

# 化學機械研磨製程(CMP)之即時片間控制

王國彬\* 陳君彥 潘瑞相  
長庚大學化工與材料工程學系

林宜弘  
台灣積體電路製造股份有限公司

## 摘要

本研究針對化學機械平坦(CMP)製程，嘗試探討系統中具量測機台時延之批次間控制之實務應用問題。首先研討機台特性及其實際操作狀況，並利用實廠所得之大量 CMP 製程數據加以驗證。再考量量測機台時延之效應，適時地修正製程模式及估測器的參數，以增進雙重 EWMA 控制器之性能。最後，以所蒐集之 CMP 現場數據進行模擬測試，顯示所提之批次間控制方法可將綜合製程能力指標 Cpk 提升數倍之多。

## 一、緒論

化學機械研磨是半導體廠生產流程中相當重要的一道製程，一般而言其機制較為簡單，但由於製程中使用諸多耗材性元件，所以製程中可能造成相當大的變異。目前國內部分晶圓廠的 CMP 製程部門，其關鍵的操作變數是由現場操作人員手動調整控制，探究其主要原因就在於製程的漂移(Drift)及擾動(Disturbances)無法即時加以識別；因此，若將批次間控制應用於 CMP 製程，將可以有效的克服這兩個問題。再以製程操作實務的觀點來看，若將批次間控制應用於 CMP 製程，須考量線上機台之長時期運轉所引發之製程變異及漂移問題，且在實際運用上也須考量其他製程因素之效應，如量測上延遲、停機時間(Idle time)和疏理頭生命週期等問題。

目前 CMP 相關文獻中所提的操控方法，多為離線應用或是實驗機台的測試，事實上，將其引用於實際線上製程仍有部分問題。本研究將針對 CMP 製程操控實務應用上的問題進行探討，首先深入瞭解目前 CMP 之製程操控概況，嘗試解決量測延遲問題，以提昇批次間控制技術之即時應用性能。

## 二、EWMA 控制器介紹

### 2.1 Single EWMA (SEWMA)控制器

已知一般 CMP 製程之變數間可用一簡單的線性關係式加以描述，所以真實製程可假設如下式：

$$Y_t = \alpha + \beta X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

其中參數  $\alpha$  為製程的偏差或截距，而參數  $\beta$  則代表製程的增益或斜率，而  $Y$  為製程輸出變數值與其目標值  $T$  的差值， $X$  則為輸入變數值， $t$  為取樣次序，而隨機變數  $\varepsilon_t$  代表白色雜訊。為解析 CMP 製程之特性，進而設計回饋控制器加以穩定操作，在收集足夠之製程數據後，可以利用回歸分析方法求得製程預測模式為：

$$\hat{Y}_t = a + bX_{t-1} \quad (2)$$

其中參數  $a$  和  $b$  分別為真實製程中  $\alpha$  和  $\beta$  的估算值。而在  $t = 0$  時，製程實際輸出值和目標值  $T$  間有下列之偏差：

$$\Gamma_0 = \alpha + \left(\frac{\beta}{b}\right)(-a) \quad (3)$$

一般稱  $\Gamma_0$  為初始偏差(Initial bias)。所以 Single EWMA 控制器就是利用不斷地調整預測模式之參數  $a$  的觀念，即時更改製程輸入值，若能將截距項調整至  $a^* = b(\alpha)/\beta$ ，則製程輸出會達到所期望的目標值  $T$ 。

如考量變動緩慢之擾動變數對製程的影響，一般可利用下列方式來修正製程模式：

$$a_t = \lambda(Y_t - bX_{t-1}) + (1-\lambda)a_{t-1} \quad (0 < \lambda \leq 1) \quad (4)$$

$$X_t = -\frac{a_t}{b} \quad (5)$$

其中  $a_0 = a$ ，且  $\lambda$  稱為折扣因子(Discount factor)。

### 2.2 Double EWMA (DEWMA)控制器

當有顯著的漂移(Drift)項  $\delta$  存在時，則真實製程應表為

$$Y_t = \alpha + \beta X_{t-1} + \delta + \varepsilon_t \quad (6)$$

此時針對 Single EWMA 控制器調整模式的缺陷，發展出 Double EWMA 控制器，主要是加入漂移項之估算法值  $D_t$  來調整模式，其配方(Recipe)如下：

$$X_t = \frac{-a_t - D_t}{b} \quad (7)$$

其中

$$a_t = \lambda_1(Y_t - bX_{t-1}) + (1 - \lambda_1)a_{t-1} \quad 0 < \lambda_1 \leq 1 \quad (8)$$

$$D_t = \lambda_2(Y_t - bX_{t-1} - a_{t-1}) + (1 - \lambda_2)D_{t-1} \quad 0 < \lambda_2 \leq 1 \quad (9)$$

為了探討折扣因子  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的調諧成效，Del Castillo(2002)和蘇安治(2003)皆利用平均均方差(Average mean square deviation,  $\overline{MSD}$ )及漸近變異數(Asymptotic variance, AVAR)兩者間之權重大小，分別提出折扣因子之設計方法，但皆為離線的做法。

### 三、具 Metrology Delay 情況之批次間控制

#### 3.1 基本概念

實際工廠生產線上的過度研磨時間(Over polish time, OPT)是藉由操作員隨時調整輸入，操作員會依其經驗與研磨厚度量測結果決定是否調諧過度研磨時間，若是中途有晶圓磨厚規格逐漸不合，現場操作員則可以即時調整輸入值；但要注意的是上一片經由研磨墊後，下一片則放上研磨墊準備研磨，但此時的上一片還在清洗等待量測。因此，在連續性的進片中，並無法將調整過後的研磨時間應用到此片之下一片，而是會應用到下三片或下四片，此稱為量測上的延遲(Metrology delay)。一般文獻中較少討論到此一現象，本研究即針對量測延遲作一探討。

#### 3.2 無 Metrology Delay 之系統穩定性探討

如考慮存在大的系統飄移  $\delta$ ，Good 和 Qin (2002)曾以下式修正製程模式：

$$a_t = a_{t-1} + D_{t-1} + (1 - \omega^2)[Y_t - Y_{t|t-1}] \quad (10)$$

$$D_t = D_{t-1} + (1 - \omega)^2[Y_t - Y_{t|t-1}] \quad (11)$$

其中  $Y_{t|t-1}$  指利用前一片(t-1)時的數據資料求得現在片數 t 時的受控變數預測值，如下：

$$Y_{t|t-1} = a_{t-1} + D_{t-1} + bX_{t-1} \quad (12)$$

因此，Good 和 Qin (2002)所提出之 DEWMA 控制器方程式應為：

$$X_t = \frac{T - a_t - D_t}{b} \quad (13)$$

當以微擾變數來表示時，目標值 T 應為 0。將式(12)

轉成  $Y_{t+1|t}$  後，再代入式(10)及(11)中，即有

$$a_{t+1} = \omega^2(a_t + D_t) + (1 - \omega^2)(Y_{t+1} - bX_t) \quad (14)$$

$$D_{t+1} = (1 - \omega)^2(Y_{t+1} - bX_t - a_t) + (2\omega - \omega^2)D_t \quad (15)$$

先令  $x_t = [a_t \ D_t \ \alpha]^T$ ，再結合式(6)及式(10)至式(13)，可以得到閉環控制系統之表示式，如下：

$$x_{t+1} = Ax_t + w_t \quad (16)$$

$$y_t = Cx_t + R_t$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 - (1 - \omega^2)\xi & 1 - (1 - \omega^2)\xi & 1 - \omega^2 \\ -(1 - \omega)^2\xi & 1 - (1 - \omega)^2\xi & (1 - \omega)^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$w_t = \begin{bmatrix} (1 - \omega^2)[T(\xi - 1) + \delta + \varepsilon_t] \\ (1 - \omega)^2[T(\xi - 1) + \delta + \varepsilon_t] \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = [-\xi \quad -\xi \quad 1], \quad R_t = \xi T + \varepsilon_t, \quad \xi = \frac{\beta}{b}.$$

假設 n 趨近無限大時， $A^n$  是有界線的，從式(16)可得知系統是穩定的，此時 A 矩陣之特徵值必落在單位圓內。其後，將 A 矩陣拆解成下列表示式

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - (1 - \omega^2)\xi & 1 - (1 - \omega^2)\xi & \vdots & 1 - \omega^2 \\ -(1 - \omega)^2\xi & 1 - (1 - \omega)^2\xi & \vdots & (1 - \omega)^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}$$

由上式可將 A 矩陣之特徵值簡化成  $A_{11}$  矩陣和  $A_{22}$  矩陣的特徵值，又因為  $A_{22}$  矩陣之特徵值只是在邊緣上之穩定，所以系統之穩定性完全取決於  $A_{11}$  矩陣之特徵值。特性方程式如下：

$$z^2 + (-2\xi\omega + 2\xi - 2)z + (\omega^2\xi - \xi + 1) = 0 \quad (17)$$

利用轉換式  $z = (1+w)/(1-w)$ ，將穩定範圍從  $z$ -domain 下單位圓周內轉換成在  $w$ -domain 左半平面上，結果如下：

$$\begin{aligned} &(\omega^2\xi + 2\omega\xi - 3\xi + 4)w^2 + \\ &(-2\omega^2\xi + 2\xi)w + (\omega^2\xi - 2\omega\xi + \xi) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

依照 Routh Hurwitz 穩定法則，當式(18)所有根要落在左半平面，必符合下列各式：

$$\begin{aligned} &\omega^2\xi + 2\omega\xi - 3\xi + 4 > 0 \\ &-2\omega^2\xi + 2\xi > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{vmatrix} -2\omega^2\xi + 2\xi & 0 \\ \omega^2\xi + 2\omega\xi - 3\xi + 4 & \omega^2\xi - 2\omega\xi + \xi \end{vmatrix} > 0$$

由上式可求得 SISO 系統下控制器之穩定範圍：

$$0 < \xi < \frac{-4}{\omega^2 + 2\omega - 3} \quad (19)$$

### 3.3 有 Metrology Delay 之系統穩定性探討

再進一步考量半導體製程中重要的時延因素，及量測機台延遲(Metrology delay)存在的情況。此時，則必須對控制器作  $d$  片延遲修正，如下式：

$$a_{t-d} = a_{t-d-1} + D_{t-d-1} + (1-\omega^2)[Y_{t-d} - Y_{t-d}|_{t-d-1}] \quad (20)$$

$$D_{t-d} = D_{t-d-1} + (1-\omega)^2[Y_{t-d} - Y_{t-d}|_{t-d-1}] \quad (21)$$

$$X_t = \frac{T - a_{t-d} - D_{t-d}(d+1)}{b} \quad (22)$$

其中

$$Y_{t-d|t-d-1} = a_{t-d-1} + D_{t-d-1} + bX_{t-d-1}$$

$$X_{t-d-1} = \frac{T - a_{t-2d-1} - D_{t-2d-1}(d+1)}{b}$$

令  $x_k = [a_k \ a_{k+1} \ \dots \ a_{k+d+1} \ D_k \ D_{k+1} \ \dots \ D_{k+d+1}]^T$ ，其

中  $k = t - 2d$ 。再結合上式，可以得到閉環狀態方程式，決定系統穩定性的  $A_{11}$  由下式表示之：

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & \dots & \omega^2 & (d+1)(1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & \dots & \omega^2 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & 0 & -(1-\omega)^2 & (d+1)(1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & \dots & 2\omega-\omega^2 \end{bmatrix}$$

當系統中有一片延遲(即  $d=1$ )時， $A_{11}$  成為

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & \omega^2 & 2(1-\omega^2)(1-\xi) & \omega^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & -(1-\omega)^2 & 2(1-\omega^2)(1-\xi) & 2\omega-\omega^2 \end{bmatrix}$$

$A_{11}$  矩陣之特徵方程式可表示如下：

$$\begin{aligned} &z^4 - 2\omega z^3 + (\omega^2\xi - 4\omega\xi + 4\omega + 3\xi - 3)z^2 \\ &\quad + (2\omega\xi - 2\omega - 2\xi + 2)z = 0 \end{aligned}$$

將穩定範圍從  $z$ -domain 下單位圓周內轉換成在  $w$ -domain 左半平面上，轉換式如下：

$$a_4 w^4 + a_3 w^3 + a_2 w^2 + a_1 w + a_0 = 0$$

其中

$$a_4 = \omega^2\xi - 6\omega\xi + 8\omega + 5\xi - 4$$

$$a_3 = 4\omega\xi - 4\xi + 8$$

$$a_2 = -2\omega^2\xi + 8\omega\xi - 8\omega - 6\xi + 12$$

$$a_1 = -4\omega\xi + 4\xi$$

$$a_0 = \omega^2\xi - 2\omega\xi + \xi$$

依照 Routh Hurwitz 法則，有一片延遲的系統穩定範圍可得知如下：

$$\frac{-8\omega + 4}{\omega^2 - 6\omega + 5} < \xi < \frac{3\omega - 5}{4\omega - 4} \quad (23)$$

在系統中有二片延遲時，即  $d=2$  時， $A_{11}$  可描述如下：

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & \omega^2 & 2(1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & \omega^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ (1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & -(1-\omega^2) & 2(1-\omega^2)(1-\xi) & 0 & 2\omega-\omega^2 \end{bmatrix}$$

$A_{11}$  矩陣之特徵方程式可表示如下:

$$z^6 - 2\omega z^5 + \omega^2 z^4 + (2\omega^2 \xi - 2\omega^2 - 6\omega \xi + 6\omega + 4\xi - 4)z^3 + (-\omega^2 \xi + \omega^2 + 4\omega \xi - 4\omega - 3\xi + 3)z^2 = 0$$

因為二片延遲之特徵方程式階次過高，故使用羅斯-赫維茲法則計算太過於複雜，所以本研究採用離散系統之叢利測試。依照叢利測試，有兩片延遲的系統穩定範圍可得知如下:

$$\left. \begin{array}{l} \xi > 0 \\ \xi < \frac{4\omega^2 - 8\omega + 8}{3\omega^2 - 10\omega + 7} \\ \xi > \frac{\omega^2 - 4\omega + 2}{\omega^2 - 4\omega + 3} \\ \xi < \frac{\omega^2 - 4\omega + 4}{\omega^2 - 4\omega + 3} \\ |1 - B^2| > |A + 2\omega B| \\ |(1 - B^2)^2 - (A + 2\omega B)^2| > |(1 - B^2)(\omega^2 - \omega^2 B) - (A + 2\omega B)(-2\omega - AB)| \end{array} \right\} \quad (24)$$

其中  $A = (2\omega^2 \xi - 2\omega^2 - 6\omega \xi + 6\omega + 4\xi - 4)$  且  $B = (-\omega^2 \xi + \omega^2 + 4\omega \xi - 4\omega - 3\xi + 3)$

#### 四、結果與討論

##### 4.1 CMP 製程與取樣數據說明

本研究共針對平均研磨厚度品質控制進而收集了某廠 CMP 製程將近 59 批(1475 片)連續生產的資料，所收集有用的因子包括：1、研磨墊生命週期—Pad，2、研磨前氧化矽平均厚度—PreO，3、研磨前氮化矽平均厚度—PreN，4、過度研磨時間—OPT，5、氮化矽研磨厚度—N\_Loss。

本研究先針對 SISO 系統作探討，首先製程的輸出品質數  $Y$  為氮化矽研磨厚度(N\_Loss)，過度研磨時間(OPT)視為製程的輸入變數  $X$ ，其他變數先考慮為製程的擾動，將數據資料整理為：

$$\begin{bmatrix} N\_Loss 1 \\ N\_Loss 2 \\ \dots \\ N\_Loss N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_2 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OPT 1 \\ OPT 2 \\ \dots \\ OPT N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (25)$$

其  $N$  為資料觀測點數。根據製程經驗，本研究中算出在研磨時間下所真正研磨的厚度，利用圖 1 可以導出下式:

$$\text{研磨厚度 (Z THK)} = X \text{ THK} - Y \text{ THK} - \text{Trench Depth} + 3 \times N\_Loss \quad (26)$$

其中因氮化矽和氧化矽的研磨速率比 1:3，所以最後要加上 3 倍的  $N\_Loss$ 。

##### 4.2 Double EWMA 控制器設計及應用結果

由實廠製程數據進行初步分析，由圖 2 之結果，可以發現第一到三批、第四到六批、第七批、第八批、第九到十批之製程並非連續，而是其機台曾停機三到六小時。因此，在應用批次間控制時，應考慮 CMP 機台 Idle time(機台停機之時間)之問題，由此改善非連續製程之批次間控制之成效。如暫不考慮 Idle time 和 Metrology delay 之問題，首先針對 SISO 系統，將利用 1475 片數數據回歸所得之線性方程式作為真實工廠製程，而以 100 片數數據所得關係式當作預測模式，利用平均均方差( $\overline{MSD}$ )及漸近變異數(AVAR)之權重，可得到控制器最佳的兩個折扣因子分別為  $\lambda_1 = 0.27$  及  $\lambda_2 = 0.05$ ；由上，應用 DEWMA 控制器調諧過度研磨時間，應可得到較好的氮化矽研磨厚度。而從圖 3 的比較結果來看，當研磨厚度小於目標值時，利用 DEWMA 預測的過度研磨時間(OPT)確實有上升的趨勢；相反地，當研磨厚度大於目標值時，利用 DEWMA 預測的 OPT 也確實有下降的趨勢。

再者，利用 DEWMA 所估算的 OPT 代入先前計算而得的真實製程中，將所得到的氮化矽研磨厚度與實廠製程數據中的氮化矽研磨厚度做比較，如圖 4；結果發現 DEWMA 可以抵消手動控制的變化程度，但是氮化矽研磨厚度離目標值可能有一段距離，所以在此使用 SPC 中的綜合製程能力(Cpk)來判斷此一結果。

SPC 中的綜合製程能力( $C_{pk}$ )包含精密度( $C_p$ )與準確度( $C_a$ )，精密度( $C_p$ )代表集中程度，較高精密度也就是集中度較好，準確度代表離目標值的準確

性，較低的準確度也就是離目標值越近，所以綜合製程能力是總括這兩種特性作分析。由表 1 之比較實廠製程數據和用 DEWMA 控制器預測所得到的氮化矽研磨厚度中，發現在精密度值中使用 DEWMA 控制器的結果確可提供較好的集中度，但在準確度值中使用 DEWMA 控制器結果卻不如預期；但綜合這兩種特性，所得到的綜合製程能力(Cpk)卻比真實工廠數據較好相近兩倍。所以整體而言，使用 DEWMA 控制器的確有較好的製程能力。

### 4.3 有 Metrology Delay 下控制器設計及應用結果

由文獻(Good 和 Qin, 2002)得知權重因子穩定範圍會因延遲片數差異而有所不同，所以本研究以實廠製程數據作初步驗證，針對一片延遲和二片延遲，並且在 SISO 系統(輸入變數為過度研磨時間(OPT)，輸出變數為氮化矽研磨厚度)下作討論。

#### 4.3.1 One Delay (d=1)之參數穩定範圍

利用式(23)之結果可描繪出權重因子之穩定範圍，如圖 5 所示，白色區域代表穩定區域。同樣使用實廠製程數據作驗證，以實驗片數 1475 片計算所得關係式來代表真實製程，而預測模式則以實廠資料 75 片、150 片及 300 片分別來估算之。

由表 2 可發現以 75 片、150 片和 300 片為預測模式的實驗數據時，權重因子在 0 與 1 之間均有一個臨界點，分別為 75 片( $\omega=0.3882$ )、150 片( $\omega=0.4326$ )、300 片( $\omega=0.7916$ )。本研究藉由實廠數據作驗證，以 75 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.3882 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.38 和 0.39 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定；以 150 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.4326 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.43 和 0.44 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定；以 300 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.7916 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.79 和 0.80 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定，結果如圖 6 所

示。

#### 4.3.2 Two Delay (d=2)之參數穩定範圍

利用式(24)之結果所畫之二片量測延遲之參數穩定範圍，如圖 7 所示。本研究以實廠製程 75 片、150 片、300 片和 400 片數據作為預測模式，由表 3 可發現以 75 片、150 片、300 片和 400 片為預測模式的實驗數據時，權重因子在 0 與 1 之間均有一個臨界點，分別為 75 片( $\omega=0.485$ )、150 片( $\omega=0.526$ )、300 片( $\omega=0.862$ )和 400 片( $\omega=0.29$ )；以 75 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.485 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.48 和 0.49 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定；以 150 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.526 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.52 和 0.53 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定；以 300 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.862 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.86 和 0.87 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定；以 400 片為預測模式的實驗數據時， $\omega$  等於 0.29 有一個臨界點，所以  $\omega$  分別取 0.28 和 0.30 兩點來作驗證，可以發現系統在  $\omega$  小於臨界點時為不穩定，而  $\omega$  大於臨界點時為穩定，結果如圖 8 所示。

#### 4.3.3 針對延遲片數差異之綜合製程能力比較

當  $\omega=0.8$  時，針對延遲片數不同(no metrology delay、a delay of one 及 a delay of two)所得之預測的模擬結果，對不同的預測模式(以 75、150 及 300 片數為預測模式)作綜合製程能力的比較，結果如表 4、表 5 和表 6 所示。本研究發現，應用 DEWMA 控制器更新過度研磨時間(OPT)，不管有無量測延遲，其研磨厚度之模擬預測結果的綜合製程能力均比實際現場手動操控 OPT 的結果來得好；並且發現以 75 和 150 片數為預測模式的綜合製程能力表中，延遲片數的多寡對製程能力並無明顯相異；但在以 300 片數為預測模式時，發現延遲一片與沒有延遲之間有明顯之差異，所以本研究發現預測模式之選擇可

能會影響延遲片數對綜合製程能力之間的關係。

## 五、結論

本研究以實務的觀點出發，利用實廠 CMP 製程之大量數據，檢討實際製程之操作狀態，藉由實廠數據加以分析驗證，如此，即可有效應用 EWMA 控制器來調諧過度研磨時間以得到理想之氮化矽研磨厚度。因此，本研究不考慮 idle time 的情況下，發現由 DEWMA 控制器預測的綜合製程能力值 ( $C_{PK}=0.848$ ) 比工廠手動控制下的綜合製程能力值 ( $C_{PK}=0.247$ ) 有較好的效果。

若要線上應用批次間控制則仍有許多技術環節需要克服，例如量測延遲 (Metrology delay) 則是較重要所需克服的。所以本研究也針對量測延遲的穩定範圍作一個探討，從實驗結果發現，穩定範圍會隨著量測延遲的片數增加而減少，且  $\zeta$  和權重因子  $\omega$  的大小也會影響穩定範圍。所以可以知道在假設真實製程的增益值，會對穩定範圍產生確切的影響。

## 參考文獻

Del Castillo, E., "Statistical Process Adjustment for Quality Control," John Wiley & Sons, Inc., New York (2002).

Good, R., and S. J. Qin, "Stability Analysis of Double EWMA Run-to-Run Control with Metrology Delay," Proceedings of American Control Conference, Anchorage, AK, 2156-2161 (2002).

Moyne, J., E. Del Castillo, and A. M. Hurwitz, "Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing," CRC Press LLC, Florida (2000).

Shiu, S. J., C. C. Yu, and S. H. Shen, "Batch Sequencing for Run-to-Run Control: Application to

Chemical Mechanical Polishing," Proceedings of 2003 Symposium on Process Systems Engineering, Taipei, Taiwan, 25-36 (2003).

莊達人編著，VLSI 製造技術，高立出版社，台北，台灣 (2002)。

蘇安治，離線應用批次間控制於化學機械研磨，長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文，桃園，台灣 (2003)。

表 1 綜合製程能力表

|     | FAB raw Data | Double EWMA Control Result |
|-----|--------------|----------------------------|
| Cp  | 0.396        | 1.345                      |
| Ca  | 0.375        | 0.391                      |
| Cpk | 0.247        | 0.818                      |

表 2 一片量測延遲情況之估算結果

| 片數             | 75      | 150    | 300      | 1475    |
|----------------|---------|--------|----------|---------|
| B              |         |        |          | 0.12042 |
| B              | 0.37975 | 0.5786 | 0.038243 |         |
| $\xi$          | 0.3171  | 0.2081 | 3.1488   |         |
| $\omega$ (臨界點) | 0.3882  | 0.4326 | 0.7916   |         |

表 3 二片量測延遲情況之估算結果

| 片數             | 75      | 150    | 300      | 400    | 1475    |
|----------------|---------|--------|----------|--------|---------|
| $\beta$        |         |        |          |        | 0.12042 |
| b              | 0.37975 | 0.5786 | 0.038243 | 0.0889 |         |
| $\xi$          | 0.3171  | 0.2081 | 3.1488   | 1.353  |         |
| $\omega$ (臨界點) | 0.485   | 0.526  | 0.862    | 0.29   |         |

表 4 綜合製程能力表 ( $\omega=0.8$ , 以 75 片數為預測模式)

|     |              |                    |                |                |
|-----|--------------|--------------------|----------------|----------------|
|     | Fab raw data | No metrology delay | A delay of one | A delay of two |
| Cp  | 0.486        | 0.842              | 0.846          | 0.845          |
| Ca  | 0.452        | 0.398              | 0.395          | 0.395          |
| Cpk | 0.266        | 0.507              | 0.511          | 0.511          |

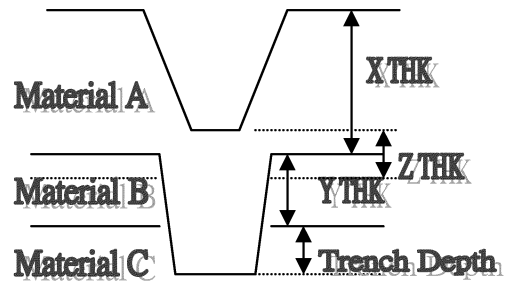


圖 1 淺溝槽(STI)隔離製程

表 5 綜合製程能力表( $\omega=0.8$ , 以 150 片數為預測模式)

|     |              |                    |                |                |
|-----|--------------|--------------------|----------------|----------------|
|     | Fab raw data | No metrology delay | A delay of one | A delay of two |
| Cp  | 0.486        | 0.853              | 0.85           | 0.849          |
| Ca  | 0.452        | 0.381              | 0.376          | 0.371          |
| Cpk | 0.266        | 0.527              | 0.530          | 0.533          |

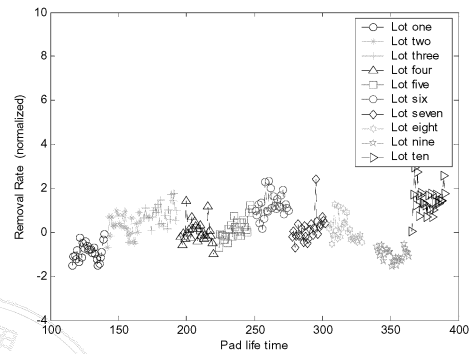


圖 2 研磨速率 vs 研磨墊週期之變化情形

表 6 綜合製程能力表( $\omega=0.8$ , 以 300 片數為預測模式)

|     |              |                    |                |                |
|-----|--------------|--------------------|----------------|----------------|
|     | Fab raw data | No metrology delay | A delay of one | A delay of two |
| Cp  | 0.486        | 0.838              | 0.747          | Unstable       |
| Ca  | 0.452        | 0.382              | 0.377          | Unstable       |
| Cpk | 0.266        | 0.518              | 0.465          | Unstable       |

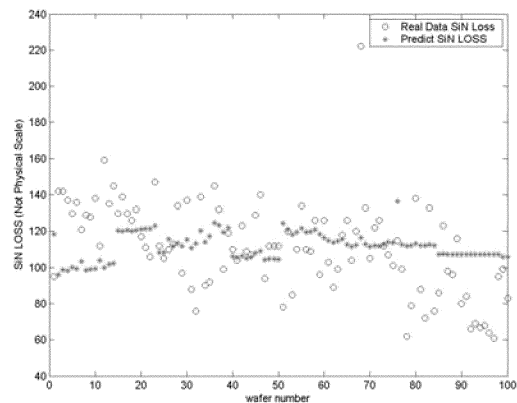
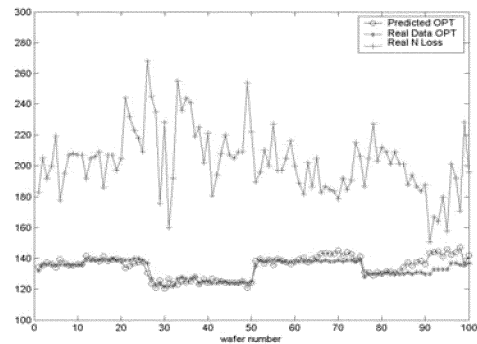


圖 4 真實研磨厚度與預測研磨厚度之關係圖

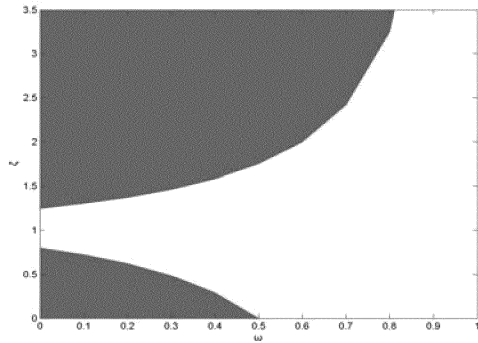


圖 5 一片延遲之穩定範圍

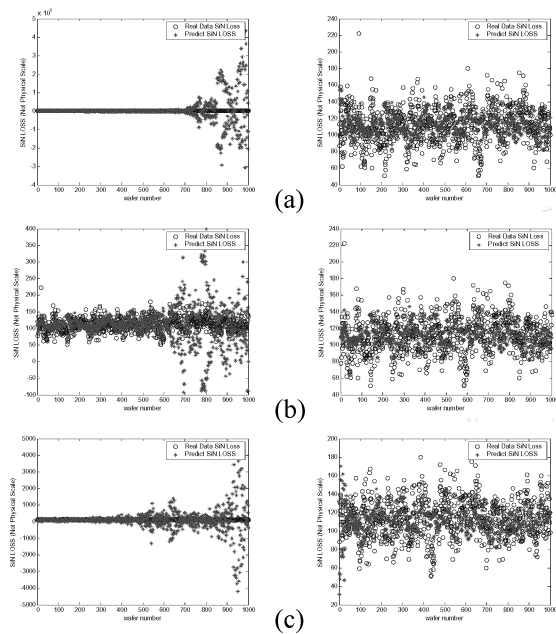


圖 6 一片量測延遲之穩定範圍驗證結果 (a) 75 片 (左圖: $\omega=0.38$ , 右圖: $\omega=0.39$ ) (b) 150 片 (左圖: $\omega=0.43$ , 右圖: $\omega=0.44$ ) (c) 300 片 (左圖: $\omega=0.79$ , 右圖: $\omega=0.80$ )

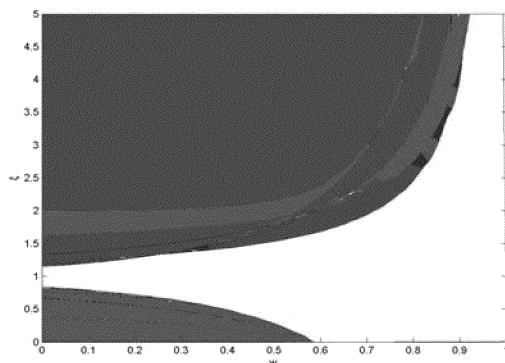


圖 7 二片延遲之穩定範圍

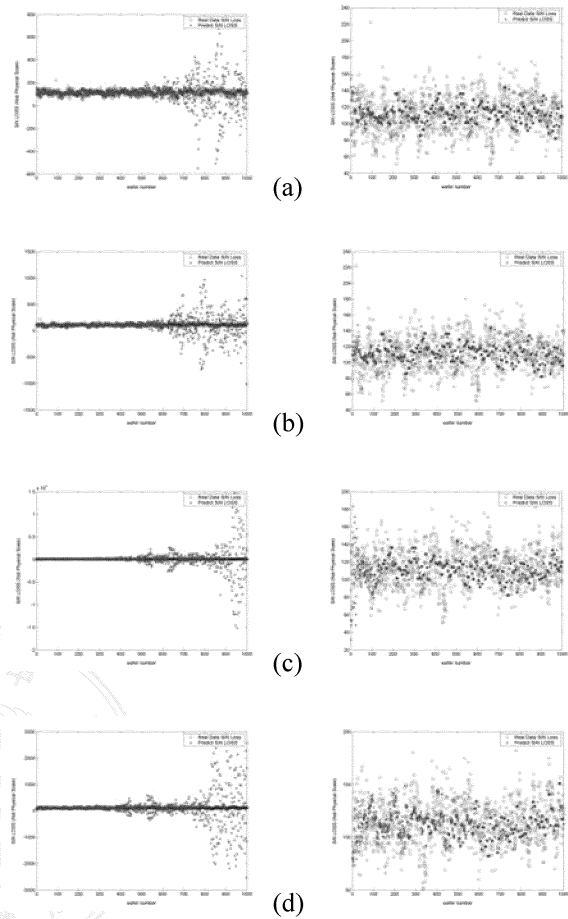


圖 8 二片量測延遲之穩定範圍驗證結果 (a) 75 片 (左圖: $\omega=0.48$ , 右圖: $\omega=0.49$ ) (b) 150 片 (左圖: $\omega=0.52$ , 右圖: $\omega=0.53$ ) (c) 300 片 (左圖: $\omega=0.86$ , 右圖: $\omega=0.87$ ) (d) 400 片 (左圖: $\omega=0.28$ , 右圖: $\omega=0.30$ )