

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫編號：NSC 88-2213-E-009-033

執行期限：87年7月1日至88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

本研究提出一套利用修正卜瓦松良率模式來評估生產多種積體電路產品生產線製造績效的程序，其中包括製造績效指標之推導以及修正卜瓦松模式中參數估計方法之發展。最後本研究以一個新竹科學園區積體電路廠商生產線上之實際資料來說明及驗證本程序的可行性。

關鍵詞：製造績效、積體電路、良率模式、製程缺陷、多樣產品生產線

Abstract

In this study, we present a novel procedure to evaluate the manufacturing performance of multiple production lines. A manufacturing performance index (MPI) is also derived on the basis of a cluster-modified Poisson yield model to measure the degrees of maturity of the products. In addition, two methods, i.e. generic method, regression method, for estimating the parameters in the yield model are also proposed. Moreover, a case study demonstrates the effectiveness of the proposed manufacturing performance index in terms of its ability to evaluate the multiple production lines in IC fabrication.

Keywords: production performance, integrated circuit, yield model, process defect, multiple production lines.

二、緣由與目的

以代工為導向的積體電路廠商，為因應目前科技不斷地進步和顧客的要求日益增多，其生產線生產的產品必須多樣化，此時若要衡量生產線的製造績效將會

相當困難。因此本研究欲提出一套程序以衡量不同產品間、不同生產線間及不同廠商間的產品優劣與製造能力。

三、結果與討論

1. 緒論

代工型積體電路 (integrated circuit ; IC) 廠商以虛擬工廠的觀念，專注於 IC 晶片的製造，故必須承接多種類產品訂單，使整體收入增加，但此時生產線產品的複雜化將導致生產線製造績效衡量與產品成熟度評比的困難。

一般而言，生產線的製造能力可反映在製程缺陷數 (defect counts) 上。缺陷的分類見[1]，一般所討論的製程缺陷大都是指隨機缺陷 (random defect) 這一類，製程缺陷實體化後出現在產出的產品上時才構成所謂的良率問題，故製程缺陷數可用來表達製造能力的強弱。但由於缺陷群聚 (defect clustering) [1] 現象的影響，缺陷數與實際良率的對應性便複雜化了。因此，簡單地比較缺陷數或缺陷密度並不能表現製造績效之高低。

2. 良率模式文獻探討

良率依定義為一片晶圓上可正常運作的晶片比率，換言之，良率就是得到一片可正常運作的晶片之機率。良率與產品參數、製程參數間的函數關係便稱為良率模式。良率模式的分類方式有很多種，其中一種分類是分為複合良率模式 (composite yield model) 和層級良率模式 (layered yield model) [2]。複合良率模式是以複合晶片 (composite chip) 的觀念和缺陷平均數作為預測良率的基礎；層級良

率模式則認為良率是各層級良率的乘積，而各層級良率只受一種缺陷的影響。本研究所應用的修正卜瓦松良率模式是屬於層級良率模式之一種，現對修正卜瓦松良率模式說明如下：

Ferris-Prabhu[2][7]認為有一已知產品存在，稱為參考產品，其良率符合卜瓦松模式，現在在參考產品及新產品的產品及製程參數均已知的條件下，透過全調整因子 σ (overall scale factor)，可建立起新產品的良率模式如下：

$$Y = e^{-\lambda} = e^{-\alpha\lambda_e} = e^{-\sigma D_e A_e} = Y_e^\sigma \quad (1)$$

其中 λ 表示此新產品的平均缺陷數， λ_e 、 D_e 及 A_e 分別為參考產品的平均缺陷數、平均缺陷密度及面積。

並且，當晶片之層級數相等時，全調整因子由三個個別因子所組成，分別是面積調整因子 α (area scale factor)、敏感度調整因子 ψ (sensitivity scale factor)及複雜度調整因子 ξ (complexity scale factor)。現對此三因子分別解釋如下：

(1) 面積調整因子 α

為了解釋晶片面積變大時產生平均缺陷數增加的效應，提出面積調整因子以適當反應面積對平均缺陷數的影響。面積調整因子的表示如下：

$$\alpha = \left(\frac{A}{A_e} \right)^{1-b}, \quad 0 \leq b \leq 1 \quad (2)$$

(2) 敏感度調整因子 ψ

IC 產品對缺陷的敏感程度會影響失效的數目。故將敏感度定義為所要預測產品與參考產品之失效機率的比值。經數學推導得此因子的表示式如下：

$$\psi = \frac{\Phi}{\Phi_e} \cong \left(\frac{w_e}{w} \right)^{p-1} \quad (3)$$

其中 Φ 表示預測產品失效機率， Φ_e 表示參考產品失效機率， w 表示預測產品線寬， w_e 表示參考產品線寬。

(3) 複雜度調整因子 ξ

IC 產品的複雜度對失效總數有一定的影響，越複雜的產品就會產生越多的缺陷數，可是複雜度是很難客觀衡量出的。

由此可推知層級數相等時的全調整因子表示如下：

$$\sigma_1 = \alpha \times \psi \times \xi = \xi \times \left(\frac{A}{A_e} \right)^{1-b} \times \left(\frac{w_e}{w} \right)^{p-1} \quad (4)$$

當層級數不等時，因層級良率模式是各層級良率的乘積，所以缺陷數與層級數呈等比例增加，故調整因子可改寫成下式：

$$\sigma_2 = \xi \times \left(\frac{N}{N_e} \right) \times \left(\frac{A}{A_e} \right)^{1-b} \times \left(\frac{w_e}{w} \right)^{p-1} \quad (5)$$

其中 N 表示層級數目。在利用參數估計法估計參數時， ξ 為主觀判斷值，可視為誤差值併入估計中。

在本研究中，全調整因子是一個將參考產品的平均缺陷數加以轉換的「轉換函數」，而修正卜瓦松模式則建議此函數中相關、重要的變數。所以如果我們以更一般性的觀點來看全調整因子的話，全調整因子可視為層級數、面積、線寬、週期時間等等製程參數的函數，如(6)式所示，如此更可表現全調整因子的意義。

$$\sigma_3 = f\left(\frac{N}{N_e}, \frac{A}{A_e}, \frac{w_e}{w}, \frac{T}{T_e}, \dots \right) + \varepsilon \quad (6)$$

3. 製造績效指標之推導

假設現有 n 個不同產品，其中至少有一種產品可當作參考產品，且每個產品的製程、產品參數與實際良率皆已知。因此，參考產品的良率模式為 $Y_e = e^{-\lambda_e}$ ，也就是平均缺陷數為

$$\lambda_e = -\ln Y_e \quad (7)$$

接著利用這 n 筆資料來估計修正卜瓦松良率模式中的參數，也就是估計全調整因子。首先，由(1)式可得全調整因子為：

$$\sigma = -\ln Y / \lambda_e = -\ln Y / D_e A_e \quad (8)$$

合併(8)式與(5)式，全調整因子可改寫為：

$$\sigma_2 = -\ln Y / \lambda_e = \frac{N}{N_e} \times \left(\frac{A}{A_e} \right)^{1-b} \times \left(\frac{w_e}{w} \right)^{p-1} + \varepsilon \quad (9)$$

合併(8)式與(6)式，全調整因子亦可改寫為：

$$\sigma_3 = -\ln Y / \lambda_e = f\left(\frac{N}{N_e}, \frac{A}{A_e}, \frac{w_e}{w}, \frac{T}{T_e}, \dots\right) + \varepsilon \quad (10)$$

因此推估全調整因子的方法有以下兩種：

1. 應用(9)式來估計全調整因子的函數。本研究使用牛頓高斯法 (Gauss-Newton method) 來估計非線性函數的參數值。
2. 應用(10)式來適配全調整因子的函數。本研究使用迴歸分析法來求得變數間的關係。

在求得修正卜瓦松模式的全調整因子之估計值 $\hat{\sigma}$ 後，各產品的良率預估模式就可以表示成： $\hat{Y}_i = e^{-\hat{\sigma}_i A_i D_e}$ ， i 表示第 i 個產品。

在生產線製程穩定的情況下，製程缺陷密度也應該呈現某種穩定的情況，因此根據各產品良率模式推算出來的良率，其意義為：「在生產環境特性不變、材料來源穩定且製程平穩下，生產此產品應該達到的良率。」如果某生產線生產 i 產品的良率為 Y_i ，則其相對缺陷密度 RD_i 可定義為： $RD_i = -\ln Y_i / \sigma_i A_e$ (11)

其中 RD_i 之意義為若以本條生產線生產 i 產品的情況來生產參考產品時，所得到的平均缺陷密度值。

最後，本研究所推導出之多樣產品生產線製造績效指標 (manufacturing performance index for multiple production lines；MPI) 可定義為：

$$MPI_i = D_0 - RD_i \quad (12)$$

此製造績效指標是一個相對的衡量標準，它將生產不同產品之生產線的表現轉換為生產同一種產品 (參考產品) 的表現，且將生產線的實際製造能力與期望表現的差異，以單位面積缺陷密度的差異來表示。

在本研究所建構的全調整因子關係式(9)式或(10)式中，可假設誤差項 ε 符合 $NID(0, \sigma^2)$ ，故我們可以根據 [9] 的誤差項變異數估計公式計算出誤差項變異數的估計值，進而推估出全調整因子 σ_i 的 $(1-\alpha)100\%$ 信賴區間 (confidence interval) 之上、下限 $\sigma_{i,H}$ 與 $\sigma_{i,L}$ ，然後將此 $\sigma_{i,H}$ 值

與 $\sigma_{i,L}$ 值各代入(11)式，可得到相對缺陷密度 RD_i 的上、下限如下：

$$RD_{i,H} = -\ln Y_i / \sigma_{i,L} A_e \quad (13)$$

$$RD_{i,L} = -\ln Y_i / \sigma_{i,H} A_e \quad (14)$$

由(13)、(14)式可進而推導出多樣產品之各生產線製造績效指標的上、下限如下：

$$MPI_{i,H} = D_0 - RD_{i,L} \quad (15)$$

$$MPI_{i,L} = D_0 - RD_{i,H} \quad (16)$$

根據(15)、(16)式，製造績效指標之判斷準則可訂為：

- (1) 當 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 均為正時，表示至少有 $(1-\alpha)100\%$ 的機率，此生產線生產 i 產品的製造能力比期望的水準還好，且 $MPI_{i,L}$ 值愈大表示製造能力愈好。
- (2) 當 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 均為負時，表示至少有 $(1-\alpha)100\%$ 的機率，此生產線生產 i 產品的製造能力未達期望目標。
- (3) 當 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 一正一負時，表示至少有 $(1-\alpha)100\%$ 的機率，此生產線生產 i 產品的製造能力與期望的水準並沒有顯著差異。

4. 製造績效評估程序

在推導出多樣產品生產線製造績效指標後，本研究之多樣產品生產線製造績效評估程序的建構步驟可彙整如下：

步驟 1：建立良率模式資料庫。

此資料庫需包含適當數量的過去製程穩定、成熟度高的產品資料，資料項目包括光罩數目、製程步驟數、臨界線寬或最小線寬、晶片面積、週期時間等。

步驟 2：選擇參考產品並計算其平均缺陷數。

步驟 3：估計修正卜瓦松良率模式參數值，建立各產品的良率模式。

步驟 4：計算 MPI_i 、 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 。

步驟 5：依據各 MPI_i 、 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 的結果做比較及結論。

5. 實例驗證

現以新竹科學園區某 IC 代工工廠實際資料來說明如何應用本研究所建構之製造績效評估程序。

步驟 1：由過去生產資料中，共篩選出 19 種製程穩定、產品成熟度高的 6 吋晶圓產品，將這些產品資訊建構成良率模式資料庫。資料庫如表 1。

步驟 2：依參考產品的決定條件，選擇產品 19 為參考產品。計算其平均缺陷數為： $\hat{\lambda}_e = -\ln Y_e = 0.12556$ 。

步驟 3：

<1>應用參數估計方法 1. 得到函數的參數 b 與 p 的估計值各為 0.40737 與 1.14958，因此可得全調整因子的函數如下：

$$\hat{\sigma}_i = \frac{N_i}{13} \times \left(\frac{0.8}{w_i} \right)^{0.14958} \times \left(\frac{A_i}{0.1325} \right)^{0.5926} \quad (R^2 \cong 0.68) \quad (17)$$

<2>應用參數估計方法 2. 建立變數間的關係如下：

$$\hat{\sigma}_i = 1.4655 - 1.5603 \times \left(\frac{N_i}{13} \right) + 0.3452 \times \left(\frac{A_i}{0.1325} \right) + 0.9308 \times \left(\frac{0.8}{w_i} \right) \quad (R^2 \cong 0.79) \quad (18)$$

表 1 良率模式資料庫

產品代號	最小線寬 (μm)	光罩數目	晶片面積 (cm^2)	產品良率 (%)*
1	1.0	11	0.0795	84.0
2	0.8	13	0.1721	83.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	0.8	13	0.1325	88.2

*：為各批產品良率的平均值（統計期間為半年）。

現比較<1>、<2>的結果如表 2。因方法 2. 有較好的適配結果 ($R^2 \cong 0.79$)，所以我們選擇方法 2. 的參數估計值來建立各產品的良率模式： $\hat{Y}_i = e^{-0.12556\hat{\sigma}_i}$ 。

表 2 二估計方法的結果比較

	方法 1.	方法 2.
殘差平方和	0.019278	0.012045
模式解釋能力 R^2	0.68	0.79

步驟 4：應用步驟 3 的良率模式計算各產品的 MPI_i 、 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 如表 4。其中

參考產品缺陷密度 $D_0 = \lambda_0 / A_0 = 0.9476$ ，且顯著水準設為 0.05。

表 4 各產品的 MPI_i 及其 95% 之信賴上、下限

產品代號(i)	MPI_i	$MPI_{i,L}$	$MPI_{i,H}$
1	-0.2123	-3.4851	0.2804
2	-0.0834	-1.4857	0.2935
⋮	⋮	⋮	⋮
18	0.0623	-0.2288	0.2379

步驟 5：由表 4 可知各產品的 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 均是一正一負，所以各生產線的實際製造能力與期望水準相差不大。

假設現有一新產品其良率為 65%、最小線寬為 $0.8 \mu m$ 、光罩數目為 12 層、晶片面積 $0.5 cm^2$ ，則可利用上述推導出的指標評估此生產線目前的製程狀況。將資料代入(18)式可求得本產品的 $MPI_{i,H}$ 與 $MPI_{i,L}$ 各為 -0.1178、-1.1528，由此可知本生產線製造能力尚未達到期望水準。

四、計畫成果自評

台灣的積體電路廠商多以代工為主，因此其生產線常須生產多樣化之 IC 產品。而以往以良率或缺陷數來衡量生產線績效的方式只能用於評估生產單一產品之生產線的績效，不能適用於評估生產多樣產品之生產線，因此本研究利用修正卜瓦松良率模式考量製程、產品參數的優點，成功地提出一套有效的評估多樣產品生產線製造績效的程序。並以實例顯示此程序在多樣產品生產環境中的可行性。故與原計畫內容和預期達成的目標充分相符合，而且所建構出的程序可做為業界實際評估生產線之績效時的重要參考。

五、參考文獻

1. Stapper, C. H., "The effects of wafer to wafer density variation on integrated circuit defect and fault distributions," *IBM Journal of Research Development*, **29**, 87-97 (1985).
2. Ferris-Prabhu, A. V., *Introduction to*

- Semiconductor Device Yield Modeling*,
Artech House (1992).
3. Ferris-Prabhu, A. V., "A cluster-modified Poisson model for estimating defect density and yield," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **3**, 54-59 (1990).
 4. Montgomery, D. C. and Peck, E. A., *Introduction to Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons, New York, NY, 129&427. (1992).