

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用先進製程控制於混貨化學機械研磨製程 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 98-2221-E-216-019-
執行期間：98年08月01日至99年07月31日
執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：陳俊宏

計畫參與人員：碩士級-專任助理人員：陳正文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 10 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

應用先進製程控制於混貨化學機械研磨製程

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC — 98 — 2221 — E — 216 — 019

執行期間：98 年 8 月 1 日至 99 年 7 月 31 日

執行機構及系所：中華大學機械工程學系

計畫主持人：陳俊宏

共同主持人：

計畫參與人員：陳正文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

- 赴國外出差或研習心得報告
- 赴大陸地區出差或研習心得報告
- 出席國際學術會議心得報告
- 國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查

詢

中 華 民 國 99 年 10 月 26 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

應用先進製程控制於混貨化學機械研磨製程

Application of Advanced Process Control on Mix-product Chemical-Mechanical Polishing Processes

計畫編號：NSC 98-2221-E-216-019

執行期限：98年8月1日至99年7月31日

主持人：陳俊宏 中華大學機械工程學系

計畫參與人員：陳正文 中華大學機械工程學系

一、中文摘要

隨著半導體元件幾何形狀不斷的微縮化，如何更精確控制半導體製程以增進產品的品質、產量以及良率已成為重要的課題，而化學機械研磨製程(chemical-mechanical polishing process, CMP process)更為其中的關鍵製程。針對此一課題，計畫申請人將針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用。本計畫利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良型 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展合作型 d-EWMA 控制器(cooperative d-EWMA controller)應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能，實驗結果顯示合作型 d-EWMA 控制器比其他控制器具有更好的控制效能。

關鍵詞：半導體製程、化學機械研磨、混貨、雙指數平移控制器、研磨率。

Abstract

With the continuing shrink of device geometries, tightly control of semiconductor manufacturing processes becomes a critical factor to improve the process performance, throughput, and yield. Chemical-mechanical polishing (CMP) is part of critical processing module in semiconductor manufacturing. In this project, we present design, analysis and implementation of a run-to-run film thickness control scheme for the multi-product CMP processes. A predictor-corrector type of control law will be utilized to regular the CMP process time. The independent d-EWMA controller, the modified d-EWMA controller, and the cooperative d-EWMA controller were applied to real multi-product CMP processes in order to predict polish rates and compare their performances. Experimental results revealed that application of the cooperative d-EWMA controller is proven herein to significantly improve the estimation accuracy of the multi-product CMP process.

Key Words: semiconductor manufacturing processes, chemical-mechanical polishing (CMP), multi-product, d-EWMA controller, polish rate.

二、緣由與目的

近十年來，R2R 控制開始被漸漸導入應用在半導體產業。R2R 控制是一種對於製程與設備的控制方法，利用收集製程資料與即時量測資料修正線上製程配方，用以補償各式各樣的干擾，如製程偏移 (shift)、漂移(drift)與變異 (Variations)，使製程輸出值回歸目標值以降低製程變異而增進製程能力。目前 R2R 控制在半導體已經廣泛的被運用在半導體廠各種關鍵的製程中，如化學機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing, CMP)、黃

光製程(Photolithography)、蝕刻製程(etch)、與化學氣相沈積 (Chemical Vapor Deposition, CVD) ...等製程。但目前大部分 Run to Run 控制之研究與案例，皆假設在單一產品在單一機台上之控制，但在實際之晶圓廠中(如：台灣積體電路與聯華電子)同時間有數十到數百種產品在同一條生產線上生產，且其主要客戶多為消費性電子產品之廠商，在目前市場短暫的生命週期下，許多的訂單都是以少量多樣的方式下單，甚至會出現一批貨中有兩到三家客戶之產品混合生產，就算在製程較單調的記憶體廠商(如：力晶、茂德、華亞...等)也有 3-10 種產品，每一種產品更是包含了 20-50 層(layer)，而每一層需要利用不同的製程步驟堆疊。這種一台機台需針對多產品、多層進行製程的情況被稱為高度混貨生產(high-mix production)，在高度混貨的情況底下，傳統的單一機台單一產品控制，將會出現控制效能不足甚至控制失敗的情形產生。

隨著半導體製造技術對高積集度與微縮化的不斷追求，在目前最尖端的半導體科技中，化學機械研磨(Chemical Mechanical Polishing, CMP)已經成為眾所矚目的關鍵製程。不論在原始矽晶圓的拋光、IC 絕緣層及金屬層的形成、記憶體的電容製作或新一代的鑲嵌法(Damascene)及 SOI(Silicon on Insulator)的相關應用上，CMP 不但是目前最直接也最有效的平坦化技術，也是突破下一代半導體元件製造瓶頸不可或缺的利器，而將更高階的製程控制技術導入 CMP 製程以提高控制效能乃成為當務之急。一般半導體廠考量到 CMP 機台價格昂貴，為了提高設備的使用率以降低生產成本，幾乎都採取混貨(multi-product)生產，亦即單一 CMP 機台對不同特性研磨層進行研磨，但是目前大部分有關 R2R CMP 製程控制的研究皆是針對單一機台單一研磨層。

近年來，多位學者提出有關製程控制方面研究，MacGregor[1]，Box 和 Kramer[2]，Box 和 Jenkins[3] 提出了 EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)控制器理論。Box 和 Jenkins 所提的 EWMA 控制器是將目標值與輸出值的差距，依其時點與現今時點的不同，給予一呈現遞減幾何分配的權重，也就是說，離現今時點越近的資料點，給予資料點的權重越大。Box 和 Jenkin 也證明當製程擾動呈現 IMA(1,1)(Integrated Moving Average)型態時，EWMA 控制器是一 MMSE (Minimum Mean Squared Error)控制器。Tucker 和 Faltin[4]，Vander Wiel 等[5]則提出了一應用連續製程產業(Algorithmic Statistical Process Control)。半導體業界最先提到批間控制的理論係德州儀器公司的 Guide 等[6]，探討利用氧化時間來控制氧化層的生長厚度。而後 MIT 研究群提出了批間控制器的理論與實驗結果[7-13]。柏克萊大學[14,15]，密西根大學[16-20]與德州儀器公司[21-25]亦隨後提出這類研究。其中 Butler 與 Stefani[17]所提出的 PCC (Predictor Corrector Control)控制方法應用於具有漂移特性的製程，將製程平均值調整至目標值，隨後亦有相當多的論文針對具飄移特性製程進行研究[26-28]。Chen 等[29]則提出 Age based d-EWMA 控制方法來估計製程真正漂移量，此法能應用於非等間距量測。計畫申請人等針對金屬濺鍍製程的沈積率隨時間衰減的特性，結合時間序列與遞迴式最小平方方法(recursive least squares, RLS)[30]，以及時間序列(time series)與卡爾曼濾波器(Kalman Filter)[31]，發展二種控制器來預測與控制金屬沈積率，控制器不僅可有效預測與控制沈積率與應用於等間距與非等間距抽樣量測，同時具有隨著濺鍍靶材的更換自動調整製程模型的功能。

除了單一輸入輸出(SISO)的製程控制，最近有些學者投入多輸入輸出(MIMO)製程控制的研究，例如 multivariate EWMA[32]、multivariate d-EWMA[33]、整合 multivariate EWMA 與 multivariate SPC[34]以及應用類神經於 CMP 的製程控制[35]。計畫申請人等[36]亦曾針對半導體黃光製程，利用能量(Dose)與焦距(Focus)作為製程參數，控制顯影的關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)。文中首先利用實驗設計與反應曲面法建立射出顯影機台之製程模型，並提出兩種非線性估計器(NMEWMA, DMTMV)來估計顯影製程輸出的關鍵尺寸，以及利用最小變異控制器作批次控制。此外，申請人等[37-38]利用實驗設計與反應曲面法建立射出成形機台之製程模型，然後利用動態模型調變控制器(dynamic-model-tuning controller)以及 EWMA 控制器對射出產品的品質指標作批次控制。

上述研究皆是針對單一執行序(single thread)的半導體製程，但針對先進混貨製程技術之研究與發展，Zheng 等[39]針對以產品為基準(product-based)以及機台為基準(tool-based)的 EWMA 控制器，探討其分別應用於混貨製程的穩定性及效能。Firth 等[40]提出 Just-in-time adaptive disturbance estimation (JADE) 這套理論來解決高度混貨的問題，將 SISO 混貨製程干擾視為各個產品、機台和其他可能干擾源的線性組合，模擬的結果雖然比單一執行序 EWMA(single threaded EWMA)控制器更有效能，但因其假設 SISO 混貨製程模型不會隨著時間而漂移，對於製程並不適用。Ma[41,42]等利用變異數分析(ANOVA)建立混貨製程模型，並分別假設干擾為高斯分佈利用卡曼濾波器推導控制法則，或將干擾表示為 ARIMA 的模型來推導半導體混貨製程的控制法則。Ai[43]等探討混貨產品在同一機台循環生產的情況，發現在前幾個循環如果使用 d-EWMA 控制器，在更換產品時會產生大誤差，因而提出稱之為「drift-compensatory approach」的方法來解決此種問題。

計畫申請人將針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展 cooperative d-EWMA 控制器應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能

三、應用在混貨製程的批次控制方法

如上節所述，大部分有關製程控制的研究皆是針對單一產品在單一機台生產，在此一情況，CMP 製程的數學模型可假設為

$$y_k = y_0 + \varepsilon_k; \quad (1)$$

其中 y_0 為 CMP 機台換新研磨墊後的初始研磨率， ε_k 為第 k 批次研磨率與初始研磨率之間的誤差，誤差的來源包括隨著使用時間造成研磨墊退化或其他不確定因素如研磨液流量、研磨頭壓力與轉速以及研磨墊轉速等的變異所造成。也因為研磨墊的持續退化會造成研磨率的持續下降(drift)，在製程中必須持續改變製程配方來對研磨率做補償以達到所需的研磨厚度。本計畫將推導估計研磨率變化的數學模型以及利用估計研磨率來改變研磨時間達到製程所需的移除厚度。

針對具隨機漂移(drift)與位移(shift)特性的半導體製程，雙指數權重平均移動控制器(double exponential weight moving average controller, d-EWMA controller)[Guo 10]為一相當優異的控制器，其效能比已經證實比 EWMA 與 PCC 控制器更為優異。d-EWMA 控制器定義第(k-1)至 k 批次的漂移量為

$$p_{k-1} = \varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}. \quad (2)$$

並且透過以下遞迴式修正製程位移與漂移

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_{k|k} &= w_1 (y_k^m - y_0^m) + (1 - w_1) (\hat{\varepsilon}_{k-1|k-1} + \hat{p}_{k-1|k-1}) \\ &= w_1 \varepsilon_k^m + (1 - w_1) (\hat{\varepsilon}_{k-1|k-1} + \hat{p}_{k-1|k-1}) \end{aligned}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_{k|k} &= w_2 (y_k^m - y_0^m - \hat{\varepsilon}_{k-1|k-1}) + (1 - w_2) \hat{p}_{k-1|k-1}, \\ &= w_2 (\varepsilon_k^m - \hat{\varepsilon}_{k-1|k-1}) + (1 - w_2) \hat{p}_{k-1|k-1} \end{aligned}, \quad (4)$$

$$\hat{\varepsilon}_{k+1|k} = \hat{\varepsilon}_{k|k} + \hat{p}_{k|k}; \quad (5)$$

其中上標 m 代表量測值， y_k^m 代表第 k 批次研磨率量測值，上標 $\hat{\vphantom{y}}$ 代表估計值， $\hat{\varepsilon}_{k+1|k}$ 代表當第 k 批次量測值 ε_k^m 獲得時，(k+1) 批次誤差 ε_{k+1} 的估計值。第 (k+1) 批次研磨率的估計值可表示為

$$\hat{y}_{k+1|k} = y_0^m + \hat{\varepsilon}_{k+1|k}. \quad (6)$$

第 (k+1) 批次的研磨時間可利用以下公式計算：

$$\text{Process time [k+1]} = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}_{k+1|k}}. \quad (7)$$

d-EWMA 控制器對於 CMP 製程在單一機台生產單一產品已被證實為一有效的控制方法，但是，一般半導體廠考量到 CMP 機台價格昂貴，為了提高設備的使用率以降低生產成本，幾乎都採取混貨 (multi-product) 生產，亦即單一 CMP 機台對不同特性研磨層進行研磨，傳統 d-EWMA 控制器可能產生控制效能不足或控制失效。本計畫所分析的資料為某半導體廠 CMP 製程的製程資料，機台為應材 (Applied Materials) 所製造，機型為 Reflexion，研磨對象為 300mm 晶圓，研磨層材質為 PE-TEOS oxide。機台有 4 個晶圓承載具 (carrier)，同時有 3 個晶圓進行研磨，另一個承載具負責填充或移出晶圓。每一待研磨晶圓必須通過 3 個研磨平台進行研磨。研磨墊固定在研磨平台上，和晶圓承載具以相反方向旋轉。圖 6 為固定配方 (constant recipe) 即研磨液流量、壓力、晶圓承載具轉速和平台轉速等為固定值時磨研磨率變化的製程資料，橫軸為批次數，當更換研磨墊時即重新計數。觀察圖 6 可知隨著研磨墊的鈍化研磨率亦隨之下降，此外，不同的研磨層研磨率下降的速度亦不同。在更換研磨層時，研磨率會產生跳動。因此，傳統的 d-EWMA 控制器將混貨 CMP 製程視為單一製程並不合適。

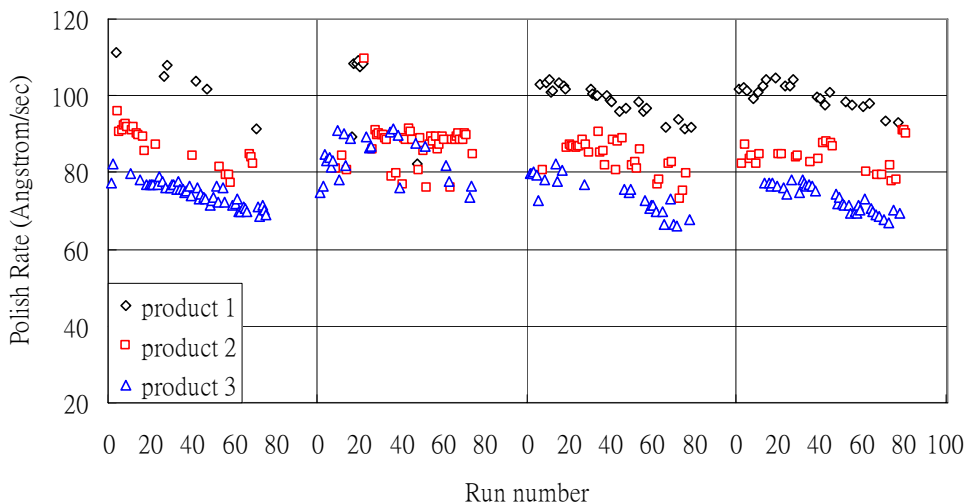


圖 1 研磨率批次變化的製程資料

為了將 d-EWMA 控制器應用在混貨 CMP 製程，可將各研磨層視為獨立製程，各研磨層分別用一個 d-EWMA 控制器來控制研磨時間，如在圖 6 例子中有 3 種研磨層必須使用 3 個控制器，在此稱之為獨立 d-EWMA 控制器 (independent d-EWMA controller)。如果有 n 種研磨層在同一 CMP 機台研磨，其製程模型可表示如下：

$$y_{i,k} = y_{i,0} + \varepsilon_{i,k}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中下標 i 表示第 i 個研磨層， k 表示第 i 個研磨層的批次數。當第 i 個研磨層的第 k 批次研磨率 ($y_{i,k}^m$) 量到時，獨立 d- EWMA 控制器的修正方程式可表示如下：

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_{i,k|k} &= w_1 (y_{i,k}^m - y_{i,0}^m) + (1 - w_1) (\hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1} + \hat{p}_{i,k-1|k-1}) \\ &= w_1 \varepsilon_{i,k}^m + (1 - w_1) (\hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1} + \hat{p}_{i,k-1|k-1}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9) \\ &= \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1} + \hat{p}_{i,k-1|k-1} + w_1 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1} - \hat{p}_{i,k-1|k-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_{i,k|k} &= w_2 (y_{i,k}^m - y_{i,0}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1}) + (1 - w_2) \hat{p}_{i,k-1|k-1} \\ &= w_2 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1}) + (1 - w_2) \hat{p}_{i,k-1|k-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10) \\ &= \hat{p}_{i,k-1|k-1} + w_2 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-1} - \hat{p}_{i,k-1|k-1}) \end{aligned}$$

第 $(k+1)$ 批次研磨率的估計值為

$$\hat{y}_{i,k+1|k} = y_{i,0}^m + \hat{\varepsilon}_{i,k+1|k} = y_{i,0}^m + \hat{\varepsilon}_{i,k|k} + \hat{p}_{i,k|k} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

第 i 個研磨層的第 $(k+1)$ 批次研磨時間 ($t_{i,k+1}$) 可利用下式計算

$$t_{i,k+1} = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}_{i,k+1|k}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

獨立 d- EWMA 控制器將單一機台各個研磨層的研磨過程視為獨立製程，利用多個 d- EWMA 控制器分別計算研磨時間以補償各研磨層研磨過程的變異。但是，如果機台的對製程的干擾存在時，獨立 d- EWMA 控制器存在一個重大缺陷。在 CMP 製程中，研磨墊的鈍化對研磨率的影響是持續進行著，而獨立 d- EWMA 控制器則將每一研磨層的製程視為獨立的且分別估計各層研磨率的變化來決定研磨時間，當從某一研磨層切換至另一種研磨層時，所估計的研磨率將產生重大的切換誤差，這種現象可從圖 6 觀察得知，若長時間未研磨某一層，當切換回那一層研磨時，研磨率將產生異常的落差。因此，獨立 d- EWMA 控制器對混貨 CMP 製程而言，並非良好的製程控制器。

觀察圖 6 發現使用同一研磨墊研磨不同的研磨層，研磨率的單位漂移量(斜率)會隨著不同的研磨層改變，這種現象應該是不同的研磨層材質會對研磨墊的產生不同的鈍化速率，亦即機台(研磨墊)與研磨層對研磨率的影響是相關的，這點將會影響獨立 d- EWMA 控制器應用至 CMP 製程的效能。因此，本計畫針對混貨 CMP 製程提出合作型 d- EWMA 控制器，假設 CMP 機台必須研磨 n 種產品，產品 i 的研磨率可表示為

$$y_k = y_{i,0} + \varepsilon_{i,k} \quad (13)$$

其中 $y_{i,0}$ 表示若使用新研磨墊研磨產品 i 時的初始研磨率， k 表示從換新研磨墊開始計算之批次數， $\varepsilon_{i,k}$ 表示第 k 批次(研磨產品 i) 研磨率與初始研磨率的誤差。當製程進行至第 k 批次時研磨率量測值 y_k^m 如果獲得，合作型 d- EWMA 控制器的修正方程式可表示為

$$\begin{aligned}
\hat{\varepsilon}_{i,k|k} &= w_1 (y_k^m - y_{i,0}^m) + (1-w_1)(\hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i} + \hat{p}_{i,k-1|k-n_i}) \\
&= w_1 \varepsilon_{i,k}^m + (1-w_1)(\hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i} + \hat{p}_{i,k-1|k-n_i}) \\
&= \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i} + \hat{p}_{i,k-1|k-n_i} + w_1 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i} - \hat{p}_{i,k-1|k-n_i})
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
\hat{p}_{i,k|k} &= w_2 (y_k^m - y_{i,0}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i}) + (1-w_2) \hat{p}_{i,k-1|k-n_i} \\
&= w_2 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i}) + (1-w_2) \hat{p}_{i,k-1|k-n_i} \\
&= \hat{p}_{i,k-1|k-n_i} + w_2 (\varepsilon_{i,k}^m - \hat{\varepsilon}_{i,k-1|k-n_i} - \hat{p}_{i,k-1|k-n_i})
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\hat{\varepsilon}_{j,k|k-n_j} = \hat{\varepsilon}_{j,k-1|k-n_j} + \hat{p}_{j,k-1|k-n_j} \quad \text{for } j=1, \dots, n. \quad j \neq i \tag{16}$$

$$\hat{p}_{j,k|k-n_j} = \hat{p}_{j,k-1|k-n_j} \quad \text{for } j=1, \dots, n. \quad j \neq i \tag{17}$$

其中 n_i 表示機台距上一次執行產品 i 的批次數， $\hat{p}_{i,k|k}$ 表示因研磨產品 i 所產生的研磨率單位漂移量。因在研磨製程中會對研磨墊產生持續的鈍化，對於未來研磨其他產品產生誤差的影響可由方程式(16)來降低切換產品造成的誤差。如果假設各產品的研磨率僅受到對應產品單位漂移量的影響，方程式(16)可修改為

$$\hat{\varepsilon}_{j,k|k-n_j} = \hat{\varepsilon}_{j,k-1|k-n_j} + \hat{p}_{j,k-1|k-n_j} \quad \text{for } j=1, \dots, n. \quad j \neq i \tag{18}$$

在此稱之為修正 d-EWMA 控制器。因此時量測值為第 i 種產品研磨率，其他產品的單位漂移量並不需做修正。如果 $(k+1)$ 批次為生產產品 j ，則估計研磨率為

$$\hat{y}_{k+1} = y_{j,0}^m + \hat{\varepsilon}_{j,k|k} + \hat{p}_{j,k|k} \quad \text{for } j=i \tag{19}$$

$$\hat{y}_{k+1} = y_{j,0}^m + \hat{\varepsilon}_{j,k|k-n_j} + \hat{p}_{j,k|k-n_j} \quad \text{for } j \neq i \tag{20}$$

第 $(k+1)$ 批次的研磨時間可利用下式求得：

$$\text{Process time } [k+1] = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}_{k+1}} \tag{21}$$

四、實驗驗證

在本節中，將把本計畫所介紹的各種控制器應用在混貨 CMP 製程來估計研磨率與比較其效能。在所有的例子，例如研磨液流速、壓力、晶圓載具轉速、研磨墊平台轉速等皆為定值。d-EWMA 控制器權重的選擇將會是影響估計值是否準確的關鍵，本計畫使用不同的權重估計第一個研磨墊的研磨率，獲得最小均方根誤差(RMSE)的最佳權重各控制器皆為 $w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.1$ ，RMSE 的定義如下

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [\text{Rate}_m[k] - \hat{\text{Rate}}[k]]^2}{n}} \tag{22}$$

CMP 製程資料是由力晶半導體公司所使用 Applied Materials 公司所生產的 Reflexion 機台所獲得，資料內容包括四個研磨墊的研磨率資料。所有產品的初始研磨率與單位飄移量皆利用第一個研磨墊的資料計算求得，如表 1 所示。接著利用四個研磨墊的資料（如圖一所示）來比較各控制器的控制效能。三種控制器所估計每一批次的研磨率與量測值如圖 2 至圖 5 所示，各控制器的均方根誤差與合作型控制器相對其他控制器的改善百分比如表 2 所示。由表 2 發現，合作型控制器較改良型控制器有相當大的改善比率，這顯示研磨墊的鈍化程度（研磨率的減少量）用機台研磨各種產品的單位漂移量的和來表示是合理的假設。因此，如果機台正在研磨產品 i ，但使用產品 j 的單位漂移量修正未來研磨產品 j 的研磨率誤差值（方程式 18）將造成很大的誤差。由結果顯示合作型控制器的控制效能亦較獨立型控制器優異。

Table 1 Initial polish rates and drifts of each product

	Polish rate ($\text{\AA}/s$)	Drift ($\text{\AA}/s \cdot \text{run}$)
Product 1	101.69	-0.28
Product 2	95.23	-0.18
Product 3	84.12	-0.12

Table 2 Root mean square errors (RMSEs) of the estimated polish rates for the independent d-EWMA, modified d-EWMA, and multi-product d-EWMA controllers

RMSE($\text{\AA}/s$) ²	Pad 1	Pad 2	Pad 3	Pad 4
Independent d-EWMA	2.7616	10.4969	3.5532	2.9647
modified d-EWMA	4.0122	12.2533	4.6037	3.2091
Multi-product d-EWMA	2.5483	10.3644	3.4022	2.6232
Improvement (%) over independent d-EWMA	8.37	1.27	4.43	13.01
Improvement (%) over modified d-EWMA	57.50	18.22	51.32	22.33

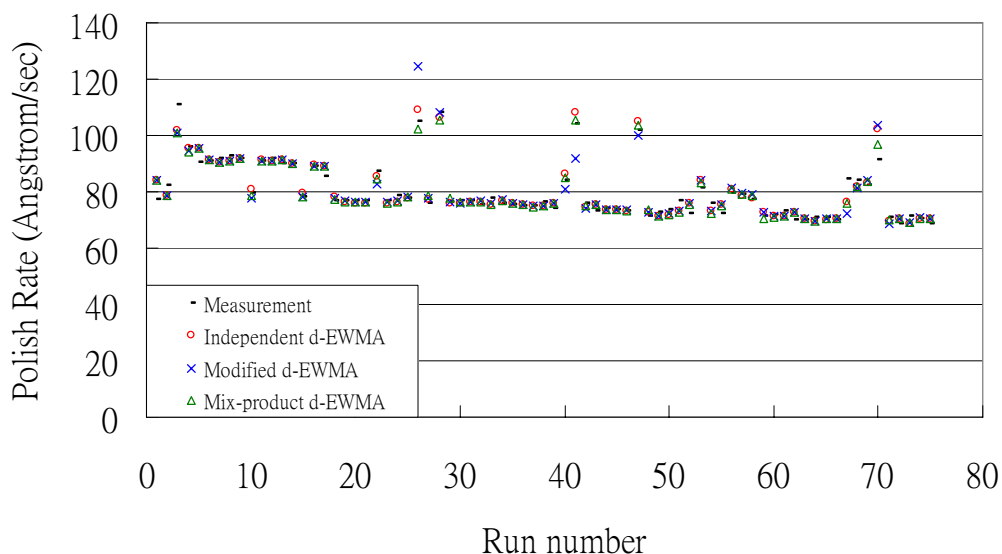


Fig. 2. Estimated polish rates with history data for pad 1.

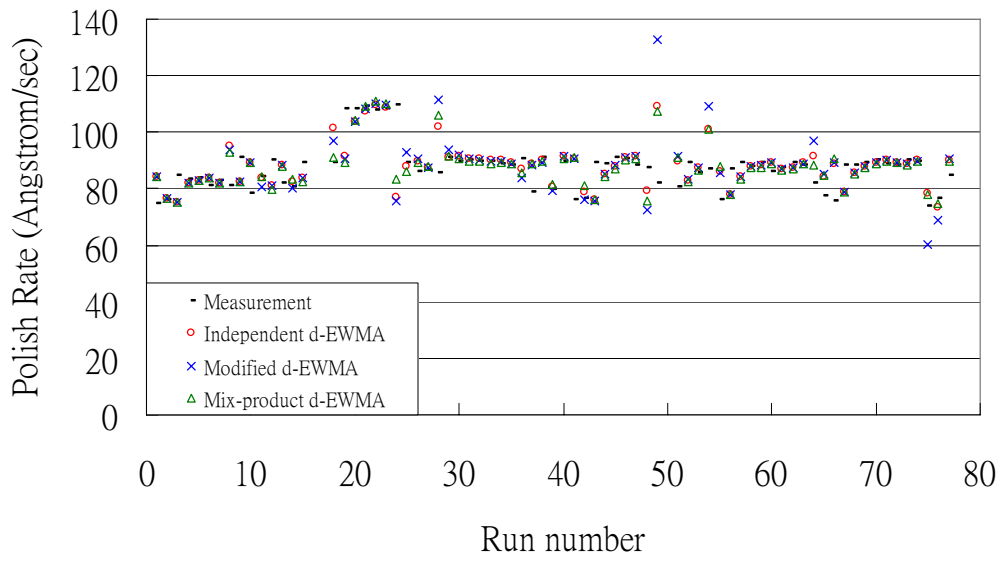


Fig. 3. Estimated polish rates with history data for pad 2.

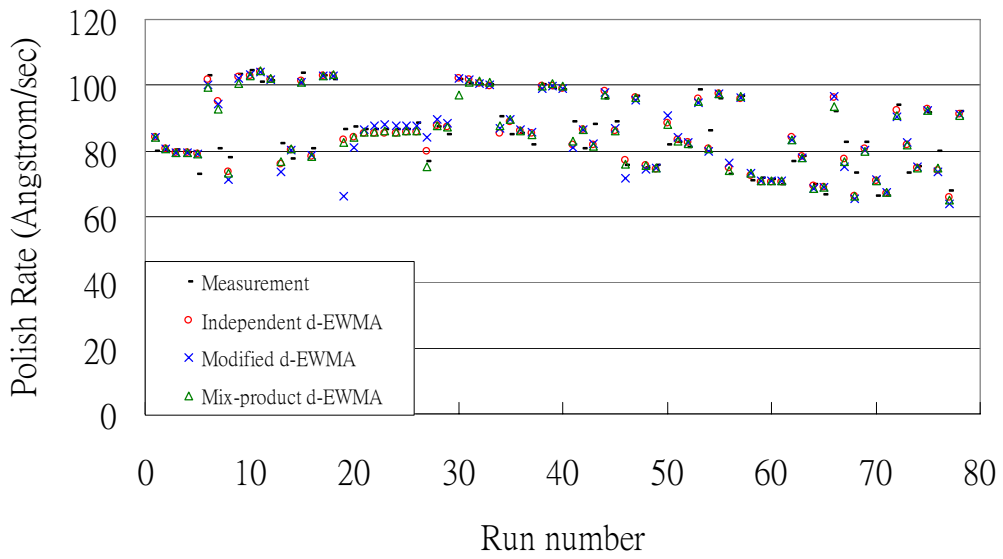


Fig. 4. Estimated polish rates with history data for pad 3.

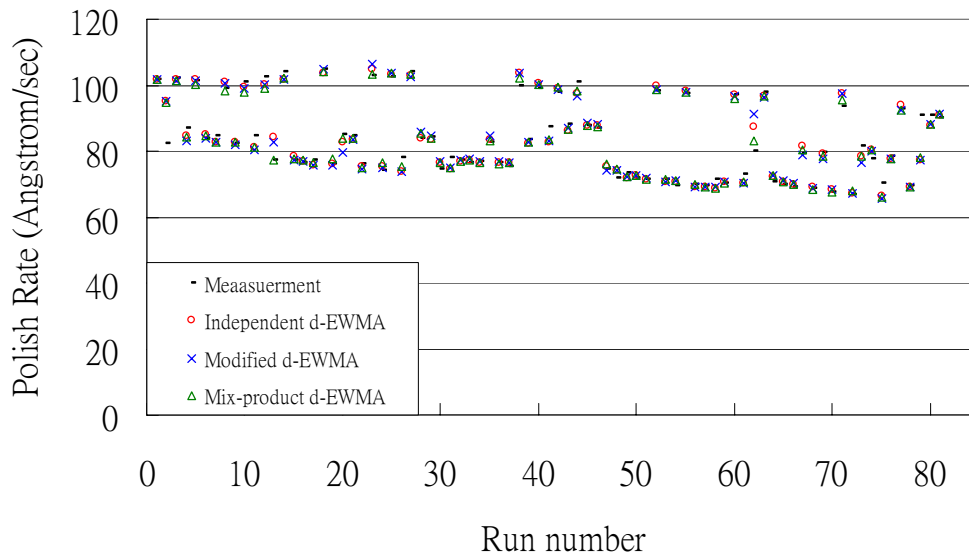


Fig. 5. Estimated polish rates with history data for pad 4.

五、結論

本計畫針對混貨 CMP 製程提出新的批次控制器（合作型 d-EWMA 控制器），實驗結果顯示其控制效能優於其他兩種用於單一產品的控制器，合作型 d-EWMA 控制器擁有分享研磨墊鈍化造成研磨率降低的資訊的能力，因此能有效降低切換產品時所造成的研磨率估計誤差，合作型 d-EWMA 控制器分別較改良型 d-EWMA 和獨立型 d-EWMA 控制器約改善 37% 和 7% 的估計誤差。

六、參考文獻

- [1] J. F. MacGregor, 1988, "On-line Statistical Process Control," Chemical Engineering Process, 84, pp. 21-31.
- [2] G. E. Box and T. Kramer, 1992, "Statistical Process Control and Feedback Adjustment-A Discussion," Technometrics, 34(3), pp. 251-267.
- [3] G. E. Box and M. Jenkins, 1976, Time Series Analysis-Forecasting and Control, Oakland, CA: Holden-Day.
- [4] W. T. Tuckers and F. W. Faltin, 1991, "Algorithmic Statistical Process Control: An Elaboration," Technometrics, 35(4), pp. 363-389.
- [5] S. Vander Wiel, W. T. Tucker, F. W. Faltin, and N. Doganaksoy, 1992, "Algorithmic Statistical Process Control: Concepts and an Application," Technometrics, 34(3), pp. 268-297.
- [6] R. L. Guldi, C. D. Jenkins, G. M. Damming, T. A. Baum, and T. A. Foster, 1989, "Process Optimization Tweaking Tool (POTT) and its Application in Controlling Oxidation Thickness," IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, 2, pp. 54-59.
- [7] E. Sachs, R. Guo, S Ha, and A. Hu, 1991, "Process Control System for VLSI Fabrication," IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, 4(2), pp. 134-143.
- [8] R. Guo and E Sachs, 1993, "Modeling, Optimization and Control of Spatial Uniformity in Manufacturing Processes," IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, 6(1), pp. 41-47.
- [9] A. Ingolfsson and E. Sachs, 1993, "Stability and Sensitivity of an EWMA Controller," Journal of Quality Technology, 25(4), pp. 271-287.
- [10] D. Boning, W. Moyne, T. Smith, J. Moyne, A. Hurwitz, S. Shellman, J. Moyne, R. Trefeyan, and J. Taylor, 1996, "Run by Run Process Control of Chemical-Mechanical Polishing ," IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing

Technology-part C, 19(4), pp. 307-313.

- [11] E. Sachs, A. Hu, and A. Ingolfsson, 1995, "Run by Run Process Control; Combining SPC and Feedback Control," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 8(1), pp. 26-43.
- [12] D. Boning, W. Moyne, T. Smith, J. Moyne, and A. Hurwitz, 1995, "Practical Issues in Run by Run Process Control," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 201-208.
- [13] T. Smith and D. Boning, 1997, "A Self-Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, pp. 121-132.
- [14] C. Spanos and S. Leang, 1992 "Statistically Based Feedback Control of Photoresist Application," *International Electronics Manufacturing Symposium*, pp. 185-190.
- [15] S. Leang, S. Ma, J. Thomson, B. J. Bombay, and C. Spanos, 1996, "A Control for Photolithographic Sequences," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 9(2), pp. 191-206.
- [16] J. Moyne, H. L. McAfee, and Jr., 1996, "A Generic Cell Controller for the Automated VLSI Manufacturing Facility," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 5(2), pp. 77-87.
- [17] J. Moyne, H. Etemed, and M. Elta, 1994, "A Run-to-Run Framework for VLSI Manufacturing," *Proc. Microelectronics Process Sensors and Controls, SPIE*, 2091, pp. 379-390.
- [18] R. Telfeyan, J. Moyne, A. Hurwitz, and J. Taylor, 1995, "Demonstration of a Process-Independent Run-to-Run Controller," 187th Meeting of the Electrochemical Society.
- [19] J. Moyne, R. Telfeyan, A. Hurwitz, and J. Taylor, 1995, "A Process-Independent Run-to-Run Controller and its Application to Chemical-Mechanical Planarization," *SEMI/IEEE Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, pp. 1787-1791.
- [20] J. Moyne, N. Chaudhry, and R. Telfeyan, 1995, "Multi-Branch Run-to-Run Controller for Plasma Etching," *Journal of Vacuum Science and Technology*, pp. 1-12.
- [21] P. Mozumder and G. G. Barna, 1994, "Statistical Feedback Control of a Plasma Etch Process," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 7(1), pp. 1-44.
- [22] S. Bulter and J. Stefani, 1994, "Supervisory Run-to-Run Control of Polysilicon Gate Etch Using In Situ Ellipsonmetry," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 7(2), pp. 193-201.
- [23] M. Sullivan, S. Butler, J. Hirsch, C. Wang, 1994, "A Control to Target Architecture for Process Control," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 7(2), pp. 134-148.
- [24] P. Mozumder, S. Saxena, and D. Collins, 1994, "A Monitor Wafer Based Controller for Semiconductor Processes," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 7(3), pp. 400-411.
- [25] J. Stefani, S. Poarch, S. Saxena, and P. Mozumder, 1996, "Advanced Process Control of a CVD Tungsten Reactor," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 9(3), pp. 366-382.
- [26] L. Sattler and P.E. Hecher, 1998, "Reducing Cost and Increasing Throughput Using Model-Based Process Control on Sputtering System," *IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, Austin, USA*, pp. 409-414.
- [27] R.S. Kou, A. Chen, and J.J. Chen, 2000, "Run-to-Run Control Schemes for CMP Process subject to Deterministic Drifts," *Semiconductor Manufacturing Technology Workshop, Hsinchu, Taiwan, ROC*, pp. 251-258.
- [28] S.T. Tseng, W. Song, and Y.C. Chang, 2005, "An Initial Intercept Iteratively Adjust (IIIA) Controller: an Enhanced Double EWMA Feedback Control Scheme," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing* 18, pp. 448-457.
- [29] A. Chen, R. Guo, Y. L. Chou, C. L. Lin, J. Dun, and S. A. Wu, 1999, "Run-to Run Control of CMP Process Considering Aging Effects of Pad and Disc," *International Symposium on*

- Semiconductor Manufacturing, pp. 229-232.
- [30] J.H. Chen, T.C. Chen, and T.W. Kuo, 2006, "Advanced Process Control of Metal Sputter Deposition Using Time Series Analysis," *Chung Hua Journal of Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 63-68. (NSC-94-2212-E-216-003).
 - [31] J.H. Chen, T.W. Kou, and A.C. Lee, 2007, "Run by Run Process Control of Metal Sputter Deposition: Combining Time Series and Extended Kaman Filter," *IEEE Semiconductor Manufacturing*, 20(3), pp. 278-285.
 - [32] S.T. Tseng, R.J. Chou, and S.P. Lee, 2002, "A Study on a Multivariate EWMA Controller," *IIE Transaction* 34, pp. 541-549.
 - [33] E. Del Castillo and R. Rajagopal, 2002, "A Multivariate Double EWMA Process Adjustment Scheme for Drifting Process," *IIE Transaction* 34, pp. 1055-1068.
 - [34] L. Yang and S.H. Sheu, 2006, "Integrating Multivariate Engineering Process Control and Multivariate Statistical Control," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29, 129-136.
 - [35] G.J. Wang and C.H. Wu, 2006, "Developing a Neural Network-based Run-to-Run Process Controller for Chemical-Mechanical Planarization," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28, pp. 899-908.
 - [36] C.F. Wu, C.M. Hung, J.H. Chen. and A.C. Lee, 2008, "Advanced Process Control of the Critical Dimension in Photolithography," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 9(1), pp. 12-18.
 - [37] J.H. Chen, L.J. Sheu, W.C. Chen, H.K. Chen, and C.T. Chen, 2008, "Application of Advanced Process Control in Plastic Injection Molding," *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Beijing, China.(NSC-94-2262-E-216-014-CC3)
 - [38] C.H. Sun, J.H. Chen, and L.J. Sheu, 2008, "A Quality Control of the Injection Molding Process Using EWMA Predictor and Minimum-Variance Controller," *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Beijing, China. (NSC 95-2622- E-216-013-CC3)
 - [39] Y. Zhen, Q.H. Lin, D.S.H. Wang, S.S. Jang, and K. Hui, 2006, "Stability and Performance Analysis of Mixed Product Run-to-Run Control," *Journal of Process Control* 16, pp. 431-4.
 - [40] S.K. Firth, W.J. Compbell, A. Trprac, and T.F. Edgar, 2006, "Just-in-Time Adaptive Disturbance Estimation for Run-to-Run Control of Semiconductor Processes," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing* 19(3), pp. 298-315.
 - [41] M.D. Ma, C.C. Chang, D.S.H. Wang, and S.S. Jang, 2009, "Identification of Tool and Product Effect in a Mixed Product and Parallel Tool Enviroment," *Journal of Process Control*, 19, P591-603.
 - [42] M.D. Ma, C.C. Chang, S.S. Jang, and D.S.H. Wang, 2009, "Mixed Product Run-to-Run Process Control- An ANOVA Model with ARIMA Disturbance Approach," *Journal of Process Control*, 19, P604-614.
 - [43] B. Ai, Y. Zheng, S.S. Jang, Y. Wang, L. Ye, and C. Zhou, 2009, "The Optimal Drift-Compensatory and Fault Tolerant Approach for Mix-Product Run-to-Run Control," *Journal of Process Control*, 19, P1401-1412.
 - [44] R.S. Guo, A. Chen, J.J. Chen, 2000, "Run-To-Run Control Schemes For CMP Process Subject to Deterministic Drifts," *Semiconductor Manufacturing Technology Workshop*, Hsinchu, Taiwan, ROC, pp 251-258.

七、計畫成果自評

本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展 cooperative d-EWMA 控制器應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能。實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨半導體製程控制。計畫成果正在撰寫成會議論文形式，預計發表在國際學術會議。

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利：已獲得 申請中 無

技轉：已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展 cooperative d-EWMA 控制器應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能。實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨笨導體製程控制。

無衍生研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：陳俊宏		計畫編號：98-2221-E-216-019-				計畫名稱：應用先進製程控制於混貨化學機械研磨製程	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	1	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	1	1	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展 cooperative d-EWMA 控制器應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能。實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨笨導體製程控制。計畫成果正在撰寫成會議論文形式，預計發表在國際學術會議。</p>
--	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。此外，本計畫亦將獨立雙指數平移控制器(independent d-EWMA controller)、改良 d-EWMA 控制器(modified d-EWMA controller)以及本計畫所發展 cooperative d-EWMA 控制器應用在實際混貨化學機械研磨製程來預測研磨率以及比較其控制效能。實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨笨導體製程控制。計畫成果正在撰寫成會議論文形式，預計發表在國際學術會議。