

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

建構積體電路之多特性多量測點資料之管制流程

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC - 89 - 2213 - E - 009 - 169

執行期間：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

計畫主持人：唐麗英

執行單位：國立交通大學工業工程與管理學系

中 華 民 國 90 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式說明

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-169

執行期限：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：唐麗英 國立交通大學工業工程與管理學系

一、中文摘要

由於產品或製程複雜度增加，在從事品質管制過程中，需量測之產品品質特性數及量測位置（或量測點）數也隨之增多，且這些品質特性間或多個量測點間又常有明顯之相關性。例如：晶圓廠在管制製造過程繁複的高科技產品時，必須使用高成本儀器、來量測多個品質特性的多個量測點值。因此，積體電路業界若僅依賴一般傳統管制圖如： $\bar{x}-R$ 管制圖來監控生產線上之晶圓品質，已無法正確且及時偵測出製程的品質狀況。

因此，本研究之主要目的是針對具多個品質特性及多個量測點間的積體電路品質管制資料，以主成份分析及多變量管制圖來建構出一套適用於管制多特性量測點之管制流程，並期望當製程出現異常時，能夠迅速反應製程的失控狀況並有效地回溯失控點。本研究所發展之管制流程已經以新竹科學園區某積體電路製造廠提供之實際資料驗證確實有效可行，

【關鍵詞】多品質特性、多測量點、主成份分析、多變量管制圖

Abstract

Due to that manufacturing technologies and severe demand of customers, high quality assurance has become increasingly important for integrated circuits(IC) industry. For instance, quality control on multiple quality characteristics with multiple readings of wafers has been a common problem for wafer fabrication. In general, process control on such measurements is very complicated. Therefore, the traditional Shewart control charts such as $\bar{x}-R$ charts are no longer suitable. This study proposed a novel procedure to control multiple readings from multiple quality characteristics using principal component analysis (PCA) and multivariate control chart. The proposed procedure can trace back information regarding the out-of-control sample points quickly and effectively. Engineers can accurately measure the overall product quality. The efficiency and reliability of the proposed procedure can improve the quality control work for the manufacturing company, especially for the high-tech industry. A real case provided by an integrated circuits manufacturer in Hsinchu, Taiwan demonstrates the efficiency of the proposed procedure.

Keywords: multiple quality characteristics, multiple readings, principal component analysis,

multivariate control chart

二、緣由與目的

自蕭瓦特 (Shewart) 提出管制圖的概念以後，利用管制圖來監控製程已成了生產線上常用的品質管制方法，工程人員可藉由管制圖即時監控製程狀態，在發現失控點後可馬上至生產線上找出可能造成製程異常的原因，以避免產生更多的失控點。由於蕭瓦特管制圖的概念清楚易懂，所需資料簡單，加上其對製程即時監控的功能，蕭瓦特管制圖早已普遍地被應用到許多重要的製程上。

然而，隨著製造技術逐漸進步及顧客對產品品質要求愈趨嚴格，管制產品時所需量測的資料特性及數量也跟著複雜起來，因此，單靠一般管制圖已無法有效的管制流程來確保產品品質。以晶圓廠為例，在管制這類儀器成本高、製造過程繁複的高科技產品時，所需管制的資料範圍已非傳統的單項特性或單點量測值，對產品作多點或多特性的量測已成為積體電路業界必須要用的管制方式，例如在檢驗半導體產品時，必須量測晶圓上多項特性（包括電壓、電阻、電流...等）的多個點，期望藉由檢測結果確保整片晶圓在多項特性的品質上皆達到所要求之品質標準。

雖然業界期望藉由以上的量測方式得到大量的量測資料，並能由這些資料提供關於品質的相關訊息。但至目前為止，積體電路業界對這些量測資料似乎尚未找到一套正確的管制流程。目前普遍採用的管制方法是針對每個測試特性繪製一張管制圖，繪製原則是將該批量內每一特性多個量測點的所有測試資料用來繪製成一張 \bar{x} 圖及 S 圖，這樣的作法由於沒有考慮到各種可能存在的變異（例如量測點與點之間的變異或品質特性間的變異），因此無法達到可靠的管制效果。此外，工程人員必須同時判讀多張個別特性的管制圖，也很難有效地達到管制目的。

因此，本研究的目的即是要針對積體電路產品，建構一套有效的多特性多量測點管制流程。應用統計分析手法來分析及確認出多個測試特性及量測點間的關係，並希望所建構出的管制模式能簡化管制工作，相信這將有助於工程人員對產品整體品質的判讀，同時提高管制效率及可靠性。

三、文獻探討

3.1 與積體電路相關文獻探討

Wells 與 Smith [8]認為管制晶圓生產的重點除了在於單片晶圓上的量測值以外，還需考量到繁複

的多道製程會對最終產品造成影響，因此在繪製管制圖時必須考慮的變異來源有三種，包括：同片晶圓上不同量測位置造成的變異 (within-wafer variation)、同生產批量內晶圓與晶圓間存在的變異 (wafer-to-wafer variation) 以及不同批量之間存在的變異 (lot-to-lot variation)。

Chen et al.[1] 則認為以傳統蕭瓦特管制圖來管制晶圓上多點量測的問題時，是以多點平均值作為單片晶圓的代表值，並未考慮到五點量測值之間的相關性，也不符合實際情況。Chen et al.即參考常用以管制多個變數的 Hotelling T^2 多變量管制圖[3]的建構方式，推導出三則以 Shewart 管制圖為基礎的連串點判讀原則 (Run rules)，作為判讀其發展之管制圖的工具。Chen et al.以晶圓上所量測之點二氧化矽 (SiO₂) 的薄膜厚度作為管制資料，結果發現在這項特性量測值方面，單片晶圓的五個量測點可明顯地區分為兩群：位於晶圓邊緣或晶圓中心。利用這兩區的量測資料分別繪製加入連串點判讀原則的 Shewart 管制圖及多變量 Hotelling T^2 管制圖，再以 ARL(average run length)作為績效評估指標。經過 1,200 次的模擬結果發現，當兩個量測點相關性不高 (0.3~0.5) 時，Hotelling T^2 多變量管制圖的管制效果較好，但當相關性在 0.6 甚至超過 0.7 以上時，加入此論文所建構之連串點判讀原則檢查的 Shewart 管制圖績效，則明顯要比 Hotelling T^2 多變量管制圖的管制績效好。

Runger、Alt 與 Montgomery [4]在探討如何管制多條生產線的研究當中，提出可利用主成份分析的方法，將多個生產線的資料合併，並將所得之第一主成份繪製管制圖用以管制平均值的偏移，第二主成份 (或其餘主成份的集合) 則作為管制製程變異之用。由於主成份分析的特性，所組成的主成份間是直交的，影響其中一張管制圖的因素，並不會同時影響另一張管制圖，因此可清楚有效地管制多條生產線。然而，當由主成份繪製的管制圖中出現超出管制界限的點時，則無法直接由管制圖得知該點的相關資訊，仍須參照原始資料找出可能導致失控的原因。

Kim 與 Yum [2]針對晶圓固定位置量測的研究，考慮到多種變異來源，除了 Wells 與 Smith [8]已提出的三種變異，亦即同片晶圓上不同量測位置造成的變異 (within-wafer variation)、同生產批量內晶圓與晶圓間存在的變異 (wafer-to-wafer variation) 以及不同批量之間存在的變異 (lot-to-lot variation) 之外，還加入對前兩種變異間交互作用的考量。Kim 與 Yum 針對晶圓上不同的量測位置、抽測晶圓位於批量的不同位置，以及兩者之間的交互作用分別建構個別的管制方式，使得當流程平均數管制圖出現失控點時，能夠回溯找出問題點可能的原因。

Kim 與 Yum 將晶圓量測值的管制方式作了更清楚的解析，然而其管制的範圍只針對單一特性 (薄膜厚度)，且只選擇批量中的幾片作抽檢，與本問題要求同時管制多個特性且對批量內晶圓採取全檢的需求尚有差異；且依照作者建構的管制流程，光管制單項特性即需繪製七個管制圖，這將會

對工程人員造成繪製與判讀上的負擔，實際上適用與否尚需考慮，但 Kim 與 Yum 所提出的觀念，管制圖的建構理念與公式推導過程，皆可作為本研究進行時的參考。

3.2 主成份分析法原理簡介[5]

主成份分析之目的是將資料中原有的 P 個變數予以縮減，使其成為 K (P) 個互相無關連 (uncorrelated) 的互相獨立的線性組合變項 (主成份)，以達到簡化資料的目的。另一方面，利用主成份分析可以知道如何將彼此間具有相關性的 P 個變數予以線性組合，使經由線性組合而得的新 K 個主成份之變異數最大，亦即新 K 個主成份能盡可能地反應出來原本 P 個變數的資訊量。

主成份分析法的原理，是假設有一由 P 個變數所組成的樣本資料，經由主成份分析可發現由第一個原始變數之線性組合所配置原始變數的總變異數最大。此第一個線性組合可表示如下：

其中 y_1 稱為第一主成份，且其係數 $a_1' a_1 = 1$ [其中 $a_1' = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1p})$]， y_1 的變異數等於樣本共變異數矩陣中的最大特徵值 (Eigenvalue)。第一主成份的係數則是最大特徵值所對應的特徵向量 (Eigenvector) 的元素 (Element)。

3.3 Hotelling T^2 多變量管制圖簡介[3]

當要管制 p 個品質特性時，假設此 p 個特性服從 p 元常態分配，樣本大小為 n，則以 $p \times 1$ 的向量可表示這些品質特性的平均值為

$$t_0 = n(\bar{x} - \bar{\mu})' \Sigma^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu}) \quad (1)$$

其中 $\bar{\mu}' = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \dots, \bar{\mu}_p]$ 為製程在管制情況下每個品質特性平均值的向量， Σ 則為共變異數矩陣。管制圖上限為 $UCL = t_{r,p}^2$ 。

3.3.1 估計 μ 及

μ 及 Σ 需從穩定製程下取得 n 個樣本來估算求得，假設現有 m 個現成的樣本，則樣本平均數及變異數為：

$$\bar{x}_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ijk} \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, p \\ k = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

$$S_{jk}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{jk})^2 \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, p \\ k = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

其中 x_{ijk} 表示第 k 個樣本中第 j 個品質特性的第 i 個觀測值。而在第 k 個樣本內第 j 與第 h 個品質特性的共變異數為：

$$S_{jhk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{jk})(x_{ihk} - \bar{x}_{hk}) \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, m \\ j, h = 1, 2, \dots, p \end{cases}$$

其中所有統計量 $x_{jk}, S_{jk}^2, S_{jhk}$ 再除以 m 個樣本求得平均數 $\{\bar{x}_j\}$ 為向量 \bar{x} 的元素，而樣本間的 $p \times p$ 平均共變異數矩陣 S 為

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{x}_{jk} \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$\bar{s}_j^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_{jk}^2 \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$\bar{s}_{jh} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_{jkh} \quad j \neq h$$

$$S = \begin{bmatrix} \bar{s}_1^2 & \bar{s}_{12} & \bar{s}_{13} & \dots & \bar{s}_{1p} \\ \wedge & \bar{s}_2^2 & \bar{s}_{23} & \dots & \bar{s}_{2p} \\ \wedge & \wedge & \bar{s}_3^2 & \dots & \wedge \\ \wedge & \wedge & \wedge & \dots & \wedge \\ \wedge & \wedge & \wedge & \dots & \bar{s}_p^2 \end{bmatrix}$$

在製程穩定的情況下， S 為 的不偏估計數。

3.3.2 Hotelling T^2 多變量管制圖

假設以 \bar{x} 代替 μ 、 S 代替 Σ ，則公式(1)可改寫成

$$T^2 = n(\bar{x} - \bar{\bar{x}})' S^{-1} (\bar{x} - \bar{\bar{x}}) \quad (2)$$

此 T^2 即為用以繪製 Hotelling T^2 多變量管制圖的統計量。

Alt [3]認為在使用 Hotelling T^2 多變量管制圖時必須將管制過程分成兩階段，階段一要先確認製程在管制狀態下，此時之管制界限為

$$UCL = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn - m - p + 1} F_{r, p, mn - m - p + 1}$$

$$LCL = 0$$

經由階段一管制公式確認製程為管制狀態後，才能進行階段二的管制，亦即針對未來生產狀況作管制，階段二之管制界限為：

然而當由大樣本量 ($m \geq 20, 25$) 估計 μ 及時，階段一及階段二的上限皆可以 $UCL = t_{r, p}^2$ 表示。當觀測值只有一個時 ($n=1$)，上述公式將不適用而必須加以修正。假設有 m 組樣本， p 個品質特性，每組只有一個觀測值，若以 X 及 S 分別代表樣本的平均數即共變數矩陣，可得 Hotelling T^2 統計量為： $T^2 = (X - \bar{X})' S^{-1} (X - \bar{X})$ ，Mason et al.[7]證明此時的 T^2 統計值符合 $F_{r, p, n-1}$ 分配，即 $F = T^2 \left(\frac{n-p}{p(n-1)} \right) \sim F_{r, p, n-1}$ ，並推導出適用於觀測值等於一的管制上界： $UCL = \frac{p(m-1)}{m-p} * F_{0.05, p, n-p}$ ；Tracy et al.[7]亦認為當樣本數夠大時，Hotelling T^2 多變量管制圖所要求欲管制的 p 個品質特性需服從多元常態的假設是不必要的。

四、多特性多量測點資料之管制流程建構

本研究建構的多特性多量測點資料之管制流程共有五個步驟，說明如下：

步驟 1：分析並確認資料特性

由於多特性多量測點之測試資料量通常非常龐大，很難同時作有效的管制，故必須先對多個測試特性進行相關分析以縮減多品質特性之資料。

步驟 2：利用主成份分析合併測試特性資料

針對步驟 1 找出具有高度相關的測試特性後，利用主成份分析合併這些特性在各量測點的測試資料，並需確認合併後的效果良好，足以解釋原始資料的大部分變異。

步驟 3：將主成份分類

將步驟 2 得到之每個主成份分別依照量測點位置分類，並將這些依量測點分類之主成份作為欲同時管制的多個品質特性。假設有 p 個量測點，經由主成份分析得到能解釋原始資料大部分變異的 s 個主成份，將此五個主成份分別依 p 各量測位置分類後，可得到 s 組皆須管制 p 個品質特性的資料，且此 s 組資料並不相關。因此若主成份分析合併資料效果越好，則能以越少之主成份個數來解釋原始資料大部分變異，此步驟將能更為簡化。

步驟 4：建構 Hotelling T^2 多變量管制圖

由步驟 3 所得之 s 組資料，根據 3.3 節所描述之 Hotelling T^2 多變量管制圖分別計算個別之 T^2 值及管制界限，並繪製 Hotelling T^2 多變量管制圖。

步驟 5：管制結果分析

經由以上步驟得到的管制結果，再利用 3.1 節所介紹之 Wells 與 Smith 方法以及 Kim 與 Yum 之方法，分別針對晶圓多種變異來源作進一步之分析，來回溯失控點的原因以供工程人員作為日後管制此項測試資料的參考。關於回溯失控點發生之步驟，本研究藉由步驟 2 主成份分析所得之線性組合關係式中係數的大小，找出可能對合併後主成份影響程度最大的品質特性，對單一量測直管制的三種變異來源的驗證概念，以找出更多與失控點的相關資訊。本研究建構之多特性多量測點資料管制流程如圖 2 所示。

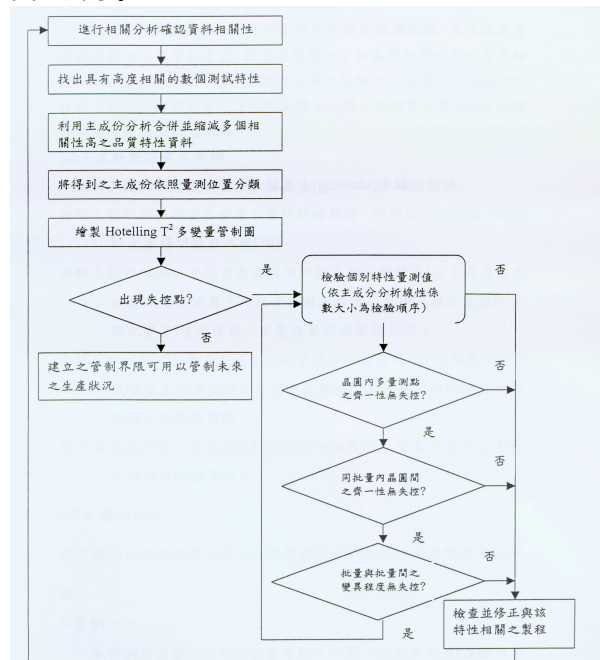


圖 2、資料分析與管制圖構建流程圖說明

五、實例說明

本研究以新竹科學園區某晶圓製造廠在晶圓允收測試過程中所得之多特性多量測點的實際資料來驗證本研究方法之有效性。此批原始資料包含 20 個批量共 500 片晶圓，每片晶圓選取固定 5 點作 36 項特性的測試。本研究選取每批量中的第 1、14、25 片晶圓之測試資料進行管制，並將結果與業界現

行管制方式作比較。首先以主成份分析合併測試的特性資料，由於第一主成份即可以解釋原來 6 個特性資料之 76.88 % 的變異，因此只需選取第一主成份作為所需的管制資料，其線性相關式為：

$$Y=0.2060S+0.1735T+0.1950U+0.206444A+0.19024C+0.2051AD$$

其中 S 、 T 、 U 、 AA 、 AC 與 AD 表示管制的品質特性。

接著將所得到的第一主成份依照晶圓上的五個量測點的量測位置分成五類，亦即將五個量測點視為欲管制的品質特性並建構 Hotelling T^2 多變量管制圖，如圖 1 所示：

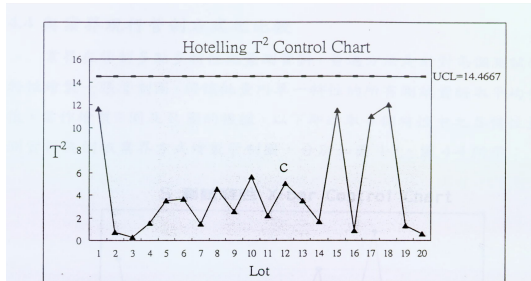


圖 1、以第一主成份繪製之 Hotelling T^2 管制圖

由上圖之 Hotelling T^2 多變量管制圖可以得知，所有的資料皆在管制狀態下，而由於第一主成份可以解釋近八成的原始資訊，因此，可以第一主成份來管制整體製程平均值的偏移。由管制果得知，這 20 批晶圓在此 6 個量測特性的品質是受到肯定的。此實例說明只利用 WAT 資料中每批量的第 1、14、25 片晶圓資料作管制，而非該晶圓廠目前採取每批量 25 片晶圓的全檢方式，此管制結果亦與工程人員提供之最後資訊相符，可作為業界在檢驗晶圓時考慮減少檢驗數量的參考。

六、結論

管制多點多特性量測的問題，在管制圖數量方面，只能盡量求精簡，以利判讀。原本業界為了管制一個特性即需繪製一張管制圖，因此，業界若要管制 6 個品質特性則共需繪製 6 張管制圖，但應用本研究所提的方法，只需繪製一張管制圖，確實能夠以監看較少數量的管制圖即可達到管制的實際效益，在縮減管制時間、成本及提昇效率方面有極大的改善。而本研究所發展的方法，經過多種晶圓品質特性、多個量測點之模擬資料測試，並經新竹科學園區一家積體電路廠商提供的實例驗證，證實本法確實能有效地偵測與監控具多特性多量測點品質特性之生產製程。

本研究所構建之研究方法及流程在管制多特性多量測點之資料時確實有以下的貢獻：

1. 能夠找出具有高度相關之測試特性，並以合併資料的方式縮減資料量、提高管制績效。
2. 證明在管制多特性多量測點之資料時，必須考慮各種可能存在的變異，本研究採用 Hotelling T^2 多變量管制圖來管制量測資料，其計算統計量之公式已將資料間的變異性考慮進去，故較業界現行之管制方式更加準確、有效。
3. 本研究所建構之管制流程亦可應用於量測多點

之單一特性資料，或在單點量測多個特性資料之管制。

七、參考文獻

- [1] Chen, Argon. Guo R. S. & Lin Chun, "Statistical Monitoring of Thickness Data Using Bivariate Run Rules", The Seventh International Symposium on Semiconductor Manufacturing, 1998
- [2] Kim K. S., Yum, B. J., "Control Charts for Random and Fixed Components of Variation in the Case Fixed Wafer Locations and Measurement Positions", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 12, No.2, May 1999
- [3] Montgomery, D. C., "Introduction to Statistical Quality Control", 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc
- [4] Runger, G. C., Alt F. B. and Montgomery D. C., "Controlling Multiple Stream Process with Principal Components", International Journal of Production Research, 1996, Vol. 34, No.11, pp. 2991-2999
- [5] Sharma, Subhash, "Applied Multivariate Technique", John Wiley and Sons, Inc, 1996.
- [6] Tracy, N. D., Young J. C., Mason R. L., "A Bivariate Control Chart for Paired Measurements", Journal of Quality Technology, Vol.27, No.4, October 1995, pp.370-6.
- [7] Tracy, N. D., Young J. C., Mason R. L., "Multivariate Control Charts for Individual Observations", Journal of Quality Technology, Vol.24, 1992, pp.88-95.
- [8] Wells, S. W. and Smith J. D., "Making Control Charts Work for You" Semiconductor International, September 1991.