

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

半導體微影覆蓋誤差先進製程批次控制開發研究(2/2)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC97-2221-E-009-070-MY2

執行期間：97年8月1日至99年10月31日

計畫主持人：李安謙 教授

共同主持人：

計畫參與人員：郭子璋、林書楷、孫建偉

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、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

執行單位：國立交通大學機械工程學系

中 華 民 國 99 年 10 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

半導體微影覆蓋誤差先進製程批次控制開發研究(2/2)

Advanced Process Control: Run-to-Run Control of Lithography Overlay Process in Semiconductor Manufacturing (2/2)

計畫編號：NSC97-2221-E-009-070-MY2

執行期限：97年8月1日至99年10月31日

主持人：李安謙 交通大學機械系

Email: aclee@mail.nctu.edu.tw

共同主持人：

研究人員：郭子瑋、林書楷、孫建偉

一、中文摘要

本計畫為兩年期計畫，整個計畫目標在完成半導體微影覆蓋誤差先進製程批次控制開發研究。其發展內容包含：黃光微影製程(Lithography Overlay Process)之批次控制(Run-to-Run Control)控制器開發，第一年研究首先將針對微影製程情況為：單一機台、單一產品以及單一製程(Layer)之製程干擾開發一套適應性干擾觀測器(Adaptive Disturbance Observer)並上機實驗驗證；此外，在第二年擬對於黃光微影混貨(Mixed Product)製程(多部機台、多樣產品及多道製程)，延伸第一年計畫所開發之製程控制理論與方法，建構一套以機台為基底之適應性干擾估測器(Tool-based Adaptive Disturbance Estimation, TBADE)，並且於半導體廠內實作及驗證。應用本計畫所開發之成果，將預期達成減少人力資源浪費、降低重工率、減少晶圓在製造過程中的損壞，進而提高產品良率、增加產量以及技術之提升。

在第二年計畫中，將分析混貨製程特性及現場製程型態，針對微影混貨製程特性，並延續及擴充第一年計畫所建構完成之控制理論與機制，建構一機台為基底之混貨製程干擾估測器。此外，此製程控制器將會與其他混貨製程控制器比較其效能，最後上機實驗驗證。

關鍵詞：先進製程控制、批次控制、覆蓋誤差、微影、適應性干擾估測器、混貨、TBADE

Abstract

This is a two-year project. The aim of the whole project is to develop an Advanced Process Control (APC): Run-to-Run (RtR) Control of Lithography Overlay process in semiconductor manufacturing. The content involves the following subjects: Run-to-Run process control using adaptive disturbance observer for one tool, one product and one layer in lithography overlay processes for the first year, and the Tool-based Adaptive Disturbance Estimation (TBADE) for lithography overlay control process for mixed product, multiple tools, products and layers for the second year. All of these research results will be implemented and verified in the semiconductor fabrication company. By applying the results of this project, we expect that the human resources, the rework rate and the damage of wafers during processing can be reduced, and meantime the product yield, throughput and the productive techniques can be improved.

In the second year, we will establish an RtR mixed product process control for lithography overlay processes. First of all, the historical data of overlay mixed product process will be analyzed. According to obtained results, the TBADE method will be construed by extending the theory developed in the first year. Besides, the TBADE method will be compared with other methods for mixed product by simulation study, and then it will be implemented and verified in real process, finally.

Keywords: Advance Process Control, Run-to-Run, Lithography Overlay, Adaptive Disturbance Observer, Mixed Product, TBADE

二、計畫緣由及目的

科技不斷地進步，各種電子產品亦朝向輕薄短小、多功能的方向持續發展。因此，導致半導體製程的複雜度不斷增加，製程控制也愈趨困難。在半導體製程中，有幾百個製程步驟的情況下，穩定的製程就顯得格外重要。而良率的提升，不但可以減少檢測成本，及重工、修復等不必要成本，更重要的是品質的提升，增加了產品形象及競爭優勢。所以，當半導體的市場愈形激烈時，如何改善製程的品質，以提高晶圓的良率，已成為晶圓廠最重要的課題之一，而製程控制技術即提昇品質的關鍵因素之一。

先進製程控制(Advanced Process Control, APC)結合了統計製程管制與回饋控制(Feedback control)，如圖 1 所示，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，因此先進製程控制是未來製程控制的發展趨勢。

對所有半導體製程而言，微影製程的技術是決定晶片線寬尺寸是否能持續縮小最重要的關鍵之一，而微影製程的穩定性亦是相對的重要。因此本計畫主要目的是設計一套適用於微影製程之覆蓋誤差(Overlay Error)的先進製程控制方法，藉以改善並增進微影製程之穩定性，更可進一步提供下一世代之微影製程的控制基礎。

三、研究方法

半導體的製程可區分為前製程作業、晶圓片長成、前段製程及後段製程[1-2] 而微影製程步驟如圖 2 所示。在製程步驟中，顯影後檢視(After Develop Inspection, ADI)，此品管步驟的目的是用來確保微影製程的正確性，使任何異常都能在進行下一站的製程前被發覺，而藉著重工(rework)來補救，以避免整片或整批的晶片報廢。對微影製程而言，最主要的兩個 ADI 項目如下：

1. 覆蓋誤差(Overlay)：

其測量方法是每次曝光中在晶圓切割道上做兩種覆蓋標記符號 "■" 與 "□"，分別與前一次層留下的記號重合成為"■" (Box-In-Box) 的樣式，再以影像處理技術測量兩個標記的位移量(圖 3)，通常在每個曝光場內放置四組覆蓋標記符號，而量測記號的偏移量需要花費相當的時間，

因此雖然每個曝光場都有誤差記號，為了不讓測量機台成為產能的瓶頸，通常一片晶圓只選取五個曝光場作覆蓋誤差的測量，Overlay 機台的測量步驟是先以晶圓全域對準記號及區域對準記號定出整片晶圓的座標，再依照所選取要測量的曝光場找出覆蓋標記位置並量測符號間 x-y 方向之位移量，最後便可得到二十個點的位移數據，作為覆蓋誤差分析的依據。

2. 關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)：

即是由光罩所轉移至晶圓上的圖案之線寬。其量測的方式是使用電子顯微鏡(CDSEM)來進行量測。由工程師的經驗，影響 CD 值之精確度最大的兩個因素為：曝光能量(Exposure Dose)與聚焦(Focus)，因此，以此二個參數做為輸入變數來對關鍵尺寸作控制。

■ 覆蓋誤差之成因

覆蓋誤差可能來自光罩、晶圓、步進機本身以及系統環境所造成的誤差(表 1)，以光罩而言會因為其圖案變形，或是比例不正確而產生誤差。晶圓因為前熱製程或是光阻塗佈的不均勻，導致晶圓表面不平整，致使圖案轉移扭曲失真，這種因為晶圓變形或不平整的影響，而產生的覆蓋誤差程度將隨著晶圓尺寸的放大而提高。機台本身則可能因為投影透鏡失真、晶圓平台傾斜、晶圓或光罩夾具鬆動使晶圓或光罩產生位移誤差，以及定位與對準系統精度等問題而產生誤差。此外，曝光機所在之作業環境因為溫度與震動的關係也會導致曝光機產生誤差。

■ 覆蓋誤差之影響

覆蓋誤差產生的效應，包括平移、旋轉、擴張等形式(圖 4)，而誤差的各種形式對曝光位置的偏移會造成不同的影響(圖 5)；微影製程必須針對每片晶圓覆蓋誤差的歷史資料作追蹤與修正，避免持續偏向性的覆蓋誤差，使晶片產生電性不良或結構脆弱等問題。

■ 覆蓋誤差模型

在建立模型時將誤差產生原因分為兩個部份，一個是表示晶圓整體誤差(Interfield, wafer term)，另一個則表示單一曝光場誤差(Intrafield, field term)，前者是在探討光罩與晶圓之間的定位誤差，後者則探討光源透鏡與光罩間所產生的誤差。

Interfield 的誤差來自校準誤差和晶圓機座

定位之誤差，其數學誤差模式[3]如下：

$$d_{wX} = T_{wX} + M_{wX}X - R_{wX}Y + B_{wX}Y^2 \quad (1)$$

$$d_{wY} = T_{wY} + M_{wY}Y + R_{wY}X + B_{wY}X^2 \quad (2)$$

上式 X、Y 代表曝光場在晶圓座標系統的位置，下標 wX 、 wY 分別表示 Interfield 的誤差源、該誤差源對 X 方向與 Y 方向所造成的影響； d_{wX} 、 d_{wY} 則表示在 X 方向及 Y 方向所造成的覆蓋誤差， T_{wX} 、 T_{wY} 代表晶圓平台的偏移(Translation)係數，由晶圓平台的移動所造成， R_{wX} 、 R_{wY} 為晶圓的旋轉(Rotation)係數，由晶圓平台的轉動所造成， M_{wX} 、 M_{wY} 為晶圓的擴張(magnification)係數，由晶圓平台高度定位誤差所造成， B_{wX} 、 B_{wY} 為晶圓的彎曲(Bow)係數，由於晶圓平台的不平整所造成。

Intrafield 的誤差來自光源透鏡與光罩，其數學誤差模式[3]如下：

$$d_{fx} = T_{fx} + M_{fx}x - R_{fx}y - T_{xx}x^2 - T_{yx}xy + W_{fx}y^2 + D_{3x}x(x^2 + y^2) + D_{5x}x(x^2 + y^2)^2 \quad (3)$$

$$d_{fy} = T_{fy} + M_{fy}y + R_{fy}x - T_{yy}y^2 - T_{xy}xy + W_{fy}x^2 + D_{3y}y(x^2 + y^2) + D_{5y}y(x^2 + y^2)^2 \quad (4)$$

上式中 x、y 代表曝光影像場的位置，即 Intrafield 的座標系統，下標 fx 、 fy 分別表示 Intrafield 的誤差源、該誤差源對 x 方向與 y 方向的影響； d_{fx} 、 d_{fy} 分別表示在 x 方向及 y 方向所造成的總覆蓋誤差， T_{fx} 、 T_{fy} 代表曝光影像場的偏移(Translation)係數，由光罩平台的精確度所造成， R_{fx} 、 R_{fy} 為曝光影像場的旋轉(Rotation)係數，由光罩的旋轉所造成， M_{fx} 、 M_{fy} 為曝光影像場的放大(Magnification)係數，由光罩與鏡片間的距離所造成， T_{xx} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 為光罩的傾斜(Trapezoid)係數，由光罩平面未垂直投影所造成， W_{fx} 、 W_{fy} 為楔形(Wedge)失真係數，由光學透鏡中心的偏差所造成， D_{3x} 、 D_{5x} 、 D_{3y} 、 D_{5y} 為透鏡變形(Distortion)係數，為濾鏡設計對稱性的轉動所造成。而 Intrafield 與 Interfield 的總和為總覆蓋誤差：

$$d_{X+x} = T_{wx} + T_{fx} + M_{wx}X - R_{wx}Y + B_{wx}Y^2 + M_{fx}x - R_{fx}y - T_{xx}x^2 - T_{yx}xy + W_{fx}y^2 + D_{3x}x(x^2 + y^2) + D_{5x}x(x^2 + y^2)^2 \quad (5)$$

$$d_{Y+y} = T_{wy} + T_{fy} + M_{wy}Y + R_{wy}X + B_{wy}X^2 + M_{fy}y + R_{fy}x - T_{xy}xy - T_{yy}y^2 + W_{fy}x^2 + D_{3y}y(x^2 + y^2) + D_{5y}y(x^2 + y^2)^2 \quad (6)$$

其中 d_{X+x} 、 d_{Y+y} 為 X 方向及 Y 方向的總覆蓋誤差。然而，一般的曝光機台對於微影覆蓋誤差的補償能力是有限制的，以目前機台的補償及對準系統能力，即使我們能夠很精確的估測出(5)(6)式中所有模型參數，但是機台卻無法讓我們輸入全部的模型參數來做覆蓋誤差的補償；現今微影曝光機台都只能夠補償偏移、放大及旋轉的影響，也就是只考慮一階的模型參數，因此將(5)、(6)式作修正為只建立在補償偏移、放大及旋轉的影響下的覆蓋誤差模型(7)、(8)式。

$$d_{X+x} = T_{wX} + M_{wX}X - R_{wX}Y + M_{fx}x - R_{fx}y \quad (7)$$

$$d_{Y+y} = T_{wY} + M_{wY}Y + R_{wY}X + M_{fy}y + R_{fy}x \quad (8)$$

曝光機台設備廠商 Canon 將(7)、(8)式參數改寫成以下的 Simple model：

$$d_{X+x} = A_1 + A_3X - A_5Y + X_7x - X_8y \quad (9)$$

$$d_{Y+y} = A_2 + A_4Y + B_5X + Y_7y + Y_8x \quad (10)$$

其中 $A_1 = T_{wX}$ 、 $A_2 = T_{wY}$ 、 $A_3 = M_{wX}$ 、 $A_4 = M_{wY}$ 、 $A_5 = R_{wX}$ 、 $B_5 = R_{wY}$ 、 $X_7 = M_{fx}$ 、 $Y_7 = M_{fy}$ 、 $X_8 = R_{fx}$ 、 $Y_8 = R_{fy}$

除了以上這些一階誤差參數之外，還有許多誤差原因可能產生，例如晶圓彎曲、環境震動等，此類覆蓋誤差必須持續追蹤晶圓並做適當修正，以維持該晶圓後續製程上設計圖案的轉移品質。而針對持續或超出容忍度的偏移、旋轉、擴張與縮小等誤差，則是必須對機台作調整，以維持機台本身對準與定位上的精確度，確保後續在該機台曝光的晶圓都能有良好的圖形轉移。

■ 半導體廠微影製程 APC 現況

目前半導體廠的黃光 APC 系統架構如下圖 6，由製程機台曝光，量測產品資料後，將量測值經過線上製程機台控制系統(Online Tool Control System, TCS)，傳送給總管生產的 Siview System

[IBM 所提供的製程管理系統，亦稱 Manufacturing Management(MM) System]，傳送給 Mitsubishi 的 APC system。此時 APC System 會研判上傳之數據是否正確，例如：超出製程規範(Not Good, NG)，未收到製程資料(NA Response)等等之情況。若是正確之製程資料，數據會傳送給 Process Controller 模組，計算出最佳參數後再回傳給 APC System 做格式轉換，再經由透過 Siview System 和 TCS 回傳給製程機台以調變製程參數。若是製程資料有問題，則通知 Siview System 以及 TCS 將問題機台停機並通知人員處理。

目前廠內所使用的微影曝光機台為 Nikon 公司的 SF120 型 Stepper 以及 Canon 公司的 ES4、ES6 型 Scanner。而製程 APC 系統中，目前最佳參數計算如下：

令第 k 次輸入的參數為 r ，而量測後的輸出值為 m ，使

$$r_k - m_k = b_k \quad (11)$$

其中 b_k 稱為最佳補值(baseline)，表示欲使第 k 次的量測值為零，此次的輸入值須為 b_k 。而新一次的輸入值 r_{k+1} 則為最近的前三筆最佳補值平均值：

$$r_{k+1} = \frac{b_{k-2} + b_{k-1} + b_k}{3} \quad (12)$$

在微影設備的 PM (preventive maintenance) 方面，根據項目的重要性，而有不同的保養週期，按照其週期的不同，又分為周保(W)、月保(M)、季保(S)、半年(H)保及年保(Y)，其中與微影 Overlay 有關的保養主要項目與目的如下：

(1) Pre-Alignment: 目的在確保晶圓在各 Hand 與 Stage 間傳遞時，刻痕 (Notch) 相對於機台的方向，以修正 Overlay 參數 Wafer Term 的誤差。

(2) N-Stepping: 以 Shot 重疊曝光的方式，確認機台在 X 與 Y 方向步進的準確性，以修正 Reticle Rotation 及 Skew 高階非線性誤差的發生。

(3) Synchronization: 以 Interferometer 定位 Wafer Stage 的位置，將其位置回饋給 Reticle Stage 以偵測其 Moving Average 的誤差量，並加以控制修正，防止 Overlay 高階誤差 Distortion 的發生。

(4) Overlay Matching: 利用力晶校正用的標準晶圓(Holy Wafer)，進行 Matching，以減少因機台差異造成的製程異常偏離。

(5) Lens Matching: 監控因光學系統所造成的 Overlay 高階非線性誤差，經由殘差分析，來判斷是否需要因高階非線性誤差過大而調整 Lens。

■ 微影混貨歷史製程資料分析

從觀察歷史資料，亦可看出以下現象：就一台機台期間所有產品而言，每種產品的 Baseline (輸入值減去輸出值) 皆有其本身的特性，因此將 Baseline 視為一重要狀態，圖 7 擷取自半導體廠某曝光機台連續 140 天產品 A 及產品 B 其 A1 參數之 Baseline，其歷史資料是以生產時間排序，故由圖 7 顯示出該機台混貨情況。圖 8 為該機台其中 1 種產品的 Baseline，以長期觀察而言，可以觀察出該產品及曝光層之組合有漂移趨勢的存在；而圖 9 為圖 7 前 200 筆所有產品狀態的改變，以短期機台的行為可看出狀態近似乎穩。在圖中資料不連續部分為該機台生產其他產品，故沒有在圖上顯現。另外對不同產品、不同曝光層的歷史資料觀察，圖 10 為從圖 7 中，挑選出 2 種產品、2 種曝光層組合出 4 組 Baseline 的歷史資料，由圖 10 顯現出同曝光層不同產品的製程特性較同產品不同曝光層的製程特性為相近，也可以說曝光層的變異較產品為大。

圖 11、圖 12 為編號 PK055 機台於混貨中，連續 run 貨一段時間後，將機台生產的 thread 依照時間排列，只留下單一 thread 最佳補值 (PK055、F9B、3B)，圖 11 約兩個月(短期)、圖 12 約六個月(長期)；橫軸為 run 的批次，縱軸為參數單位 ppm，由這兩個圖顯現出，機台干擾於短時間內似乎無漂移現象(圖 11)，然而就長期來看，漂移趨勢則會非常的明顯(圖 12)，而這漂移趨勢，會造成產品停 run 後隔一段時間後批次時，因漂移趨勢造成干擾估計錯誤而 NG。故依據製程歷史資料及黃光微影製程特性，假設 SISO 製程中輸出 m 與輸入 r 有以下的關係

$$m_k = ar_k + b_{tot,k} \quad (13)$$

其中 $b_{tot,k}$ 代表每個批次下干擾來源的組合，其來源分為兩部分，第一部分為機台漂移(drift)干擾，第二部份則為不同產品造成的偏移(offset)干擾，在此假設下，可將干擾來源假設為機台漂移干擾 (b_{tool}) 與產品偏移干擾 (b_{thread})，則 $b_{tot,k}$ 可表示成

$$b_{tot,k} = b_{tool,k} + b_{thread,k} \quad (14)$$

從公式(14)，由於干擾來源為漂移干擾與偏移干

擾，因此對於每個批次的干擾，都可以拆為兩個干擾來源所貢獻；因此我們能由估計某批次曝光機台與曝光產品所貢獻的干擾 $\hat{b}_{tool,k}$ 、 $\hat{b}_{thread,k}$ 估

計此批次的總干擾 $\hat{b}_{tot,k}$

$$\hat{b}_{tot,k} = \hat{b}_{tool,k} + \hat{b}_{thread,k} \quad (15)$$

若以圖 13 為 TBADE 取樣機制，則有一個機台，兩個產品，九個曝光層，因此有 18 個 thread；以矩陣 $\hat{\mathbf{b}}_{th,k}$ 代表產品造成的偏移干擾之集合

$$\hat{\mathbf{b}}_{th,k} = \begin{bmatrix} b_{thread(1),k} & b_{thread(2),k} & \cdots & b_{thread(18),k} \end{bmatrix}_{10 \times 18} \quad (16)$$

並以觀察矩陣 \mathbf{X}_k 代表偏移干擾的組合

$$\mathbf{X}_k^T = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]_{1 \times 18} \quad (17)$$

則可將公式(15)改寫成以下形式以求出所有產品 offset 的值

$$\hat{\mathbf{b}}_{th,k} \mathbf{X}_k = b_{tot,k} - \hat{b}_{tool,k} \quad (18)$$

其中 \mathbf{X}_k 為 0 與 1 的組合，1 的位置代表此次製程的產品，以公式(17)來說，則此次曝光為 $\hat{b}_{thread1,k}$

於每個批次之後，仍需更新 $\hat{b}_{tool,k}$ 與 $\hat{b}_{th,k}$ 的值，我們分別用公式(19)、公式(20)估計新批次偏移干擾 $\hat{b}_{th,k+1}$ 與漂移干擾 $\hat{b}_{tool,k+1}$

$$\hat{\mathbf{b}}_{th,k+1} = (\hat{\mathbf{b}}_{th,k} + \hat{b}_{tool,k} \mathbf{X}_k^T) \quad (19)$$

$$+ \lambda_1 (b_{tot,k} - \hat{b}_{tool,k} - \hat{\mathbf{b}}_{th,k} \mathbf{X}_k^T) \mathbf{X}_k^T$$

$$\hat{b}_{tool,k+1} = \hat{b}_{tool,k} + \lambda_2 (b_{tot,k} - \hat{b}_{tool,k} - \hat{\mathbf{b}}_{th,k} \mathbf{X}_k) \quad (20)$$

根據機台漂移干擾 $\hat{b}_{tool,k+1}$ 、製程干擾 $\hat{\mathbf{b}}_{th,k+1}$ ，與 k+1 批次產品，可由下列公式計算最佳輸入值

$$r_{k+1} = (T - \hat{b}_{tool,k+1} - \hat{\mathbf{b}}_{th,k+1} \mathbf{X}_{k+1}) / a \quad (21)$$

根據每一批次的最佳輸入值，並配合半導體廠的製程控制管理做製程控制，圖14為TBADE方塊流程圖。在TBADE控制流程圖中，當我們已知第k批次的組合(\mathbf{X}_k)後，便可由 $\hat{b}_{tool,k}$ 與 $\hat{\mathbf{b}}_{th,k}$ 計算出最佳輸入值；對第k批次的lot下輸入值(r_k)，並於曝光後於量測機台得到第k批次之量測值(m_k)，並由 r_k 與 m_k 計算系統的干擾 $b_{tot,k}$ ，此 $b_{tot,k}$ 可視為第k批次實際的干擾值，第k+1批次之 $\hat{b}_{tool,k+1}$ 與 $\hat{\mathbf{b}}_{th,k+1}$ 可藉由第k次總和的干擾值($b_{tot,k}$)與第k批次干擾($\hat{b}_{tool,k}$ 、 $\hat{\mathbf{b}}_{th,k}$)求得，送入控制器內計算k+1批次之輸入值 \hat{r}_{k+1} ，最後於曝光後至量測機台

得到新的量測值且重新計算物件干擾值。

四、歷史製程資料模擬驗證

TBADE 的模擬，分為兩個部分；第一筆模擬資料範圍包含一機台(PK055)、兩個產品(F9A、F9B)，九個 Layer(1F~1S)，簡稱資料甲組(圖 15)。第二筆資料範圍包含一機台(PK055)，其歷史製程資料中含有 16 個 thread，取其中兩個 thread 作模擬(P1_A_3B、P1_A_1T)，簡稱資料乙組(圖 16)。干擾來源說明將以資料甲組為例，假設每個覆蓋誤差的參數輸出與輸入之關係式以下線性的關係：

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{a} \mathbf{r}_k + \mathbf{b}_k \quad (22)$$

其中 \mathbf{m}_k 代表覆蓋誤差十個參數的量測值， \mathbf{r}_k 代表輸入值，為 10×1 的向量， \mathbf{a} 為系統的 gain 值，為 10×10 的矩陣， \mathbf{b}_k 為系統的 disturbance，為 10×1 的向量。

本計畫中，假設機台的漂移，是造成產品長期停 run 導致 NG 的主要原因；在其他混貨控制方法上，JADE[4]將干擾分成三類(Tool、Product、Layer)，每個批次曝光都會重新更新每個 item 的所貢獻的干擾，因此相同機台上即使某一個產品間隔長時間未生產，仍可於其他的產品批次時更新機台等 item 所貢獻的干擾，重新批次時便可以準確的找到正確 recipe。而每個批次都會將干擾分成各 item 所貢獻，若產品有單點異常狀態，會經由 Product 與 Layer 影響其他產品的輸入，為了改善這個現象以及根據實際製程資料所顯示的資訊，每個批次之總干擾 $\mathbf{b}_{tot,k}$ 通式可表示為：

$$\mathbf{b}_{tot,k} = \mathbf{b}_{tool,k} + \mathbf{b}_{thread,k} \quad (23)$$

圖 17 為資料甲組一個月覆蓋誤差的干擾值，其中包含 18 個 thread，橫軸為批次，縱軸為參位單數 ppm，利用線性迴歸找出漂移趨勢如圖 18 所示，則此漂移趨勢為機台漂移初始值($\hat{\mathbf{b}}_{tool,0}$)，而 Thread 貢獻初始之干擾($\hat{\mathbf{b}}_{thread,0}$)則為總干擾減去機台漂移干擾之值，其值列於表 2。

$$\hat{\mathbf{b}}_{thread(i),0} = \mathbf{b}_{tot,0} - \hat{\mathbf{b}}_{tool,0} \quad (24)$$

(24)式中，下標 i 代表 thread 編號，令新矩陣 $\hat{\mathbf{b}}_{TH,k}$ 及 \mathbf{X}_k ，其中

$$\hat{\mathbf{b}}_{TH,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{thread(1),k} & \mathbf{b}_{thread(2),k} & \cdots & \mathbf{b}_{thread(18),k} \end{bmatrix}_{10 \times 18} \quad (25)$$

$$\mathbf{X}_k^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 18} \quad (26)$$

則(24)式可改寫成以下形式：

$$\mathbf{b}_{tot,k} = \hat{\mathbf{b}}_{tool,k} + \hat{\mathbf{b}}_{TH,k} \mathbf{X}_k \quad (27)$$

$\hat{\mathbf{b}}_{tool,k}$ 與 $\hat{\mathbf{b}}_{TH,k}$ 之更新值為：

$$\hat{\mathbf{b}}_{TH,k+1} = (\hat{\mathbf{b}}_{TH,k} + \hat{\mathbf{b}}_{tool,k} \mathbf{X}_k^T) \quad (28)$$

$$+ \lambda_1 (\mathbf{b}_{tot,k} - \hat{\mathbf{b}}_{tool,k} - \hat{\mathbf{b}}_{TH,k} \mathbf{X}_k) \mathbf{X}_k^T$$

$$\hat{\mathbf{b}}_{tool,k+1} = \hat{\mathbf{b}}_{tool,k} + \lambda_2 (\mathbf{b}_{tot,k} - \hat{\mathbf{b}}_{tool,k} - \hat{\mathbf{b}}_{TH,k} \mathbf{X}_k) \quad (29)$$

其中權重值 λ_1 、 λ_2 以 Cpk 為指標，利用試誤法找出歷史資料前一個月批次資料可使 Cpk 最高之值，其值如表 3 所示。根據 Tool、Thread 所貢獻的干擾 $\mathbf{b}_{tool,k}$ 及 $\mathbf{b}_{thread,k}$ ，與 k+1 批次的 thread 組合 \mathbf{A}_{k+1} ，即可計算出 k+1 批次十個覆蓋誤差參數之最佳輸入值：

$$\hat{\mathbf{r}}_{k+1} = \mathbf{a}^{-1} \times (\mathbf{T} - \hat{\mathbf{b}}_{tool,k+1} - \hat{\mathbf{b}}_{TH,k+1} \mathbf{X}_{k+1}) \quad (30)$$

另外，此模擬同時與 JADE 做一比較，JADE 之初始值及運算架構皆按照 JADE 之設定。

■ 模擬結果-甲組資料

取第18個thread(PK055, F9B、1S)作為模擬比較說明，圖19中，上圖與下圖分別為輸出值與輸入值，橫軸為批次量，縱軸為參數單位ppm，圖示x為TBADE，圖示圓圈為JADE而圖示三角為歷史資料，由左而右三個狀態分別為初始批貨、機台PM，穩定run貨。第一個區間為開始模擬後的初始15筆資料，JADE因初始值預測錯誤造成震盪並且引起NG，但是TBADE卻能夠較準確的估計到初始值；第二個區間由於受機台PM影響，TBADE必需花數個批次才能收斂回目標值，而歷史資料為了避免良率降低，PM後輸出與輸入值會排除，這現象會造成TBADE的Cpk略低於歷史資料(圖20)；第三個區間為相同產品批次間隔短時模擬的結果，其中TBADE與JADE，皆會收斂於Target。

由模擬結果顯示出，因JADE找初始值方法不佳，造成前面數筆模擬輸出值出現震盪，收斂後則有非常好的效能，但是若某產品有異常點，則會由共通項影響其他產品的輸出值；而TBADE初始值較準確，若某產品有異常點時，亦會影響到其他產品的輸出值，但與JADE相比此影響較小，而MA3沒有初始值不佳的問題，而且產品完全不會互相影響良率；而當某產品停止生產一段

時間後重新生產，結果以JADE最佳，TBADE其次，而MA3為最差，其中MA3可能需重新Pilot run找出初始值，綜合以上各點，若產品排程固定，並且所有產品不會停止生產一段時間，則MA3最為最適合的方法，若產品排程不固定，並且有停產情況發生，則TBADE較適合。

■ 模擬結果-乙組資料

由於在前項模擬中 TBADE 較 JADE 佳，因此在乙組資料模擬只做 TBADE 模擬；機台漂移列於表 4，此次實驗 TBADE 權重值以 Cpk 為指標，利用試誤法找出歷史資料前一個月批次資料可使 Cpk 最高之值並列於表 5。

圖 21-圖 23 為模擬結果，上圖與下圖分別為輸出值與輸入值，橫軸為批次量，縱軸為參數單位(圖 21-圖 23 分別為 μm 、 μm 、 μrad)，圖示 x 為 TBADE，而圖示三角為歷史資料。圖 21 中顯示出，連續批次並且機台穩定時，TBADE 可以有相當好的表現，而圖 22 及圖 23，則為機台忽然有變異，或者有異常點存在時，必須經過好幾個 run 調整才能重新收斂於 Target，圖 24、25 為兩個 Thread 的 Cpk，可以看出除了受異常點影響的值之外，大部分參數 TBADE 皆能有較好的表現。

五、上機實驗驗證

為了驗證 TBADE 控制架構適用於半導體廠現行微影製程覆蓋誤差控制，利用 MATLAB 軟體寫成 TBADE 控制器，以現行覆蓋誤差輸出資料計算新批次建議的機台輸入值，將其值輸入機台來進行實驗。與黃光工程部協調後，達成以下的共識：

1. 以半導體廠線上產品進行實驗。
2. 實驗以相同機台的兩個曝光層為主，並且相同前製程機台。
3. 於實驗前一周，先進行至半導體廠直接以實驗程式測試計算的新批次輸入值是否正常，用以驗證程式之正確性。
4. 以插件的方式進行實驗。
5. 量測機台並不固定。

■ 實驗之初始值設定

在實驗驗證中，使用編號 PK017 機台，曝光產品為 P1，曝光層分別為 1S 與 2B，各十個 Lot，實驗共進行六個工作天。根據該機台、產品以及曝光層在實驗日期前一個月之歷史製程資料，找

出機台漂移值與權重值，作為實驗的初始值，其值如表 6 與表 7 所示。實驗進度與排程則如表 8 所示；此外，實驗的進行為插件方式，故在非實驗期間，實驗機台仍然正常執行廠內原本之生產排程。

在控制性能指標方面，本計畫使用 RMSE 以及 Cpk 來分析製程經控制的效能；其中 RMSE (Root Mean Squared Error、均方根誤差) 定義如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - T)^2}{n}} \quad (31)$$

其中， m_i 代表量測值， T 為目標值， n 為批次數量。Cpk(製程能力指標)定義如下：

$$Cpk = \min \left[\frac{(USL - mean)}{3\sigma}, \frac{(mean - LSL)}{3\sigma} \right] \quad (32)$$

其中，USL、LSL 分別為製程規格上下限，mean 為製程參數輸出之平均值， σ 為標準差，Cpk 值大，代表製程能力較高。

■ 實驗結果

圖 26 至圖 35 為各參數輸出之實驗結果，橫軸為每個批次(run)，縱軸為參數單位，紅線右邊為實驗的結果，紅線左邊則為實驗前一個月以廠內現行方法(MA3)曝光的結果，藍色線為 1S 的輸出值，而粉紅色線則為 2B 輸出值；其中 A1、A2 的規格為 $\pm 0.012\mu m$ ，A3-A4 為 $\pm 0.1ppm$ ，A5-B5 則為 $\pm 0.1\mu rad$ ，X7-Y7 為 1ppm，X8-Y8 為 $1\mu rad$ 。圖 36、37 分別為曝光層 1S 與 2B 的 RMSE，圖 38、39 分別為曝光層 1S 與 2B 之 Cpk 比較圖。

另外，在實驗六天過程中，以同樣製程 thread 但未經過 TBADE 控制之產品量測值，作為對照組，來比較廠內現行方法以及 TBADE 之優劣，圖 40 至圖 49 為十個製程參數之量測值，圖 50-圖 51 為實驗輸出值之 RMSE，圖 52-圖 53 為實驗輸出之 Cpk，

■ 實驗結果討論

以 RMSE 與 Cpk 來看，本次實驗兩個產品，在曝光層 1S 並無明顯改善，而曝光層 2B 的大部份參數都有改善，並且 2B 的 shot term 四個參數，都有降低 RMSE 或者提高 Cpk；整體來說，就實驗結果而言 TBADE 有略為提升製程能力，但是受機台雜訊以及量測機台並不固定影響，實驗結果無模擬結果好，當中或許包含其

他 TBADE 控制器尚未考量到之因素，尚有改進之空間，茲列於下：

1. 調低 TBADE 權重：比較模擬資料以及實驗資料後，發現對於 Thread 的權重，本次實驗的值較大，因此更容易受到雜訊影響，若調低權重值則可有較好的結果。
2. 固定量測機台：此方式雖有機會降低多部量測機台所造成之量測誤差變異，但會造成產品 throughput 的下降，在兩者之間必須取得平衡點。
3. 增加實驗 wafer 之數量：若能進行較長期及多量之實驗，所得之結果數據更具有可信度。

今年度計畫成果如下列所示：

- (1) 已分析黃光製程之特性。
- (2) 建立微影製程覆蓋誤差之製程模型。
- (3) 完成混貨 Run-to-Run 干擾觀測器架構。
- (4) 建構以機台為基底之混貨適應性干擾估測器 (tool-based adaptive disturbance estimation, TBADE)。
- (5) 完成混貨 TBADE 控制器實際上線實驗，並以實際產品驗證其效能。

六、文獻回顧

- [1] C. C. Fu, G. Seligman and P. Tapp, "Implementation and benefits of advanced process control for lithography CD and overlay" *Proceedings of SPIE*, vol. 5038, pp. 362-372, 2003.
- [2] S. J. Park, M. S. Lee, S. Y. Shin, K. H. Cho, J. T. Lim, B. S. Cho, Y. H. Jei, M. K. Kim and C. H. Park, "Run-to-Run Overlay Control of Steppers in Semiconductor Manufacture Systems Based on History Data Analysis and Neural Network Modeling," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol 18, no.4, pp. 605-613, 2005.
- [3] T. Mullins, "Advanced Process Control Framework Initiative (APCFI) 1.0 Specification," *SEMATECH*, 1997.
- [4] S. K. Firth, W. J. Campbell and A. Toprac, "Just-in-Time Adaptive Disturbance Estimation for Run-to-Run Control of Semiconductor Processes" *IEEE Transactions*

六、圖表

表 1 覆蓋誤差原因

覆蓋誤差來源	造成原因
曝光機	定位對準系統誤差 晶圓或光罩滑動 晶圓放置平台傾斜 透鏡組失真
晶圓	晶圓本身變形(受熱影響) 光阻塗佈膜厚不平整
光罩	光罩變形 光罩圖案比例失真
系統環境	震動 溫度 潔淨度

表 2 資料甲組漂移量

	A1	A2	A3	A4	A5
機台漂移量	6.32E-05	-0.00028	0.000313	0.000373	0.000255
	B5	X7	X8	Y7	Y8
機台漂移量	1.75E-05	0.000406	0.000738	0.00015	0.00487

表 3 資料甲組於 TBADE 權重值

權重	A1	A2	A3	A4	A5	B5	X7	Y7	X8	Y8
λ_1	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
λ_2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.4	0.3

表 4 資料乙組於 TBADE 權重值

	A1	A2	A3	A4	A5
機台漂移量	7.12E-06	-3.42E-06	4.36E-06	3.98E-06	1.17E-05
	B5	X7	X8	Y7	Y8
機台漂移量	4.13E-07	-4.44E-05	0.000382	-4.37E-05	0.000188

表 5 資料乙組於 TBADE 權重值

權重	A1	A2	A3	A4	A5	B5	X7	Y7	X8	Y8	
λ_1	thread1	0.22	0.26	0.15	0.06	0.16	0.12	0.18	0.19	0.21	0.18
	thread2	0.2	0.13	0.17	0.1	0.15	0.14	0.22	0.3	0.16	0.17
λ_2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 6 實驗機台漂移初始值

	A1	A2	A3	A4	A5
機台漂移量	6.09E-06	2.58E-05	-2.06E-06	1.57E-05	1.37E-05
	B5	X7	X8	Y7	Y8
機台漂移量	-1.71E-05	0.001526	-0.00036	0.000877	-0.00079

表 7 實驗曝光層的權重值

w1	A1	A2	A3	A4	A5	B5	X7	X8	Y7	Y8
1S	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.3
2B	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3

表 8 實驗進度與排程

Day 1	1S	1S	2B	2B
Day 2	1S	1S	2B	
Day 3	2B	2B	2B	2B
Day 4	2B	2B	1S	
Day 5	1S	1S		
Day 6	1S	1S	1S	2B

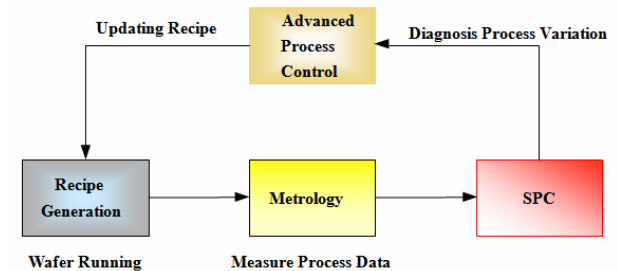


圖 1 APC 系統控制流程圖

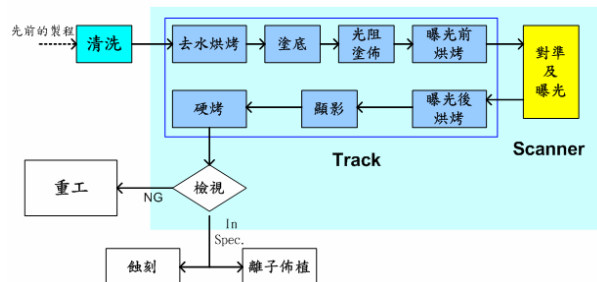


圖 2 黃光區微影製程步驟

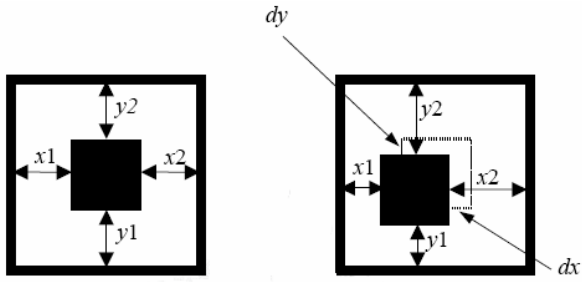


圖 3 覆蓋誤差測量記號

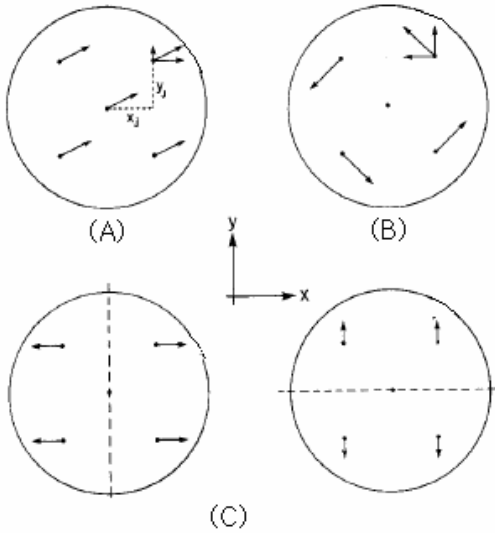


圖 4 覆蓋誤差形式

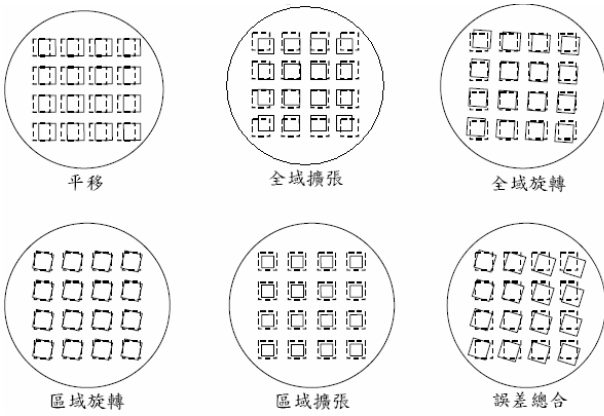


圖 5 覆蓋誤差影響

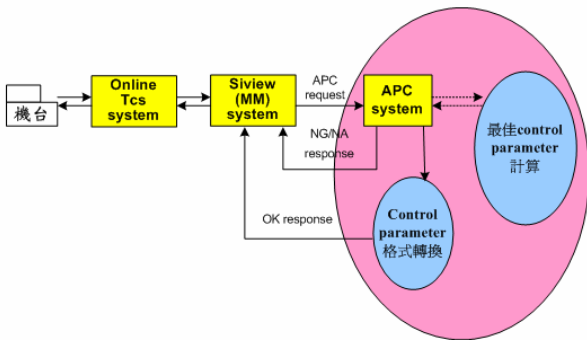


圖 6 半導體廠內 APC 系統架構

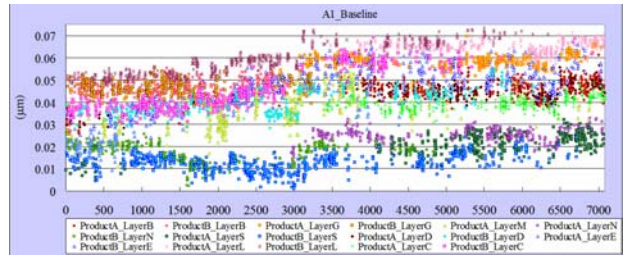


圖 7 半導體廠中某曝光機台所有產品 A1 參數之 Baseline

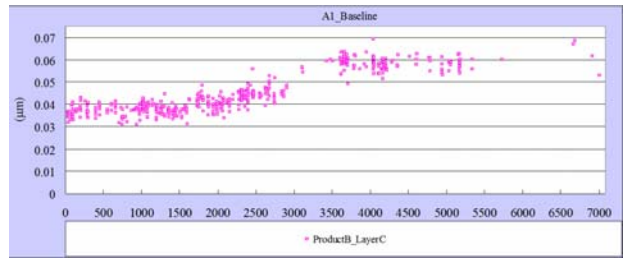


圖 8 半導體廠中某曝光機台單一產品 A1 參數之 Baseline

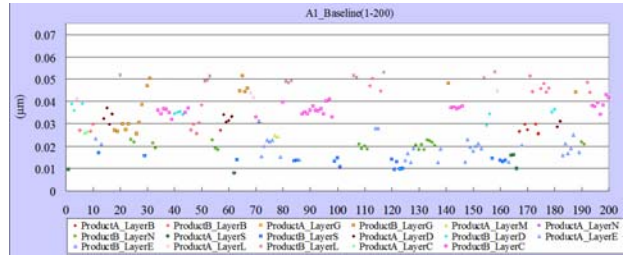


圖 9 半導體廠中某曝光機台所有產品前 200 批次 A1 參數之 Baseline

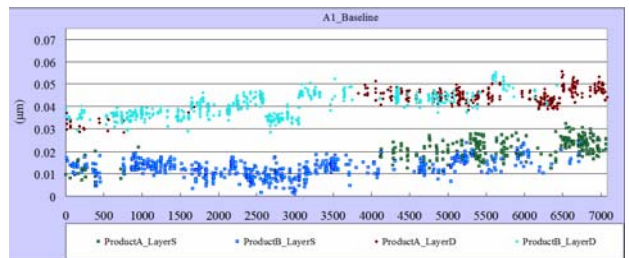


圖 10 半導體廠中某曝光機台 4 種產品 A1 參數之 Baseline

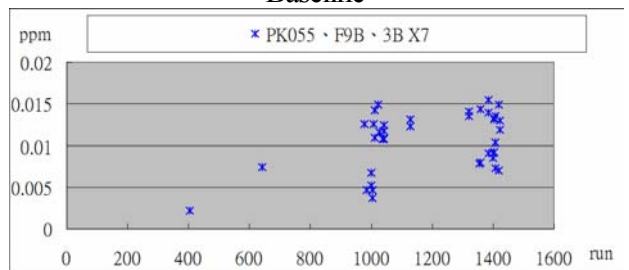


圖 11 PK055·F9B·3B layer X7 之短期BASELINE

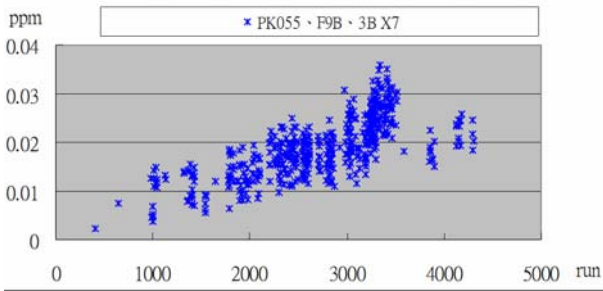


圖12 PK055、F9B、3B X7長期BASELINE

機台 產品別 曝光層

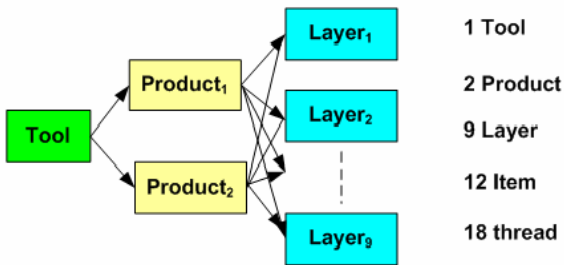


圖 13 TBADE 取樣範圍

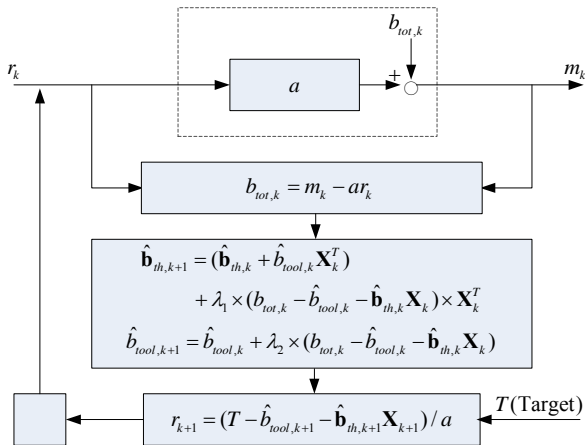


圖 14 TBADE 方塊流程圖

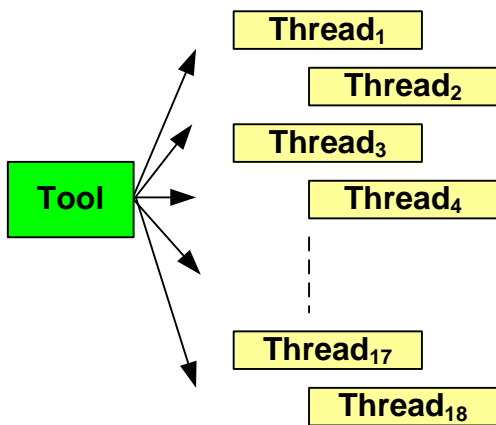


圖 15 資料甲組模擬取樣圖

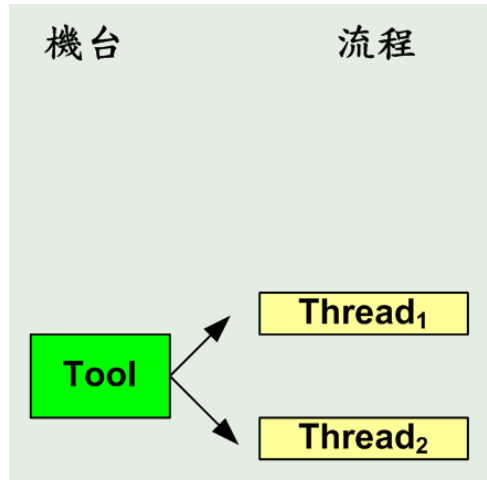


圖 16 資料乙組模擬取樣圖

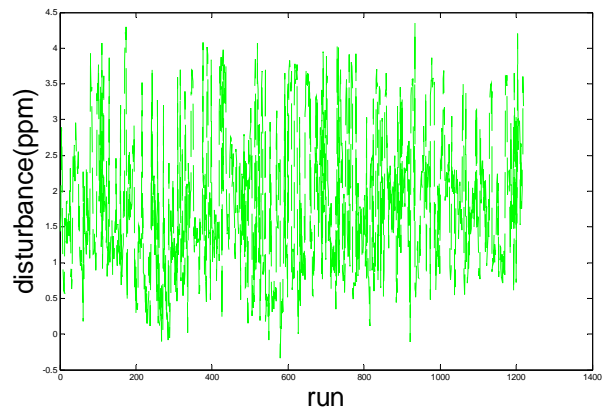


圖 17 歷史資料 X7 參數的 disturbance

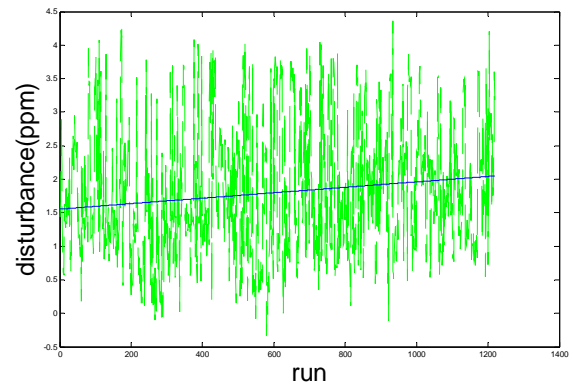


圖 18 X7 參數的漂移趨勢

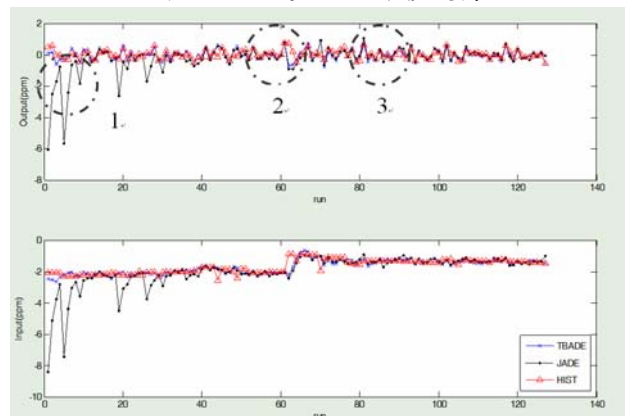


圖 19 PK055、F9B、1S、X7 覆蓋誤差輸入與輸出

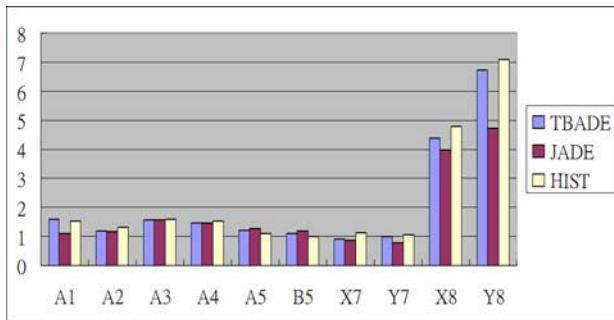


圖20 PK055、F9B、1S 各參數Cpk

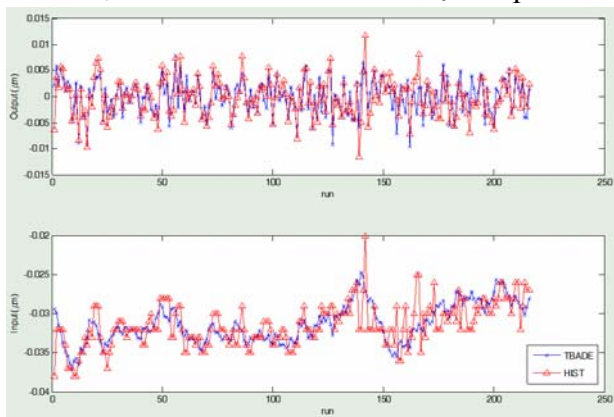


圖 21 PK055、P1.A、3B、A2 參數覆蓋誤差輸入與輸出

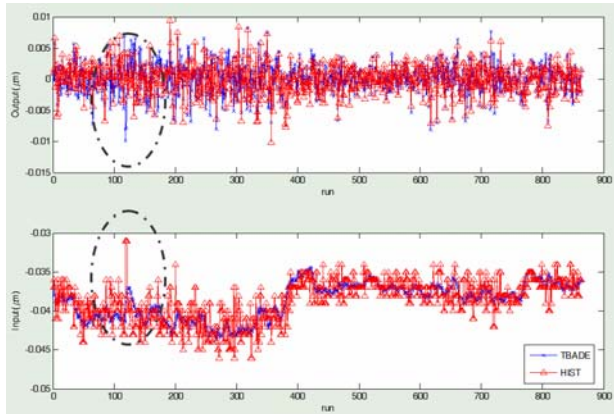


圖 22 PK055、P1.A、1T、A2 參數覆蓋誤差輸入與輸出

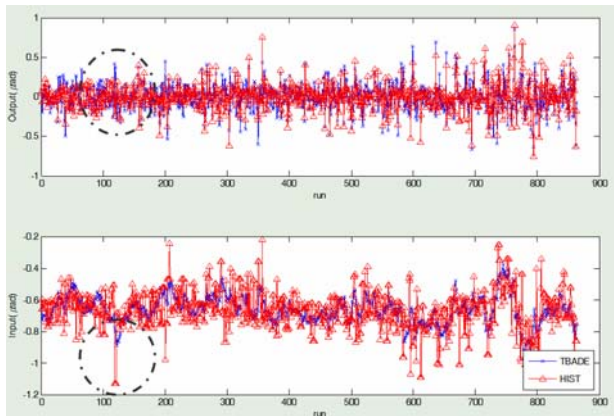


圖 23 PK055、P1.A、1T、X8 參數覆蓋誤差輸入與輸出

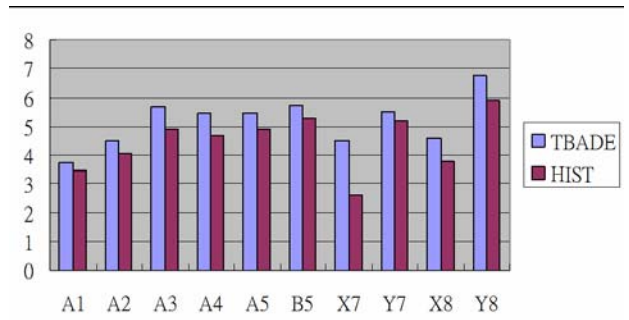


圖 24 PK055、P1.A、3B 各參數 Cpk

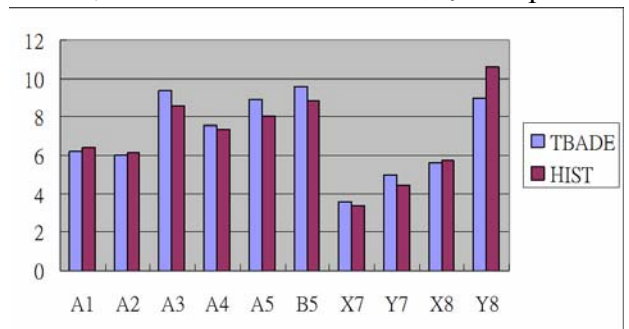


圖 25 PK055、P1.A、1T 各參數 Cpk

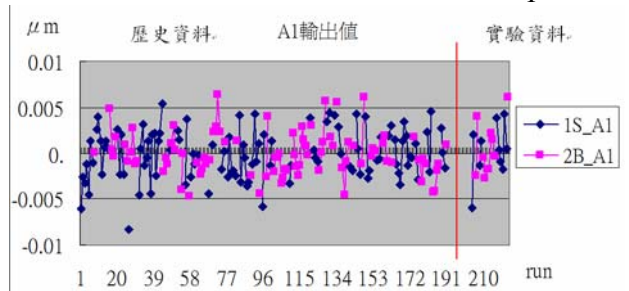


圖 26 實驗 A1 參數輸出值

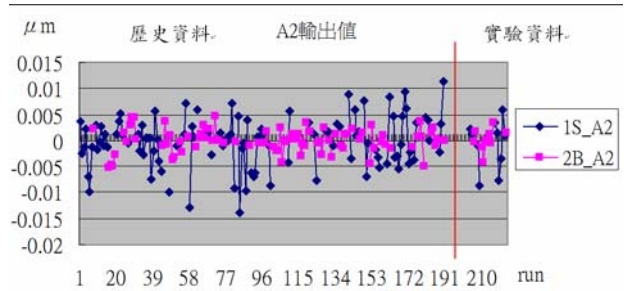


圖 27 實驗 A2 參數輸出值

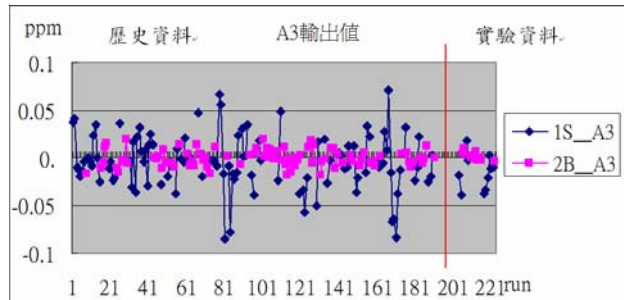


圖 28 實驗 A3 參數輸出值

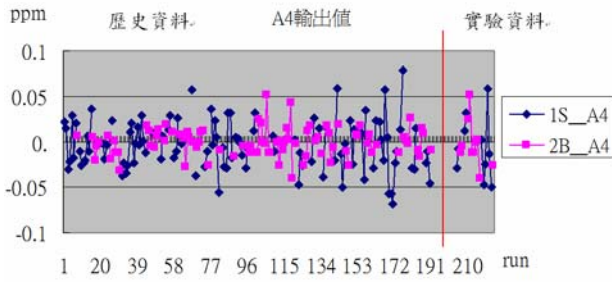


圖 29 實驗 A4 參數輸出值

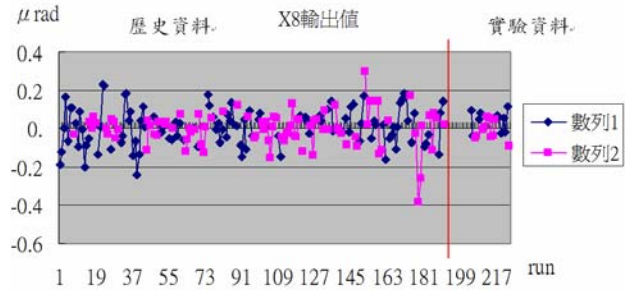


圖 34 實驗 X8 參數輸出值

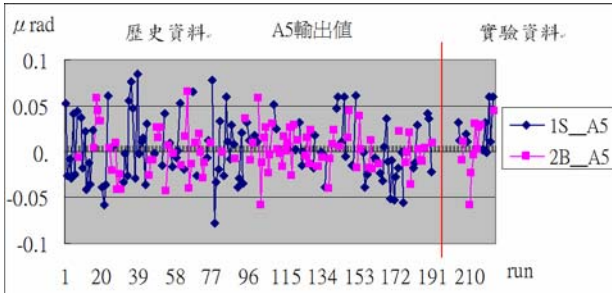


圖 30 實驗 A5 參數輸出值

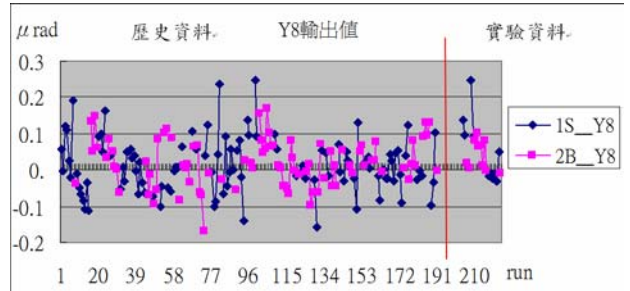


圖 35 實驗 Y8 參數輸出值

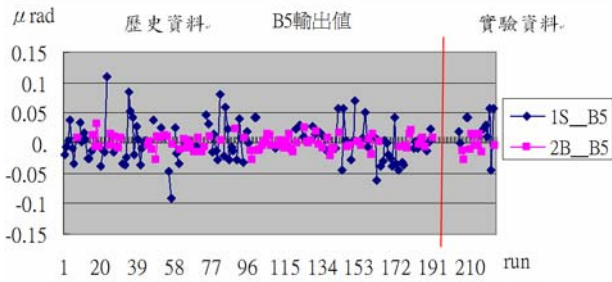


圖 31 實驗 B5 參數輸出值

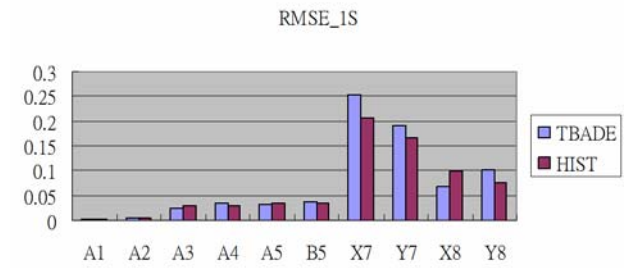


圖 36 1S RMSE

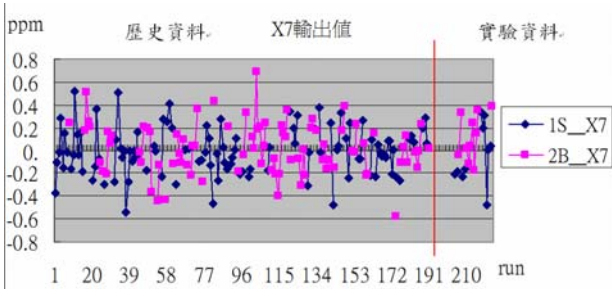


圖 32 實驗 X7 參數輸出值

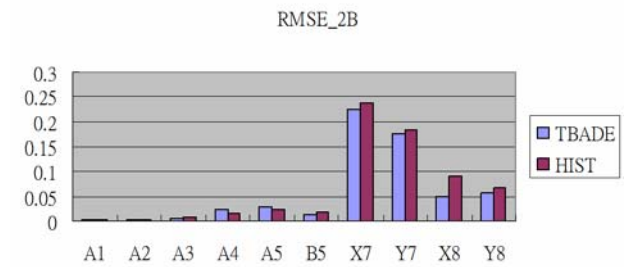


圖 37 2B RMSE

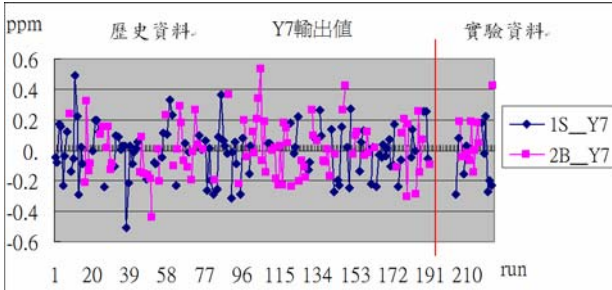


圖 33 實驗 Y7 參數輸出值

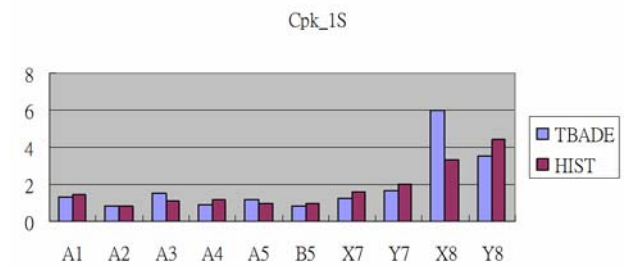


圖 38 1S Cpk

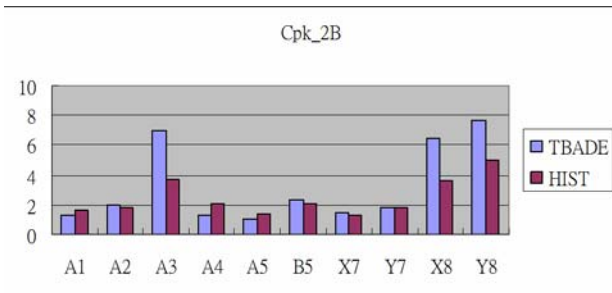


圖 39 2B Cpk

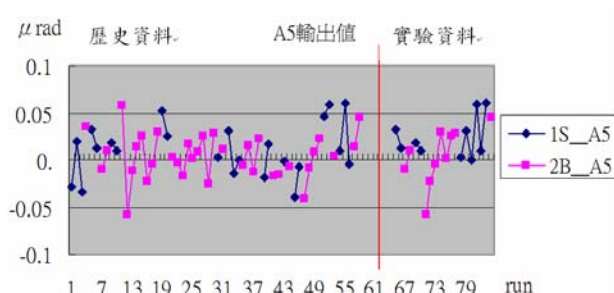


圖 44 實驗 A5 參數輸出值

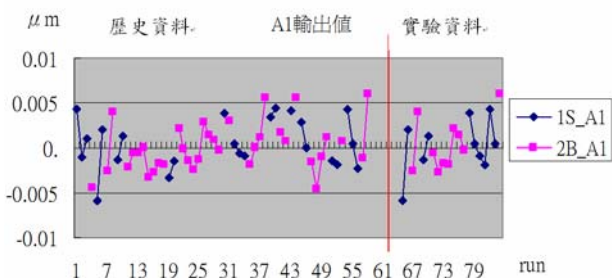


圖 40 實驗 A1 參數輸出值

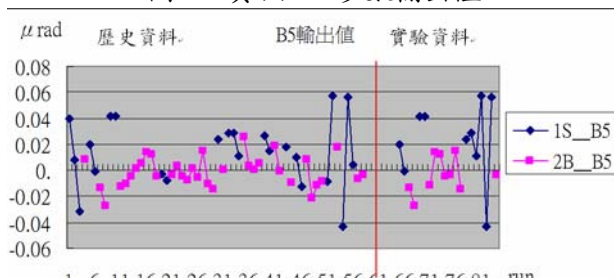


圖 45 實驗 B5 參數輸出值

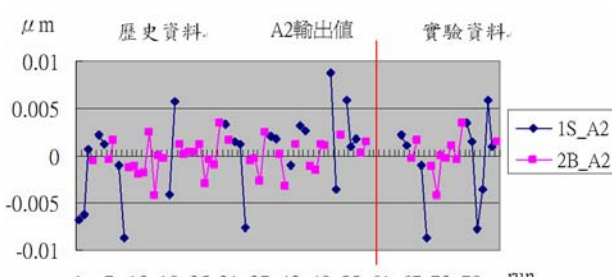


圖 41 實驗 A2 參數輸出值

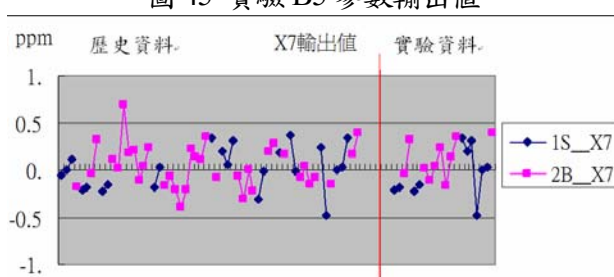


圖 46 實驗 X7 參數輸出值

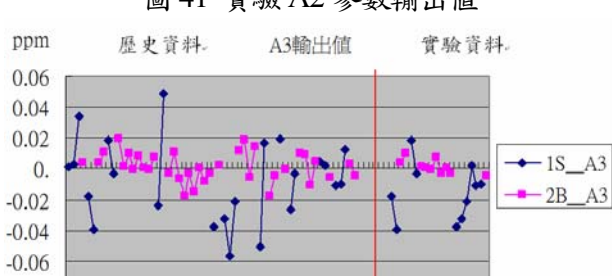


圖 42 實驗 A3 參數輸出值

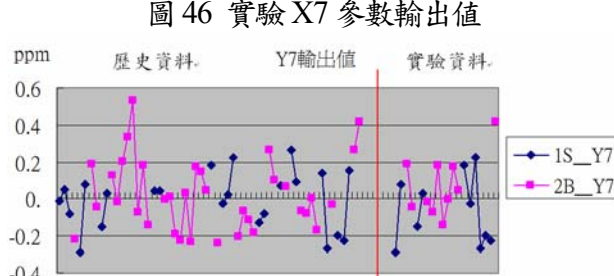


圖 47 實驗 Y7 參數輸出值

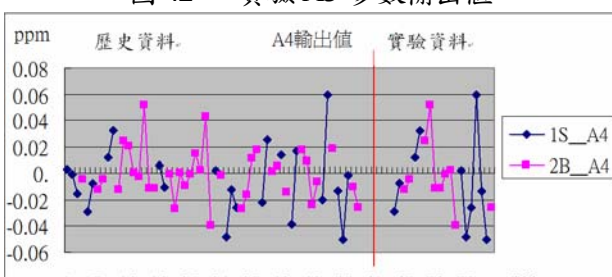


圖 43 實驗 A4 參數輸出值

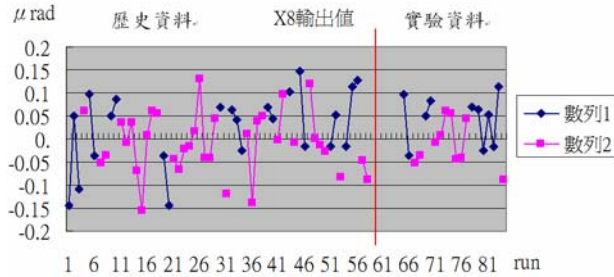


圖 48 實驗 X8 參數輸出值

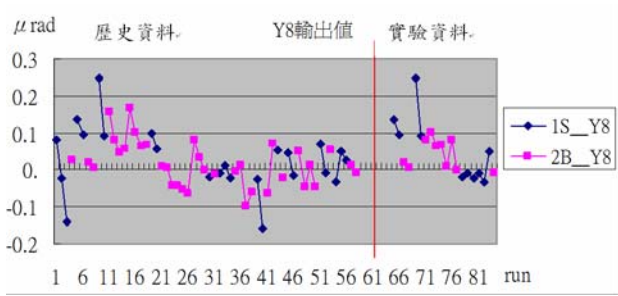


圖 49 實驗 Y8 參數輸出值

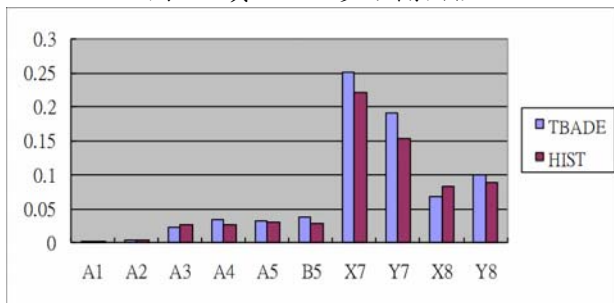


圖 50 1S layer RMSE

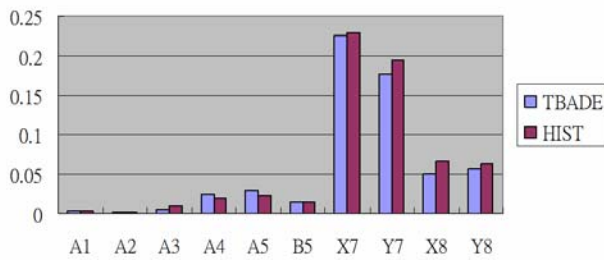


圖 51 2B layer RMSE

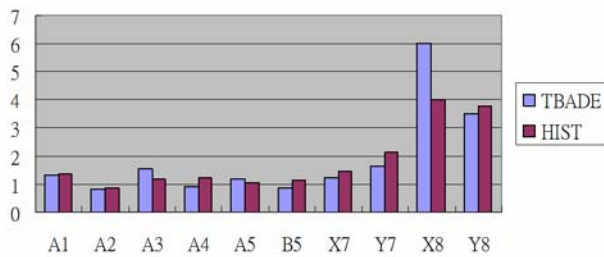


圖 52 1S layer Cpk

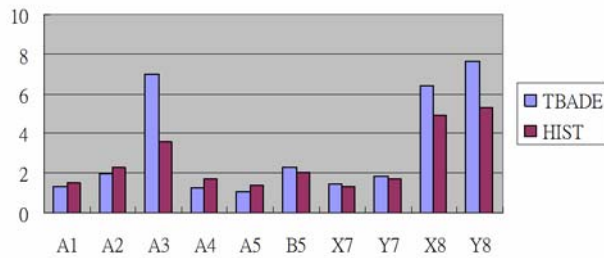


圖 53 2B layer Cpk

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）

已發表兩篇論文於國際期刊

另有一篇學術論文正整理撰寫中內容為建構一套以機台為基底之適應性干擾估測器(Tool-based Adaptive Disturbance Estimation, TBADE)，並且於半導體廠內實作及驗證。

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：半導體微影覆蓋誤差先進製程批次控制開發研究，實屬針對現今半導體黃光製程現況加以開發批次製程控制技術及改善製程良率為目的。

學術成就：分析製程現況及資料，建構混貨黃光製程批次控制架構以及實際上機實驗驗證。

技術創新：建構一套以機台為基底之適應性干擾估測器 (Tool-based Adaptive Disturbance Estimation, TBADE)，並且於半導體廠內實作及驗證。

社會影響：提升黃光微影製程技術，降低生產商之成本、提升良率、以致於產品價格降低，提昇產品在市場上競爭力。