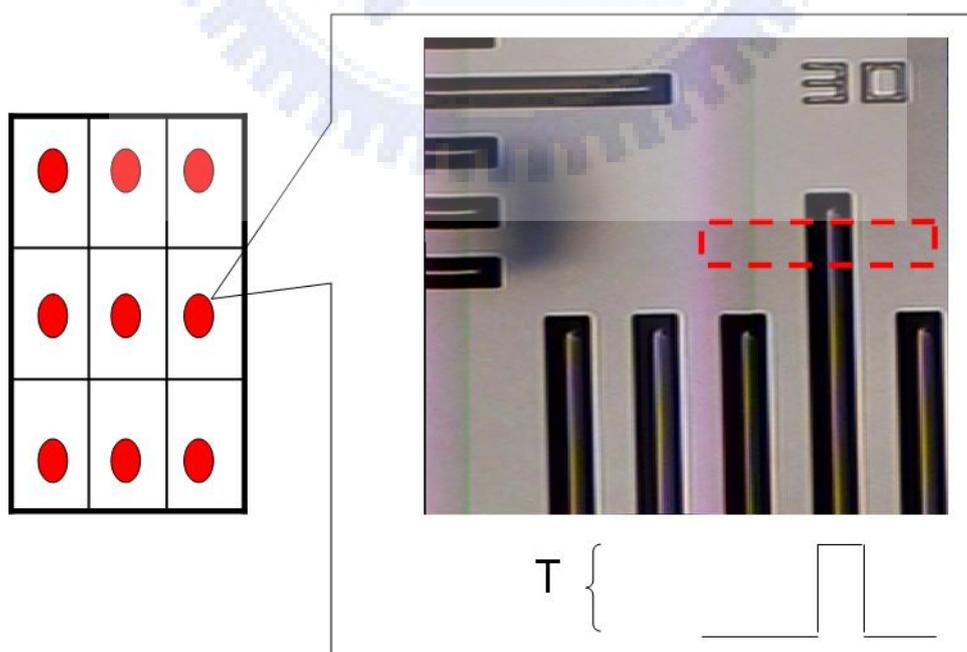


圖 5-18 蝕刻量測圖形示意圖

實際驗證之結果如圖 5-19 與表 5-10 所示，實驗結果顯示無論是線性或非線性 D-EWMA 控制器皆可以在三個批次以內使製程輸出接近接近原本所設定的目標，但是比較兩控制器，則可以發現在第八個批次以後線性 D-EWMA 控制器之輸出較不穩定，有過度控制（Over Control）的現象，所以在表 5-6 中之各項數據可看出非線性 D-EWMA 控制器之控制結果皆優於線性 D-EWMA 控制器，其原因應該是因為本研究之蝕刻製程為非線性系統，若硬強加以線性模型估測並加以控制，則雖然製程輸出可以達到控制目標，但是整體製程變異會比較大。

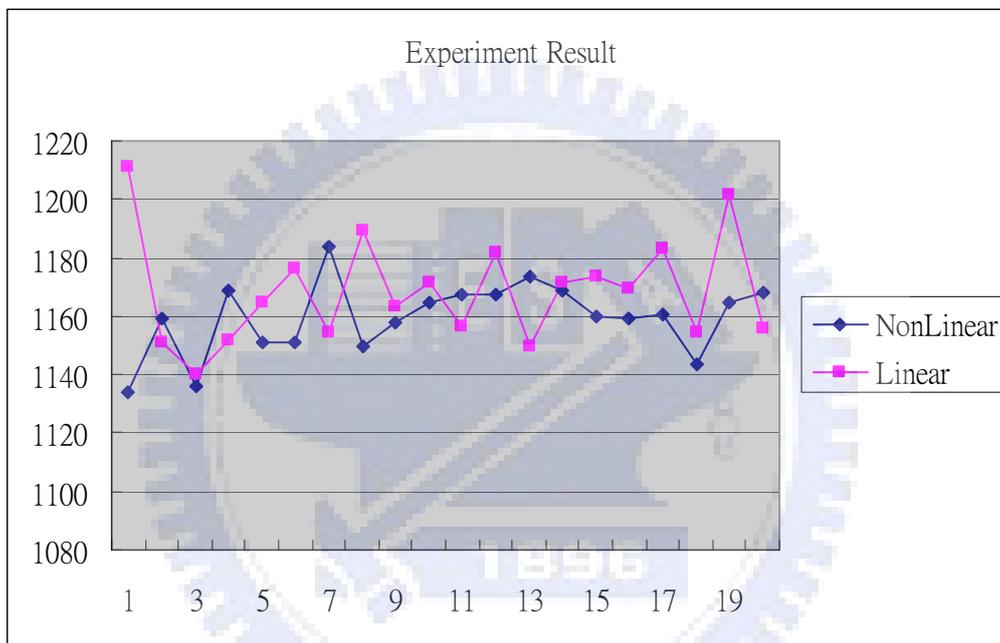


圖 5-19 實驗驗證結果

表 5-10 實驗結果比較表

	Non-Linear D-EWMA			Linear D-EWMA		
	RMSE	STD	MEAN	RMSE	STD	MEAN
Etch Rate	12.0963	12.39972	1159.495	19.73934	18.2562	1168.545

## 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蝕刻製程的實例驗證，我們可以歸納出以下幾點結論：

- (1) 在實際工廠運行下，一般在一段時間後會執行定期保養 (Preventive Maintenance ; PM)，或是更新材料、停機維修等，這時會對製程產生干擾，使製程的特性產生改變，已不再是先前的製程條件，將會使製程產生一位移。針對此一製程的干擾現象，利用本論文所研究之非線性 D-EWMA 估測器結合最小變異控制器之控制器 Run to Run 控制架構，可有效地將輸出值快速的調整到我們所期望的目標值範圍之內。
- (2) 在製程機台模型有一定的變動或干擾時，兩種控制器 (Linear 與 Non-linear D-EWMA) 皆可以改善製程干擾，在製程機台模型屬於非線性系統下，在各項指標的表現中非線性 D-EWMA 控制器優於線性 D-EWMA 控制器。
- (3) 在本論文中所討論的 Non-linear D-EWMA 控制器對於 DOE 為非線性製程模型的變動或干擾時，因非線性無 model mismatch，將使輸出變數較快速達到我們所期望的目標值範圍之內，具有一定的控制效果。
- (4) 在線性與非線性 D-EWMA 控制模型  $R^2$  差異很小時，理論上兩者選擇權重應相近，而文 5.2 節中  $\Omega_2$  分別為 0.1 與 0.4，但依圖看此區極為平坦故計算上 0.4 其實與 0.1 差異不大；而利用非線性 D-EWMA 控制器，在選擇權重時，有比線性 D-EWMA 控制器更大的選擇區間，即使選擇之權重並非最佳權重，對製程變異之影響也會比線性 D-EWMA 小。
- (5) 經由模擬結果與蝕刻製程的實例驗證，針對本論文所研究之 MISO 輸出輸入之非線性模型系統，我們可以證明非線性 D-EWMA 估測器結合最小變異控制器是有很好的控制方法。

## 6.2 未來研究之建議

經由以上的研究結果顯示，本論文所研究的非線性 D-EWMA 最小變異控制器對於製程機台模型有一定的變動或干擾時，可以得到良好的控制績效，但是能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) 對蝕刻製程而言，蝕刻率(etching rate)並不只是蝕刻製程中唯一著重的要素，諸如其他像選擇比、離子轟擊對薄膜所造成的損害…等等的蝕刻特性，都是應當加以考慮的。而這些也都可以利用電漿特性參數（電漿密度、離子能量、電漿電位）去做解釋和歸納。所以電漿密度的檢測與分析，對於高密度電漿的製程與研究是相當具有助益的。雖然本實驗可以很快讓製程工程師完成調機，最重要的是可以解決研發人員對電漿難以捉摸的迷思；但是，未來若能將此控制方法應用於其他蝕刻特性研究，則產品的良率應可更為提升。
- (2) 本論文僅針對蝕刻製程中之單一部份來做探討，我們依據實際生產的經驗，在製程上利用數個輸入變數(腔體壓力與 RFbias、CF4)來控制控制製程中一個輸出變數即蝕刻率，以此做 MISO 之研究、模擬與實例驗證的對象。實際上，在調整輸入變數的同時也潛在影響蝕刻均勻度(etch uniformity)等等，而蝕刻品質的因素眾多，後續應 MIMO 來探討彼此的影響性。再者，不只蝕刻製程影響蝕刻品質，在前端製程上如薄膜組織、光阻厚度、顯影烘烤…等等，因此若能將蝕刻製程之另外前端部份(即 Thin film process 及 Photo process)一併整合，結合 APC 的應用，則更能發揮整體的效益，達到更高良率的目標。

## 參考文獻

- [1] A. C. Lee, "Minimum-variance controller for a class of non-linear systems," *Int. J. Systems Science*, Vol. 21, No. 11, pp. 2091-2101, 1990.
- [2] C. J. Spanos, H. F. Guo, A. Miller, and J. Levine-Parrill, "Real-Time Statistical Process Control Using Tool Data," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 5, No. 4, pp. 308-318, 1992.
- [3] E. Sachs, R. S. Guo, S. Ha, and A. Hu, "Process Control System for VSLI Fabrication," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, pp. 134-144, 1991.
- [4] E. Sachs, A. Hu, and A. Ingolfsson, "Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 8, No. 1, pp. 26-43, 1995.
- [5] G. E. Box and M. Jenkins, "Time Series Analysis – Forecasting and Control", Prentice Hall, 1976.
- [6] T. H. Smith, and D. S. Boing, "A Self-Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques," *IEEE Transactions on Components, Packing, and Manufacturing Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 121-132, 1997.
- [7] R. Guo, J. Chen, A. Chen and S. Lu, "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] S. T. Tseng, R. J. Chou, S. P. Lee, "A study on a multivariate EWMA control," *IIE Transactions*, Vol. 34, No. 6, pp. 541-549, 2002.

- [9] E. D. Castillo, and R. Rajagopal, "A Multivariate Double EWMA Process Adjustment Scheme for Drifting Processes", IIE Transactions, Vol. 34, No. 12, pp. 1055-1068, 2002.
- [10] E. D. Castillo, and J. Y. Yeh, "An adaptive run-to-run optimizing controller for linear and nonlinear semiconductor processes," IEEE transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 11, No. 2, pp. 129-136, 1998.
- [11] C. Gould, "Advanced Process Control: Basic Functionality Requirements for Lithography," IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 49-53, 2001.
- [12] S.W. Butler, J.A. Stefani, "Supervisory run-to-run control of polysilicon gate etch using insitu ellipsometry" IEEE transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 7, No. 12, pp. 193-201, 1994.
- [13] 黃柏壽,「結合遞迴最小平方動態模型調變及最小變異控制器進行 PECVD 機台先進製程控制」, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2005。
- [14] 洪志明,「應用動態模型最小變異控制器於先進微影製程控制」, 國立交通大學工學院精密與自動化工程碩士論文, 2006。
- [15] 柯璟銘,「化學機械研磨之虛擬量測與製程控制」, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2006。
- [16] 倪席琳,「應用類神經網路於蝕刻製程之缺陷分析與預測」, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2006。
- [17] J. H. Chen, T. W. Kuo, and A. C. Lee, "Run by Run Process Control of Metal Sputter Deposition: Combining Time Series and Extended Kaman Filter," IEEE Semiconductor Manufacturing, Vol. 20, No. 3, pp. 278-285, 2007.