

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

化學機械研磨的模式化與控制(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2214-E-002-032-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學化學工程學系暨研究所

計畫主持人：余政靖

計畫參與人員：許勝智

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 14 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

化學機械研磨的模式化與控制(3/3)

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫編號：NSC91 - 2214 - E - 002 - 036

執行期間： 92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

計畫主持人：余政靖

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學

中 華 民 國 九 十 三 年 七 月 二 十 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

化學機械研磨的模式化與控制 (3/3)

Modeling and Control of Chemical Mechanical Polishing (3/3)

計畫編號：NSC 91-2214-E-002-036

執行期限：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

主持人：余政靖

國立台灣大學化工系

計畫參與人員：許勝智

國立台灣大學化工系

1、中文摘要

於本研究中，我們進行多重區段 CMP 的研究。不同於傳統單一區段的結構，多重區段結構是將晶圓載具內部於半徑方向上分為三段，每段皆可施加不同壓力，藉此達到完全平坦的目標。我們使用台灣應用材料公司的三區段 CMP 機台，於研磨平台上具有 in situ 的感應器，可以得到晶圓上 59 點的表面厚度量測值，即為程序中的受控變數，而操作變數則為三個區段所施加壓力。

首先對此 59x3 的程序進行多變數控制。根據實驗設計法，以三個壓力不同的數值排列進行測試，隨後以最小平方迴歸出程序的穩態增益矩陣。再加上程序的動態來自氣體充滿該區段所需時間，最後可得一 59x3 的程序轉移函數矩陣，於其中每一行都具有相同的一階動態。控制目標是利用三個操作變數來維持均一的表面分佈。我們利用 SVD 來設計非方形的控制器，設計一對角的 PI 控制器(3x3)，此控制器的輸出(3x1)即在主要輸入(principal input)的方向上，再利用這些輸出轉換到系統的真實輸入(3x1)，為實際的壓力值。之後配合實際 ECP 製程所產生之晶圓各種起始表面分佈來進行模擬，結果都能維持在各自的可達成表現。

Abstract

In this work, the control of a new type of chemical mechanical polishing (CMP), multi-zone CMP, is explored. Unlike the typical single zone configuration, the wafer carrier is divided into three zones in the radial position and different pressure can be applied to each zone. For the Applied Materials three-zone CMP, the copper thickness across the radial position is measured with an in-situ sensor. The measurement is converted to 59 data points along the radial position. In the process control notation, these are the controlled variables and the manipulated variables are the three pressures applied to each zone, and we focus on the multivariable control of this 59x3 process. First, a two-level factorial design is carried out on all three pressures followed by the least square regression to find the steady-state gain matrix. Incorporated with the gas holdup dynamics, we have a 59x3 process transfer function matrix with the same first order dynamics in each column. Second, the singular value decomposition (SVD) is used to design the non-square feedback controller. Next, a diagonal PI controller (3x3) is designed and the controller outputs in the principle input directions (3x1) are computed. Finally, these controller outputs are transformed to the true inputs (3 pressures) to the process. This SVD controller can be implemented using standard software with little difficulty. The proposed control system is test on incoming wafers with different surface profiles. Results show that achievable performance (least square results) can be maintained using the proposed SVD controller.

2、簡介

一般 CMP 除了進行研磨凹凸不平的表面，使其平坦的工作外，為了避免多層內連線會發生短路現象，所以必須要將覆蓋於氧化層上的金屬銅層完全磨除。如圖 2-1 右上方所示的 polishing head，為一傳統結構，外部所圍繞的 retaining ring 為一可施加壓力的結構，其目的為固定住研磨中的晶圓，不因高速旋轉而脫離。內部為一可注入氣體的氣室(chamber)，在整個氣室充滿氣體之後，壓迫到位於氣室下方的高分子膜，進而對晶圓產生壓力。這樣的結構能施加壓力的部份只有一段，也就是說，在 CMP 過程中，理論上對於晶圓表面產生的研磨速率是相同的，但受到其他因素，如研磨墊和研磨液種類等其他因素的影響，卻不是每一點皆有相同的研磨速率，如圖 1 右下方，為一使用傳統 polishing head 研磨後的晶圓，可以發現在中心處的研磨速率是較大的，在中心已磨除完全金屬，到達平坦化終點時，晶圓邊緣卻還有剩餘金屬未研磨完，因此勢必再進行過度研磨，而這樣將使得中心處產生更為嚴重的金屬凹陷現象。

所以為了解決這樣的問題，便設計了具多重壓力區段結構的 polishing head，如圖 1 左上方，在邊端比傳統結構的多分出了兩個區域，這樣的結構使得施於晶圓邊緣的壓力大小得以調整，比起先前的結構，可調整壓力的部份變為三段，因此這樣的設計更能幫助我們降低利用傳統結構研磨晶圓後，所產生的晶圓非均勻度(within wafer non-uniformity, WIWNU)，並減少金屬凹陷，如圖 1 左下方。。

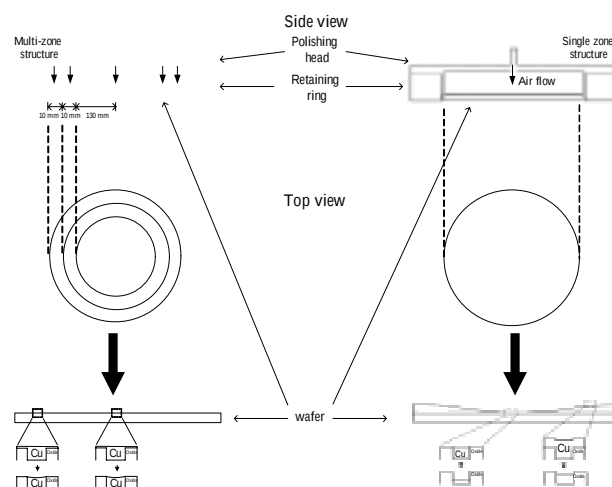


圖 1 單一和多重壓力區段結構對於研磨後晶圓金屬凹陷情形示意圖

3、多重壓力區段之 CMP 模式建立

在建立多重區段結構 polishing head 的模式之前，首先我們先來確定模式的形式。由普利斯登方程式得知，磨除速率和施加壓力，以及研磨面之間的相對轉速成一次方正比，不過由於我們主要是要探討純粹壓力對於晶圓表面非均勻度的影響，因此 polishing head 中可調整壓力的部份，包括負責研磨的三段壓力，以及維持晶圓固定用的 retaining ring 所施的壓力，皆考慮當做實驗的變數，而有關 polishing head 轉速部份，在實驗進行時則給予固定的值。另外我們考慮到在晶圓表面各點的移除速率，並不是僅會受到單一區段的影響而已，其他區段壓力所產生的影響也需一併探討，因此模式的形式即為：

$$RR = \sum_i K_i P_i \quad (1)$$

在上式中，RR 為移除速率；P 為被研磨表面施與研磨墊之壓力；K 為常數。

3.1 實驗參數

這次實驗是以銅為研磨對象，使用的研磨機台為美商台灣應用材料所製造之 Reflexion™ 化學機械研磨機，研磨頭為 Titan Profiler™ 系統，由 in situ 的 i-Scan sensor 來測量晶圓表面的厚度，其他耗材部份，研磨墊為使用 Rodel IC1010，研磨液為 Cabot 公司所生產之銅製程用研磨液。這次實驗中所研磨之晶圓，直徑為 300 mm (12 吋)，表面銅層是利用 ECP 的電鍍方法進行沉積，而且為 blanket wafer，即未轉移圖案(pattern)於其上的情況。

有關實驗參數的數值，和實驗進行次數，基本上我們可以利用實驗設計法(Design of Experiment, DOE)的輔助來加以決定。本實驗的因子即為各個可調整壓力，也就是 polish head 中心至外圍的三段壓力，再加上 retaining ring 所施加之壓力，將其分別定義為 p_1 、 p_2 、 p_3 和 p_{rr} ，而每個因子皆給予二個水準(level)，也就是分別給予一較大的操作數值，及另一較小操作數值，這樣一來便成為一個 4 因子 2 水準的實驗設計，若進行全配置實驗(full factorial DOE)，則可配出 16 次不同的實驗；不過為了清楚調查邊端區域的影響，故把 p_1 的兩個水準分開的和其他因子的變動來配，所以實驗重新定義成為兩個三因子二水準的全配置實驗(23 full factorial DOE)。通常全配置的 DOE 還會加入全部因子的水準為中間水準(center)之實驗，來觀察此被視為最適操作條件的表現，因此再於前述的兩組 DOE 中分別加入一次實驗，此外再各加一組隨機分配的水準來檢測雜訊，故總共需進行 20 次的實驗。

基本上我們考慮到晶圓本身圓形的對稱性，為方便往後模擬時工作的簡化，因此我們可以將系統所包括的量測點減半，將原來實驗所得結果數據做進一步處理，分別可得 pre-CMP 和 post-CMP 的厚度為：

$$y_0 = [y_{0,1}, y_{0,2}, K, y_{0,60}]^T \quad (2)$$

$$y = [y_1, y_2, K, y_{60}]^T \quad \text{where:} \quad y_i = \frac{z_{61-i} + z_{59+i}}{2} \quad (3)$$

其中下標 1 到 60，分別表示由晶圓中心到邊端的位置。另外有關晶圓表面上各點的移除速率部份我們假設研磨過程中每一點的移除速率均保持定值，取一移除速率的近似式如下：

$$RR \approx -\frac{\Delta y}{\Delta t} \quad \text{where:} \quad \Delta y = y_{0,i} - y_i \quad (4)$$

便可利用以上資料來求得晶圓表面上各點在研磨過程中的平均移除速率

系統的操作變數(manipulated variable)，我們將其定為在 polishing head 中的三段壓力值，即：

$$p = [p_1, p_2, p_3]^T \quad (5)$$

在這裡所使用的定義和在 DOE 中的因子是相同的。不過我們去除了 p_{rr} ，原因在於 p_{rr} 主要是在維持晶圓的固定，所以僅將其維持在一定範圍內即可。我們舉 platen-2 的第一及第九次實驗來說，這兩次實驗主要的差異即在於 p_{rr} 數值的不同。圖 2 表示了 p_{rr} 在改變後對銅移除量的影響，基本上 p_{rr} 對於平坦化結果的影響可以說非常小，也因此不考慮 p_{rr} 做為操作變數。系統的狀態變數(state variable)，我們則定為晶圓表面上各點的移除速率，即：

$$x = [x_1, x_2, K, x_{60}]^T \quad (6)$$

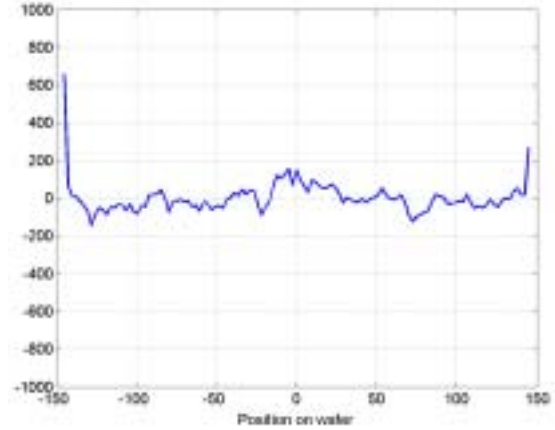


圖 2 改變 p_{rr} 對晶圓表面銅移除量影響示意圖

3.2 模式參數估算

前面討論過模式的形式為晶圓表面各點的移除速率和壓力成一次方正比的關係，若將式(1)改寫為和系統變數相關的形式，則為：

$$x = K_p \cdot p \quad (7)$$

我們可以 least-squares method 來進行 K_p 參數的估算。

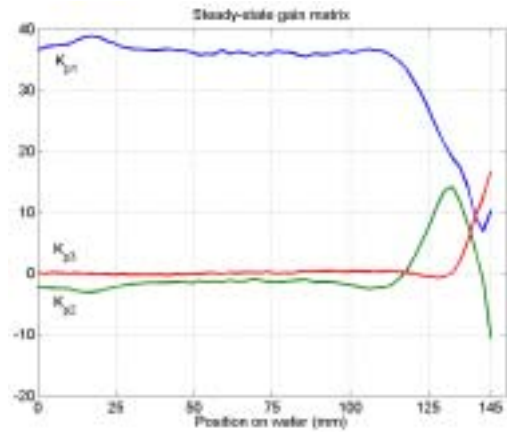


圖 3 穩態增益矩陣圖

K_p 參數迴歸出之後，我們將其行向量，分別對晶圓表面所區分由中心至邊端的 60 個量測點作圖，如圖 3 所示，由圖中可以很清楚觀察到三段壓力區間於 CMP 過程中所發揮的影響力。從影響範圍的分界和數值大小兩方面來看，基本上在整個 CMP 過程，最主要還是靠中間區段來掌控晶圓大部分區域的研磨，因此中間區段的影響範圍一定是最大的，同時數值也都是最大的，由中心開始，一直到大約在 110 mm 處開始逐漸下降，這裡已經相當接近第二段區間的分界；從此處開始， K_{p2} 值也逐漸增大，一直到快接近第三段區間才開始下降；至於 K_{p3} 則是在晶圓的邊端造成最大的影響。由此可知，我們所迴歸出來的模式，相當符合實際的物理情

況。而我們發現在最後一點上的數據，其數值開始有違整體變化的趨勢，如 Kp1 的趨勢由減少變為增加，以及 Kp2 的急劇下降，我們認為是在邊端遭受 noise 影響甚大，因此將最後一個量測點從系統中去除。

4、系統穩態與動態分析

4.1 穩態奇異值分解

奇異值分解(singular value decomposition, SVD)，是將的 A 矩陣分解成：

$$A = U\Sigma V^T \quad (8)$$

其中的 U 為左奇異向量 u_i 所組成且的正交矩陣，V 為右奇異向量 v_i 所組成且的正交矩陣，而 Σ 為對角矩陣，由非負值的 σ_i 所構成，稱為奇異值。條件數(condition number, CN)則定義為：

$$CN = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} \quad (9)$$

為最大的奇異值和最小的奇異值之比值。

在對穩態增益矩陣做 SVD 後，我們發現 V 矩陣相當接近單位矩陣，而將所得 U 矩陣中的各行向量對位置作圖，結果如圖 2-5，則發現各行向量的趨勢，和 Kp 中各行向量的趨勢非常類似，表示這三個方向剛好可以表示原系統；另外對角矩陣 Σ 為：

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 264 & 0 & 0 \\ 0 & 30.93 & 0 \\ 0 & 0 & 16.39 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根據式(9)所計算的 CN 值約等於 16，大致上是可以接受的。

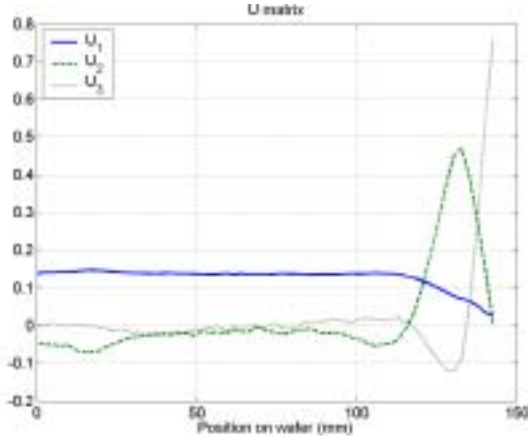


圖 4 奇異值分解中的 U 矩陣

4.2 穩態奇異值分解

系統的動態主要來自氣體注入氣室的過程，因此我們在這裡假設壓力的改變為一階動態行為，至於時間常數的估算，若假設注入三個區段的氣體流速皆為相同且固定的，所以時間常數的大小則正比於氣室的體積：

$$\tau_i \propto V_i \quad (11)$$

同時我們假設中間區段的時間常數(τ_1)為 3 秒，因此依照各區段的體積比例可計算得 $\tau_2 = 0.479$ ，

$$\tau_3 = 0.502。$$

4.3 穩態奇異值分解

將晶圓表面厚度對時間一次微分即為移除速率，其關係如下式：

$$\dot{x}(t) = -x(t) \quad (12)$$

將上式做拉普拉斯轉換：

$$Y(s) = \frac{x(s)}{s} \quad (13)$$

再由式(7)可得系統轉移函數：

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{p(s)} = \frac{1}{s} \cdot \begin{bmatrix} \frac{k_{1,1}}{(\tau_1 s + 1)} & \frac{k_{1,2}}{(\tau_2 s + 1)} & \frac{k_{1,3}}{(\tau_3 s + 1)} \\ M & M & M \\ M & M & M \\ M & M & M \\ \frac{k_{59,1}}{(\tau_1 s + 1)} & \frac{k_{59,2}}{(\tau_2 s + 1)} & \frac{k_{59,3}}{(\tau_3 s + 1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

5、CMP 程序控制

CMP 製程簡單來說，是使被研磨晶圓表面達到完全平坦化的程度，並且使剩餘厚度能到達期望厚度，但問題在於 ECP 製程所電鍍出來的銅層，其表面分佈，常會隨著操作條件的改變，或製程本身的問題，而有所不同，即使是同一批的產品，之間也存在著許多的差異，如圖 5 所示。

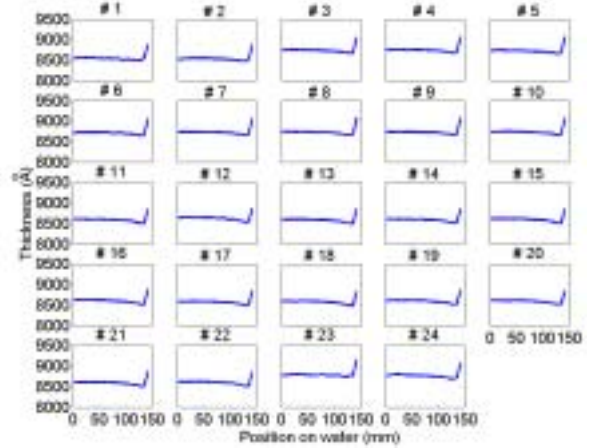


圖 5 ECP 製程所產生各種起始表面分佈圖

5.1 目標與評估指標

本系統為一 non-square 形式，於輸出部分必定存在誤差，但我們所在意的是整體表面厚度的均勻度，故我們的控制目標在於使得整體表面分佈和期望厚度的誤差之 2-norm 形式最小，所以這裡採用 2-norm 做為目標函數，則目標函數(J)可寫為：

$$J = \min \|E\|_2 = \min \|y_f - y_d\|_2 \quad (15)$$

其中 y_f 為到達研磨終點時的表面厚度分佈。

對於控制的結果，即經研磨後最後的表面厚度分佈，我們可以利用以下幾個指標來進行評估：

(1)標準差(standard deviation, SD)：

$$SD = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{f,i} - \bar{y}_f)^2 / n} \quad (16)$$

此項指標也可解釋為，最後表面分佈平均每一點和期望厚度的差距。

(2)最後表面分佈和其平均厚度之差的 ∞ -norm 形式，即：

$$\text{Infinity norm} = \|y_f - \bar{y}_f\|_{\infty} \quad (17)$$

(3)最後表面分佈之中的差距(range)，即：

$$\text{range} = y_{f,\max} - y_{f,\min} \quad (18)$$

其中 $y_{f,\max}$ 及 $y_{f,\min}$ 代表該厚度分佈中的最大值及最小值。以上兩個指標，最主要是用來觀察最後表面分佈在晶圓邊端的表現情況。

(4)非均勻度(non-uniformity, NU)為在評估一研磨過後表面最常用到的指標，而 NU 的定義為標準差值除上平均厚度的百分比，其表示式如下：

$$NU = \frac{SD}{\bar{y}_f} \times 100\% \quad (19)$$

這項指標是根據最後表面分佈的平均厚度為基準，而研磨後晶圓平均高度一定會變低，因此若最後的 SD 值無法維持較小的變化範圍，則此值必定會增大。

5.2 前饋控制：比率控制(CS1)

在這裡我們提出第一種控制結構，主要是利用前饋控制(feedforward control)的策略來進行，即事先考慮到晶圓進入程序時起始表面分佈的不同，進而能求得適用於其條件的壓力比率值，稱之為比率控制(ratio control)，如圖 6 所示。

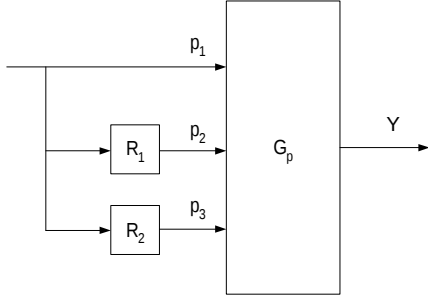


圖 6：比率控制結構圖

這樣的控制策略，對於製程中的硬體設備需求(hardware requirement)方面來說，並不需要 in-situ 的 sensor 裝置。因為這種控制策略主要是利用已知的起始條件，即為在進行研磨之前，先將起始表面分佈量測出來，然後根據這樣的條件預估與期望厚度的差距，接著計算出適用的壓力比例輸入值，維持這樣的 recipe 不變至研磨終點，最後於研磨過程結束後，再做一次表面量測，以進行後續的評估動作。因此在整個程序過程中，並不需要使用 sensor 做晶圓表面及時量測，只有於最初及最後進行兩次即可。故此種策略除了減少 sensor 運作頻率，同時也提供了製程現場人員一種簡單且易於運用的方法。

以下開始介紹本控制結構的各項操作步驟：

- (1) 給定一個起始表面分佈 y_0 。
- (2) 設定期望厚度 $y_d = 2000 \text{ \AA}$ 。
- (3) 假設起始表面分佈中的最大值，在到達研磨終點時，其期望移除速率 x_d 為 $4000 \text{ \AA/min}$ ，因此即可依照比例求得整體表面分佈的期望移除速率 x_d ，以及所需研磨時間 t ：

$$t = \frac{y_{0,\max} - y_d}{4000} \quad (20)$$

$$x_{d,i} = \frac{4000 \cdot (y_i - y_d)}{y_{0,\max} - y_d} \quad (21)$$

由下式計算壓力輸入：

$$\mathbf{p} = \mathbf{K}_p^+ \cdot \mathbf{x}_d \quad (22)$$

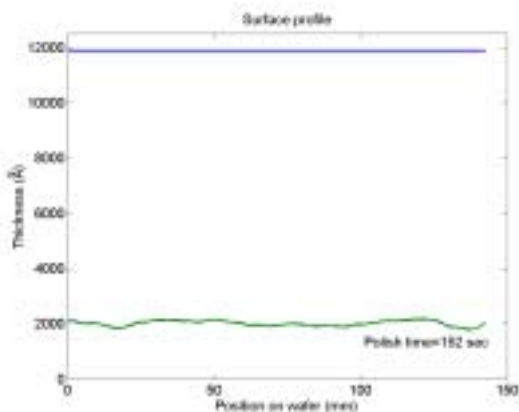


圖 7 完全平坦之起始表面分佈比率控制結果

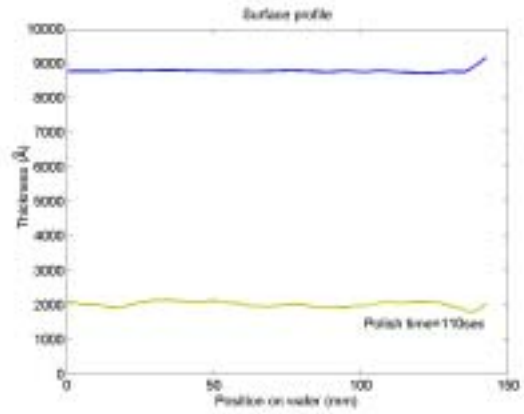


圖 8 起始表面分佈比率控制結果

控制結果如圖 7 及圖 8 示，圖中分別畫出起始表面分佈及最後表面分佈曲線。

首先是假設完全平坦的起始表面，由於系統本身的誤差，而使得即使一開始為完全平坦的表面，到研磨終點產生了表面不平坦的情況，也因此本例的各項指標也都增大，其實這也已經是本系統所能達到的最佳表現。而觀察最後的 NU 值約為 5%，這樣的規格在產業界已經可以接受。而在其他的例子方面，其 NU 值還是維持在 5% 以內，都屬於可接受的範圍。

5.3 回饋控制(CS2)

在這裡提出另一種控制結構，是利用回饋控制的策略，亦即對晶圓表面做即時量測的動作，利用各點表面厚度和設定點的差值，經控制器來調整所需施加的壓力值。而系統本身為一個非方形的矩陣，因此對控制器的設計增加了許多困難，所以我們在這裡再次利用 SVD 的方法，來對此一系統做簡化的動作。

5.3.1 系統簡化

對尚未被簡化的控制結構進行全部控制(full control)所需設計的控制器參數總數相當多，因此我們需要簡化系統以降低控制器設計的難度。接下來為系統被簡化的過程，圖 9 為簡化過程的示意圖。首先即為將穩態增益矩陣進行 SVD 的工作：

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (23)$$

因此系統的描述則變為下式：

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \frac{1}{s} \mathbf{K}_p \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{p} \\ &= \frac{1}{s} (\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T) \mathbf{D} \cdot \mathbf{p} \\ &= \mathbf{U} \cdot \text{diag} \left[\frac{\sigma_i}{s} \right] \cdot \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{p} \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $\mathbf{D}$ 為描述系統動態的對角矩陣：

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_1 s + 1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_2 s + 1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_3 s + 1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

為了設計上的方便，所以在控制器的結構中包含了 $\mathbf{D}$ 的反置矩陣，用來將 $\mathbf{D}$ 矩陣消去，因此整個系統控制方塊圖如圖 9 所示。此時將等號兩邊同時乘上 $\mathbf{U}^T$ ，則式(23)變為：

$$\mathbf{U}^T \mathbf{Y} = \text{diag} \left[\frac{\sigma_i}{s} \right] \cdot \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{p} \quad (25)$$

接著將 $U^T Y$ 和 $V^T P$ 分別重新定義為新的變數 Y^* 和 p^* ，同時也將中間對角矩陣定義為 G_p^* ，即：

$$Y^* = G_p^* p^* \quad (26)$$

由上式我們得到了一個對角 3x3 decouple 的系統，因此在設計控制器時便可直接針對上式，並在控制器設計的困難度方面，比起全部控制要減少許多。其中在圖 9 中可以看到，在程序轉移函數做 SVD 之後，即分解出三個部分，而對於控制器的轉移函數來說，同樣的也可以經 SVD 後分解出三個部分，因此若在下面兩條件成立之下：

$$U U_c^T = I \quad (27)$$

$$V^T V_c = I \quad (28)$$

便可以直接對 G_p 來設計一個對角控制器 C_{diag} (圖 2-14)，而圖 9 中的 G_c 控制器則稱為 SVD controller (Sagfors, 1998)。

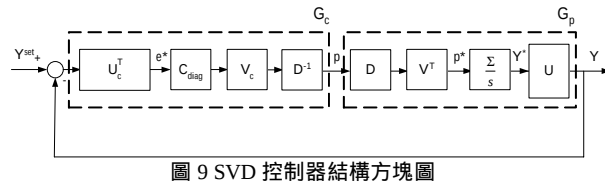


圖 9 SVD 控制器結構方塊圖

5.3.2 控制器設計

控制器的種類，傳統的 PID 控制是最簡便的控制器，至於此對角控制器參數的計算，我們利用 IMC 控制器設計步驟 (Morari & Zafriou, 1989) 來進行。如圖 10，為系統的 IMC 控制架構，其中的 IMC 控制器 (C_{IMC}) 和對角控制器的關係為：

$$C_{IMC} = [I + C_{diag} \hat{G}_p^*]^{-1} C_{diag} \quad (29)$$

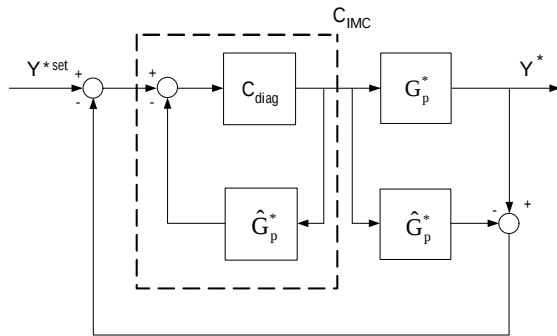


圖 10 IMC 控制結構方塊圖

因此我們便可以經由 IMC 控制器設計步驟，找到 CIMC 的表示式後，再經由上式轉換，即可求得對角控制器參數。以下為設計步驟：

(1) 將對角的程序模式分解成：

$$\hat{G}_p^+(s) = \hat{G}_p^+(s) \cdot \hat{G}_p^-(s) \quad (30)$$

其中 $\hat{G}_p^+(s)$ 代表含時間延遲項 (time delay) 及所有右半平面 (right-half plane, RHP) 的零點 (zeros) 的不可反轉部分，由於本系統未含符合以上所提及各條件之項，因此上式 $\hat{G}_p^-(s)$ 就等於 $\hat{G}_p^+(s)$ 。

(2) 選擇 IMC 濾波器 (IMC filter)：

系統中期望移除量 (Y_d) 是隨著時間變大的一條直線，其斜率則為期望移除速率 (x_d)，故這屬於 type-2 系統，因此所選擇的濾波器 F 為：

$$F = \text{diag}[f_i] \quad (31)$$

其中

$$f_i = \frac{2\tau_{CL,i}s+1}{(\tau_{CL,i}s+1)^2} \quad (32)$$

上式中 $\tau_{CL,i}$ 為濾波器的時間常數，也為閉環路的時間常數，假設為各環路中時間常數的 30%。

(3) IMC 控制器則表示為：

$$C_{IMC} = (\hat{G}_p^*)^{-1} F \quad (33)$$

因此對角控制器即為：

$$C_{diag} = C_{IMC} [I - \hat{G}_p^* C_{IMC}]^{-1} = (\hat{G}_p^*(s))^{-1} \frac{f_i}{1-f_i} \quad (34)$$

最後展開可得：

$$C_{diag} = \Sigma^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2\tau_{CL,1}s+1}{\tau_{CL,1}^2 s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\tau_{CL,2}s+1}{\tau_{CL,2}^2 s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\tau_{CL,3}s+1}{\tau_{CL,3}^2 s} \end{bmatrix} \quad (35)$$

為一 PI 控制器。若將上式的轉移函數乘上 $D^{-1}V_c$ 之後，則變為另一 3x3 的控制器轉移函數 C ：

$$C = D^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} = D^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{11}C_1 & v_{12}C_2 & v_{13}C_3 \\ v_{21}C_1 & v_{22}C_2 & v_{23}C_3 \\ v_{31}C_1 & v_{32}C_2 & v_{33}C_3 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$= \begin{bmatrix} \tau_1 s + 1 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 s + 1 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 s + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{v11} & C_{v12} & C_{v13} \\ C_{v21} & C_{v22} & C_{v23} \\ C_{v31} & C_{v32} & C_{v33} \end{bmatrix}$$

上式的 3x3 控制器則為原來設計的對角 PI 控制器，再結合 D^{-1} 矩陣，即為一 PID 控制器。將此一控制器整理為 PID 的形式，則控制器的每一元素為：

$$c_{ij} = \sigma_i^{-1} v_{ij} \cdot \frac{(2\tau_{CL,i}s+1)(\tau_i s+1)}{\tau_{CL,i}^2 s} = \sigma_i^{-1} v_{ij} \cdot \left(\left(\frac{\tau_i + 2\tau_{CL,i}}{\tau_{CL,i}^2} \right) + \left(\frac{1}{\tau_{CL,i}} \right) \frac{1}{s} + \left(\frac{2\tau_i}{\tau_{CL,i}} \right) s \right) \quad (37)$$

所以控制器各部分的調諧參數表示如下：

$$K_{c,ij} = \frac{v_{ij}(\tau_i + 2\tau_{CL,i})}{\sigma_i \tau_{CL,i}^2} \quad (38)$$

$$\tau_{I,ij} = \frac{v_{ij}}{\sigma_i \tau_{CL,i}} \quad (39)$$

$$\tau_{D,ij} = \frac{2v_{ij}\tau_i}{\sigma_i \tau_{CL,i}} \quad (40)$$

由於 V_c 相當接近單位矩陣，故只列出控制器對角元素的參數。根據以上由式 (38) 到 (40) 所算出的控制器參數值為：

$$K_{c,11} = 0.0224, \tau_{I,11} = 0.0042, \tau_{D,11} = 0.0252$$

$$K_{c,22} = 1.1999, \tau_{I,22} = 0.225, \tau_{D,22} = 0.2155$$

$$K_{c,33} = 2.1607, \tau_{I,33} = 0.4051, \tau_{D,33} = 0.4068$$

5.3.3 控制結果討論

在這邊使用和進行比率控制時同樣的四種起始表面分佈，其結果如圖 11 及 12 所示。表 1 為兩種不同控制策略其最後表面分佈的各項評估值，對可達成表面分佈各項評估值之比值。整體來看，使用 SVD 控制器能使最後表面分佈更為接近可達成表面分佈，其比值絕大部分接近 1，主要是由於比率控制於整個研磨過程中皆使用不變的壓力比值，而 SVD 控制器對於壓力值則具有可隨

時調整的能力，因此在研磨初期即馬上調大壓力值，補償了系統一開始短暫動態所造成未能磨除的部分，待磨除量能跟上設定點後，便將壓力調回正常的比例。另外從每個例子的三個主要輸出 Y^* 和 Y^{*set} 的誤差圖來看，這樣的 PID 控制器對於本系統的穩態誤差皆可完全消除，在短時間內便使得系統的主要輸出都能位於設定點上。

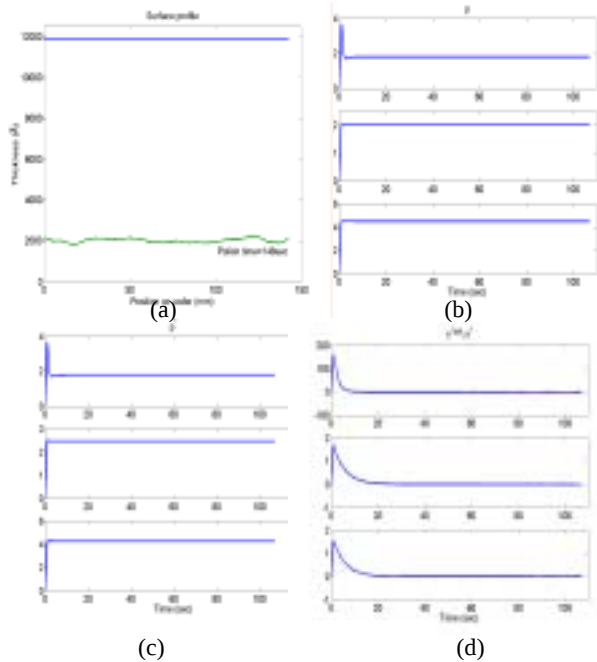


圖 11 完全平坦起始表面分佈回饋控制結果(a)表面分佈 (b)壓力變化 (c)變數 p^* (d)誤差

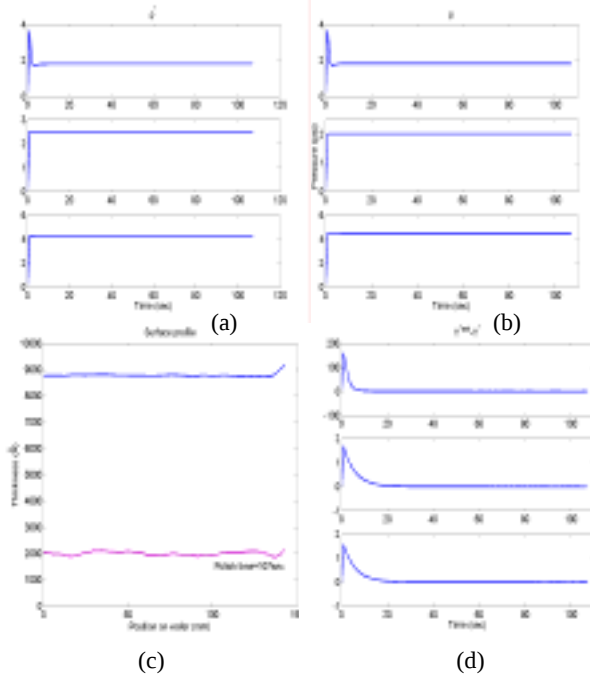


圖 11 起始表面分佈 IC1 回饋控制結果(a)表面分佈 (b)壓力變化 (c)變數 p^* (d)誤差

6、結論

由於傳統 polishing head 只具備單一壓力區段結構，故對於晶圓會產生非均勻性的影響，因此便有了多重壓力區段結構的 polishing head 產生。我們利用 DOE 的方法，對於此一結構進行一連串的實驗，進而由實驗結果以 least-squares 法迴歸出一可適當描述系統的模式，以

進行後續的模擬動作。其後對系統模式進行分析，得知由於系統的輸出數多於輸入數，因此於系統輸出必定會有誤差，我們便根據此一特性，對系統進行誤差 2-norm 形式最小化的控制，同時也提出了兩種控制結構進行比較。在比率控制方面提供一簡單的策略來進行控制，而在回饋控制方面先將系統簡化後再設計控制器，同時對於各種不同的起始表面分佈進行測試，結果發現對於大多數堪稱良好的起始表面分佈，如完全平坦、IC1 和 IC2，於最後的 NU 值的表現，不管是在變化或是絕對的數值上，都小於 5%，能符合業界規格，另外對於起始表面分佈條件較為差的例子，基本上在表面分佈距平均厚度的最大差值，最後也可以降低 25% 左右。而兩種控制結構的比較，則由於使用 SVD 控制器的壓力於製程初期可進行調整，也因此最後表面分佈的結果較接近於可達成表面分佈。

Surface profile		Flat	IC1	IC2	IC3
Initial	SD	0	62.21	88.47	159.4
	∞ -norm	0	378	636	603
	range	0	444	714	734
	NU (%)	0	0.71	1	1.15
	$\ E_{\min}\ _2$	727	535	698	1170
Achievable	SD	95.46	70.3	91.61	153.6
	∞ -norm	189	142	321	457
	range	363	272	541	802
	NU (%)	4.77	3.51	4.58	7.68
	$\ E\ _2$	786	618	740	1218
Final	SD	101	77.5	97	157
	∞ -norm	225	223	330	444
	range	362	273	541	800
	NU (%)	5.01	3.83	4.83	7.72
	$\ E\ _2$	751	579	703	1201
(Top: ratio control)	SD	95.23	70.04	91.52	153.33
	∞ -norm	189	143	322	455
Bottom: multivariable feedback control)	range	379	345	528	778
	NU (%)	4.7	3.45	4.55	7.53
	$\ E\ _2$	8.12	15.51	6.02	4.1
Relative error*		3.3	8.22	0.72	2.65

表 1 兩種控制模式應用在三種不同批晶圓結果整理

6、REFERENCES

- [1] Arimoto, S.; Kawamura, S.; Miyazaki, F., "Bettering Operation of Robots by Learning", J. of Robotic Systems, 1, 123-140 (1984).
- [2] Arimoto, S.; Kawamura, S.; Miyazaki, F., "Learning Control Theory for Dynamical Systems", in Proc. 24th Conf. Decis. Contr., FT. Lauderdale, FL., 1375-1380 (1985).
- [3] Astrom, K. J.; Wittenmark, B., Adaptive Control, 2nd edition, Addison-Wesley Pub. Co. (1995).
- [4] Boning, D. S.; Moyne, W. P.; Smith, T. H.; Moyne, J.; Telfeyan, R.; Hurwitz, A.; Shellman, S.; Taylor, J., "Run by Run Control of Chemical-Mechanical Polishing", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., Part C, Manuf, 19, 307-314 (1996).
- [5] Boning, D. S.; Smith, T. H.; Stefani, J.; Butler, S. W., "Run by Run Advanced Process Control of Metal Sputter Deposition", IEEE Trans. Semicond. Manuf., 11, 276-284 (1998).
- [6] Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S., Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, 1st edition, John Wiley & Sons, Inc. (1978).
- [7] Butler, S. W.; Stefani, J. A., "Supervisory Run-to-Run Control of A Polysilicon Gate Etch Using In Situ Ellipsometry", IEEE Trans. Semicond. Manuf, 7, 193-201 (1994).
- [8] Chen, A.; Guo, R. S., "Age-Based Double EWMA Controller

- and Its Application to CMP Processes”, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 14, 11-19 (2001).
- [9] Choi, J. Y.; Do, H. M., “A Learning Approach of Wafer Temperature Control in A Rapid thermal Processing System”, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 14, 1-10 (2001).
 - [10] Cook, L. M., “Chemical Process in Glass Polishing”, J. Non-cryst. Solids, 120, 152-171 (1990).
 - [11] Del Castillo, E.; Hurwitz, A. M., “Run-to-Run Process Control: Literature Review and Extensions”, J. Qual. Technol., 29, 184-196 (1997).
 - [12] Del Castillo, E.; Yeh, J. Y., “An Adaptive Run-to-Run Optimizing Controller for Linear and Nonlinear Semiconductor Processes”, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 11, 285-295 (1998).
 - [13] Fan, S. K. S.; Jiang, B. C.; Jen, C. H.; Wang, C. C., “SISO Run-to-Run Feedback Controller Using Triple EWMA Smoothing for Semiconductor Manufacturing Processes”, Int. J. Prod. Res., 40, 3093-3120 (2002).
 - [14] Geng, Z.; Carroll, R. L.; Xie, J., “Two-Dimensional Model Algorithm Analysis for A Class of Iterative Learning Control Systems”, Int. J. Control, 52, 833-862 (1990).
 - [15] Ingolfsson, A.; Sachs, E., “Stability And Sensitivity of An EWMA Controller”, J. Qual. Technol., 25, 271-287 (1993).
 - [16] Irani, K. B.; Hankinson, M.; Vincent, T.; Khargonekar, P. P., “Integrated Real-Time and Run-to-Run Control of Etch Depth in Reactive Ion Etching”, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 10, 121-130 (1997).
 - [17] Johnson, R. A.; Wichern, D. W., Applied Multivariate Statistical Analysis, 5th edition, Prentice-Hall, Inc. (2002).
 - [18] Lawn, B.; Wilshaw, R., J. Mater. Sci., 10, 1049 (1975).
 - [19] Ljung, L.; Soderstrom, T., Theory and Practice of Recursive Identification, MIT Press (1983).
 - [20] Moore, G., IEDM Tech. Dig., 11 (1975).
 - [21] Morari, M.; Zafiriou, E., Robust Process Control, Prentice-Hall, Inc. (1989).
 - [22] Patel, N. S.; Miller, G. A.; Guinn, C.; Jenkins, S. T., “Device Dependent Control of Chemical-Mechanical Polishing of Dielectric Films”, IEEE Trans. Semicond. Manuf., 13, 331-343 (2000).
 - [23] Preston, F. W., “The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines”, J. Soc. Glass Technology, 11, 214 (1927).
 - [24] Rivera, D. E.; Morari, M.; Skogestad, S., “Internal Model Control. 4. PID Controller Design”, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 25, 252-265 (1986).
 - [25] Runnels, S. R., “Feature-Scale Fluid-Based Erosion Modeling for Chemical-Mechanical Polishing”, J. Electrochem. Soc., 141, 1900-1904 (1994).
 - [26] Sagfors, M. F.; Waller, K. V., “Multivariable Control of Ill-conditioned Distillation Columns Utilizing Process Knowledge”, J. Proc. Cont., 8, 197-206 (1998).
 - [27] Tseng, W. T.; Wang, Y. L., “Re-examination of Pressure and Speed Dependences of Removal Rate during Chemical-Mechanical Polishing Processes”, J. Electrochem. Soc., 144, L15-L17 (1997).
 - [28] Uchiyama, M., “Formation of High-Speed Motion Pattern of A Mechanical Arm by Trial”, Trans. SICE, 14, 706-712 (1978).
 - [29] Warnock, J., “A Two-Dimensional Process Model for Chemimechanical Polish Planarization”, J. Electrochem. Soc., 138, 2393-2402 (1991).