

# IC 多樣產品之生產線製造能力評估

謝昆霖<sup>1</sup> 唐麗英<sup>2</sup> 謝仲杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南華大學資訊管理研究所

<sup>2</sup>國立交通大學工業工程與管理學系

## 摘要

積體電路廠商為因應顧客需求的不同，其生產線生產的產品會逐漸朝向多樣化發展，一般 IC 廠商在衡量各生產線的製造能力時，通常是以良率或是缺陷密度為其評估指標，尤其是良率指標，因可直接反映成本，已成為多數 IC 廠評估製造能力的重要指標。但是當某生產線的良率高於其他生產線的良率，即表示此生產線的製造能力較強的這種觀念，基本上是適用於生產同產品的不同生產線間製造績效的評比；如果要評估生產多樣產品生產線的製造績效時，必然會受到生產環境的製造參數在各生產線的不同影響，若單純地僅以良率來表達製造績效就很容易導致決策判斷的偏誤。例如：同樣的缺陷數目、大小及分佈，對有複雜製程的產品所造成的良率損失就比對簡單製程所造成的損失要來得高。因此本研究將提出一個適切的製造績效評估指標，此績效指標是植基於修正卜瓦松良率模式所發展出來的。本研究也將以台灣新竹科學園區的一個 IC 廠商生產線上之實際資料來說明及驗證方法的可行性。

關鍵詞：製造能力、積體電路、良率模式、多樣產品生產線。

## 壹、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，但此時生產線所生產產品的多樣化和複雜化將導致生產線製造績效衡量困難。

良率(yield)與生產週期(cycle time)是積體電路廠商最重視的兩項獲利指標。良率直接影響製造成本，是一個最基本的衡量生產績效的工具，產品有高良率即代表著有高競爭力、高製造能力以及高品質。透過良率分析，廠商可以衡量目前生產線的製造表現與產品的成熟度，做為改善生產線、產品製程或設計的依據，以達到提升良率的目的，並且經由預測良率可以較正確地決定成本的定價與生產策略的重點。積體電路產品的良率可以下式表示

[1]：

$$Y_{\text{overall}} = Y_{\text{line}} \times Y_{\text{die}} \times Y_{\text{assembly}} \times Y_{\text{final\_test}} \times Y_{\text{quality}} \dots \dots \dots (1)$$

其中， $Y_{\text{overall}}$  表示實際 IC 成品的良率； $Y_{\text{line}}$  表示生產線上晶圓的良率； $Y_{\text{die}}$  表示晶圓上晶片的良率； $Y_{\text{assembly}}$  表示組裝過程的良率； $Y_{\text{final\_test}}$  表示產品最後測試的良率； $Y_{\text{quality}}$  表示產品品質的良率。

在這麼多種類的良率中，晶圓測試良率(wafer test yield)(即  $Y_{\text{die}}$ ) 比起其他良率而言，較不易決定，但是對生產率(productivity)的影響又是最直接的，因此  $Y_{\text{die}}$  是決定生產成本的主要因素；此外在一般研究 IC 良率的文獻中，也是多以  $Y_{\text{die}}$  為討論對象，基於這兩點理由，本研究所指的良率便是指晶圓測試良率。

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 [2], 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) [2] 現象的影響, 缺陷數與實際良率的相對性便複雜化了。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。

目前半導體技術一日千里, 依據摩爾定律 (Moore's law) 所宣稱的: 電腦運算能力每十八個月成長一倍, 積體電路的元件密度勢必快速提高、晶片面積加大、複雜度也相對提升甚多, 並且依據不同功能設計的晶片也將更加多樣化, 故如果單純以產出良率來表達生產不同產品生產線的製造能力時, 就會無法兼顧到許多製程與產品參數本質上的差異而產生評估錯誤的情形。

因此本研究針對良率與缺陷數這兩指標在評估生產多樣產品生產線製造績效上的缺點, 利用修正卜瓦松良率模式提出一套評估生產線製造績效的程序。在本程序中我們將建立一個可衡量多樣產品生產線製造能力的指標, 並且也提出了良率模式中參數估計的方法。下一節中, 我們對積體電路的良率模式作一回顧。

## 貳、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) [3]。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。

### 2.1 複合良率模式

最早發展出的良率模式是二項模式 (binomial model) 與卜瓦松模式 (Poisson model), 由於卜瓦松模式的性質更適用於描述空間上缺陷的分佈, 故往後良率模式皆以此為發展的主軸。

卜瓦松模式是根據缺陷呈卜瓦松機率分佈的假設發展而來, 此模式假設缺陷在晶圓上任一位置出現的機率都是相等且獨立的, 由此可推知平均缺陷密度與平均缺陷數是固定常數。因此, 一個晶片上有  $k$  個缺陷的機率為:

$$P(K) = e^{-\lambda_0} \lambda_0^k / k!, \quad k = 0, 1, 2, \dots (2)$$

其中  $\lambda_0$  是晶片上平均缺陷數, 為平均缺陷密度  $D_0$  與晶片面積  $A$  的乘積。

卜瓦松良率模式可定義為:

$$Y_1 = P(k = 0) = e^{-\lambda_0} = e^{-AD_0} \dots \dots \dots (3)$$

在晶片面積小於  $0.25\text{cm}^2$  時, 此良率模式可以合理地估計良率值, 但當晶片面積變大時, 此模式便會低估良率 [1]。至於造成此情況的原因是: 在小面積晶片裡, 缺陷群聚通常會比晶片面積大, 所以晶片間的缺陷密度變化並不顯著而維持一定值; 可是當晶片面積增大時, 這種群聚現象就會造成缺陷密度明顯地變化。Murphy [4] 首先發現缺陷密度並非固定值, 他認為缺陷密度  $D$  是一變數且應服從機率分佈  $f(D)$ , 所以他提出晶片上發生  $k$  個缺陷的機率密度函數應為:

$$P(X = k) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} f(\lambda) d\lambda$$

, 或者

$$P(X = k) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-AD} (AD)^k}{k!} f(D) dD \dots\dots\dots(4)$$

由此可得良率模式：

$$Y = P(X = 0) = \int_0^{\infty} e^{-AD} f(D) dD = E(e^{-AD}) \dots\dots\dots(5)$$

Murphy 認為常態分佈最能適當描述  $f(D)$ ，但因計算困難，所以他提議以三角分佈 (triangular distribution) 來近似。另外再假設  $f(D)$  為均等分佈 (uniform distribution)，以比較不同  $f(D)$  對良率的影響。於是得到兩個良率模式分別為：

$$Y_2 = \left( \frac{1 - e^{-AD_0}}{AD_0} \right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$Y_3 = \frac{1 - e^{-2AD_0}}{2AD_0} \dots\dots\dots(7)$$

其中  $D_0 = E(D)$ 。

在 Murphy 提出式(5)後，尋找良率模式的工作便變成是尋找適當的  $f(D)$  了。一般將經由式(5)導出的良率模式稱做複合卜瓦松模式 (compound Poisson model)，而  $f(D)$  則稱作複合子 (compounder) [5]。複合子以 Gamma 函數代入所導出的模式稱為負二項良率模式 (negative binomial model) [6]：

$$Y_4 = \left( 1 + \frac{AD_0}{\alpha} \right)^{-\alpha} \dots\dots\dots(8)$$

此模式深具彈性，只要調整形狀參數 (shape parameter)，或稱為群聚參數 (cluster parameter)  $\alpha$  ( $1 < \alpha < \infty$ ) 便可形成不同的良率模式，以便解釋不同程度的群聚現象。負二項模式的應用甚廣，包括良率預測、修復電路計畫訂定、最適區域分割等方面。但在實際應用負二項模式預測良率時，如果使用晶片實際面積，將會造成低估良率的現象，故需以敏感區域 (critical area) 面積代替，此乃由於並非所有的缺陷都會造成良率損失之故 [7]，因此負二項良率模式在實際應用時有其困難處。

另外，Seeds 提出複合子為指數分佈，形成的良率模式稱為指數良率模式：

$$Y_5 = \frac{1}{1 + AD_0} \dots\dots\dots(9)$$

**2.2 層級良率模式**

層級良率模式認為不論使用何種良率模式，晶片良率是各層級良率的乘積，這些層級可視為一道製程或一次光罩程序。因此，每一層級的缺陷平均數總和須等於所有種類缺陷總和的平均 [3]，即

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i, N \text{ 為層級數目} \dots\dots\dots(10)$$

此結果含有兩種意義：

- (i) 如果要使用層級模式來做預測，那麼預設的良率模式須符合個別層級良率的乘積等於晶片良率的假設，否則此良率模式是不正確的。
- (ii) 晶片缺陷數並不像缺陷密度，它是一個

無次元 ( dimensionless ) 的數值，或稱為純數。

根據第一種意義，唯有卜瓦松模式符合此條件。但研究結果卻又顯示出卜瓦松模式低估實際良率值。Ferris-Prabhu [3][8]認為是因為晶片平均缺陷數的推導不適當所致。所以他提出一套調整規則 ( scaling rule )，建議利用參考產品 ( reference product ) 的平均缺陷數適當地調整為預估產品的平均缺陷數，以正確地預測新產品之良率。依此種方式推導出的模式即稱為修正卜瓦松模式 ( modified Poisson model )。

### 2.3 修正卜瓦松良率模式

此模式假設有一已知產品存在，稱為參考產品，其良率符合卜瓦松模式，而且關於參考產品及新產品的產品及製程參數均已知，則透過全調整因子  $\sigma$  ( overall scale factor )，我們就可建立起新產品的良率模式如下：

$$Y = e^{-\lambda} = e^{-\sigma\lambda_e} = e^{-\sigma D_e A_e} = Y_e^\sigma \quad (11)$$

其中  $\lambda$  表示此新產品的平均缺陷數， $\lambda_e$ 、 $D_e$  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。

當良率模式之層級數相等時，全調整因子由三個個別因子所組成，分別是面積調整因子  $\alpha$  ( area scale factor )、敏感度調整因子  $\psi$  ( sensitivity scale factor ) 及複雜度調整因子  $\xi$  ( complexity scale factor )。現將此三因子分別解釋如下：

#### (1) 面積調整因子 $\alpha$

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：

$$\alpha = \left( \frac{A}{A_e} \right)^{1-b}, \quad 0 \leq b \leq 1 \quad (12)$$

其中  $b$  的意義是因群聚現象導致缺陷密度偏離固定值的程度。當  $b$  等於 0 時，表示無群聚現象發生，也就是缺陷密度為一固定值；當  $b$  等於 1 時，表群聚現象最嚴重；當  $b$  大於 1 時，表示面積較大的晶片比面積較小的晶片平均缺陷數少，但目前尚無此種現象發生。

#### (2) 敏感度調整因子 $\psi$

IC 產品對缺陷的敏感程度會影響失效的數目，也就是當缺陷發生時，越敏感的產品越有機會發生失效。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。經數學推導可得此因子的表示式如下：

$$\psi = \frac{\Phi}{\Phi_e} \cong \left( \frac{w_e}{w} \right)^{p-1} \quad (13)$$

其中  $\Phi$  表示預測產品失效機率， $\Phi_e$  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 $\xi$

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，一般均是藉助工程經驗主觀且合理地給定一個值，此值大約介於 0.90 和 1.10 之間。

由此可推知層級數相等時的全調整因子表示如下：

$$\sigma = \alpha \times \psi \times \xi = \xi \times \left( \frac{A}{A_e} \right)^{1-b} \times \left( \frac{w_e}{w} \right)^{p-1} \dots\dots\dots(14)$$

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，故調整因子改變成下式：

$$\sigma = \xi \times \left(\frac{N}{N_e}\right) \times \left(\frac{A}{A_e}\right)^{1-b} \times \left(\frac{w_e}{w}\right)^{p-1} \dots\dots\dots(15)$$

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

**參、製造績效指標 (MCI) 與製造能力評估程序**

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。其中參考產品的條件有二：

- 1.成熟產品。代表達到製程、產品的穩定狀態。
  - 2.晶片面積小的產品。參考產品需符合卜瓦松模式，故晶片面積最好小於  $0.25cm^2$ 。
- 在此假設下，參考產品的良率模式為：

$Y_e = e^{-\lambda_e}$ ，也就是平均缺陷數為：

$$\lambda_e = -\ln Y_e \quad (16)$$

接著利用這  $n$  個資料進行修正卜瓦松良率模式的參數估計，也就是全調整因子的參數估計。首先，由(10)式可得全調整因子為：

$$\sigma = -\ln Y / \lambda_e = -\ln Y / D_e A_e \quad (17)$$

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...等產品、製程參數的函數，如此更可表現全調整因子的意義。

$$\sigma = f\left(\frac{N}{N_e}, \frac{A}{A_e}, \frac{w_e}{w}, \frac{T}{T_e}, \dots\right) \quad (18)$$

合併(16)式、(17)式與(18)式，得到欲估計參數的函數為：

$$\sigma = -\ln Y / \lambda_e = f\left(\frac{N}{N_e}, \frac{A}{A_e}, \frac{w_e}{w}, \frac{T}{T_e}, \dots\right) \quad (19)$$

(19)可以使用迴歸分析來求得一個預測函數。在求得修正卜瓦松模式之全調整因子後，各產品的良率模式就可以表示成：

$Y_i = e^{-\sigma_i A_i D_i}$ ， $i$  表示第  $i$  個產品。現以流程圖來表示良率模式的推導過程，如圖一所示。

在生產線製程穩定的情況下，製程缺陷特性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：

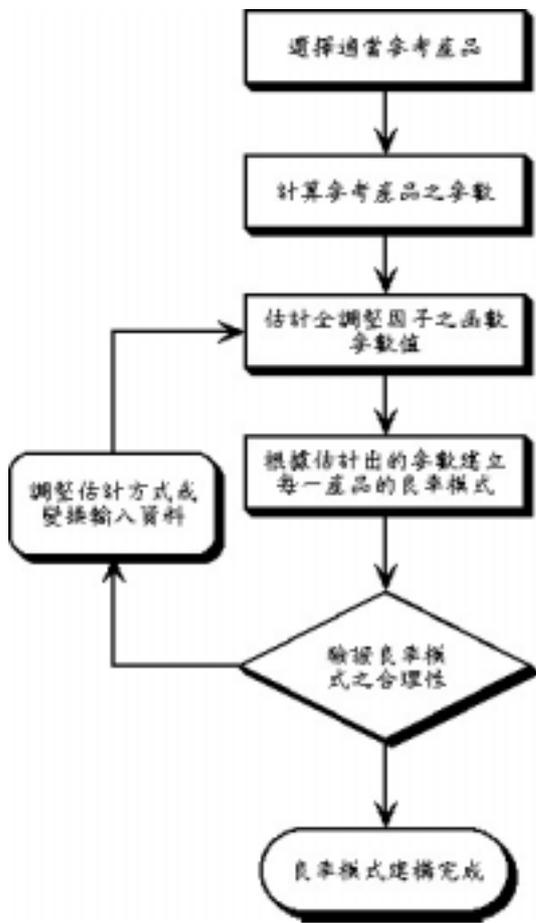
$$RD_i = \frac{-\ln Y_i}{\sigma_i A_i} \quad (20)$$

其  $RD_i$  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 capability index, MCI ) 為：

$$MCI_i = (D_0/RD_i) \quad (21)$$

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。



圖一 產品良率模式的推導流程

MCI 之意義可說明如下：

- (1)  $MCI_i > 1$ : 表示本生產線生產  $i$  產品的製造能力比期望的水準還好。  $MCI_i$  值愈大，就表示生產線的製造能力愈好。

- (2)  $MCI_i = 1$ : 表示本生產線生產  $i$  產品的製造能力達到期望水準。

- (3)  $MCI_i < 1$ : 表示本生產線生產  $i$  產品的製造能力尚未達到期望的目標，其製造能力尚有提升的空間，必須進一步追查原因加以改善。  $MCI_i$  值愈小，就表示生產線的製造能力愈差。

在推導完多產品線製造績效指標後，本研究所提出之製造績效的評估程序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，並建立參考產品的良率模式。**

**步驟 4：以實際良率和預測良率的誤差結果選定最佳的參考產品。**

**步驟 5：計算所欲評估的產品之製造能力指標  $MCI_i$ ，再依據  $MCI_i$  的結果做結論建議。**

**肆、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，現有一新產品其良率為 72%、最小線寬為  $0.8\mu m$ 、光罩數目為 12 層、晶片面積  $0.5cm^2$ ，利用上述推導出的指標及程序來評估該生產線目前的製程狀況。

**步驟 1：經與現場資深工程師討論後由過去生產資料中，共篩選出 19 種製程穩定、產品成熟度高的晶圓產品，將這些產品資訊建構成良率模式**

資料庫 ( 參數包含最小線寬、光罩數目、晶片面積、該產品過去的平均良率值 )，資料庫如表 1。

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 <sup>2</sup> )	產品良率(%) *
1	1.0	11	0.0795	84.0
2	0.8	13	0.1721	83.4
3	1.2	13	0.2524	85.2
17	0.8	13	0.6776	67.2
18	0.8	13	0.8197	70.2
19	0.8	13	0.1325	88.2

\*：為各批產品良率的平均值。

步驟 2：依參考產品的決定條件，選擇產品 1, 2, 19 為候選之參考產品。接著計算個別之平均缺陷數為：

$$\lambda_e = -\ln(Y_e) = 0.17435 \quad (\text{產品 1})$$

$$\lambda_e = -\ln(Y_e) = 0.18152 \quad (\text{產品 2})$$

$$\lambda_e = -\ln(Y_e) = 0.12556 \quad (\text{產品 19})$$

步驟 3：

<產品 1>：

應用簡單線性迴歸方法建構出線性迴歸模式(該模式適配時，需扣除產品 1 的資料，故僅以良率資料庫中的其它 18 個產品資料來進行模式適配)：

$$\hat{\sigma}_i = -0.41139 + 0.485701 \times \left(\frac{N_i}{11}\right) + 0.17 \times \left(\frac{A_i}{0.0795}\right) + 0.25379 \times \left(\frac{1.0}{w_i}\right) \dots\dots\dots(22)$$

$$R^2 = 0.83474$$

其產品的良率模式： $Y_i = e^{-0.174353\sigma_i}$ 。

<產品 2>：

應用簡單線性迴歸方法建構出線性迴歸模式(該模式適配時，需扣除產品 2 的資料，故僅以良率資料庫中的其它 18 個產品資料來進行模式適配)：

$$\hat{\sigma}_i = 1.822078 - 1.6835 \times \left(\frac{N_i}{13}\right) + 0.52046 \times \left(\frac{A_i}{0.1721}\right) + 0.625584 \times \left(\frac{0.8}{w_i}\right) \dots\dots\dots(23)$$

$$R^2 = 0.81374$$

其產品的良率模式： $Y_i = e^{-0.18152\sigma_i}$ 。

<產品 19>：

應用簡單線性迴歸方法建構出線性迴歸模式(該模式適配時，需扣除產品 19 的資料，故僅以良率資料庫中的其它 18 個產品資料來進行模式適配)：

$$\hat{\sigma}_i = 1.4655 - 1.516 \times \left(\frac{N_i}{13}\right) + 0.345243 \times \left(\frac{A_i}{0.1325}\right) + 0.930761 \times \left(\frac{0.8}{w_i}\right) \dots\dots\dots(24)$$

$$R^2 = 0.7945$$

其產品的良率模式： $Y_i = e^{-0.12556\sigma_i}$ 。

步驟 4：應用步驟 3 的各參考產品所建立的良率模式來推測資料庫中其它產品的良率(扣除候選參考產品 1, 2,

19)，接著計算出其整體良率誤差值並選擇具有最小的整體良率誤差值的產品為本案的最佳之參考產品（結果如表 2 所示），根據結果顯示應該選取產品 1 為本案之最佳參考產品。

表 2 三個參考產品效果比較表

	參考產品 1	參考產品 2	參考產品 19
R2	0.83474	0.813741	0.79450
整體良率誤差值 (實際良率-預測良率)	0.02897*	0.04744	1.58534

**步驟 5：**根據步驟 4 所選定的參考產品 1，計算本例產品的 MCI 為 0.799(< 1)、預測良率為 0.76921，由此可知本生產線製造能力尚未達到期望水準，換言之，該產品尚不屬於成熟產品，製程仍有加強改善的空間。

## 陸、結論

本研究利用修正卜瓦松良率模式將製程、產品參數納入考量，並設計一適切的製造能力評估指標以及一多產品生產線製造績效的評估程序，克服以往僅以良率或缺陷數為績效衡量指標的缺失，透過實例顯示此方法在多樣產品生產環境中的可行

性。

## 參考文獻

- 【1】J. A. Cunningham, “The use and evaluation of yield models in integrated circuit manufacturing”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 3, 60-71 (1990).
- 【2】C. H. Stapper, “The effects of wafer to wafer density variation on Integrated circuit defect and fault distributions,” *IBM Journal of Research Development*, 29, 87-97 (1985).
- 【3】A. V. Ferris-Prabhu, *Introduction to Semiconductor Device Yield Modeling*, Artech House (1992).
- 【4】B. T. Murphy, “Cost-size optima of monolithic Integrated circuits”, *Proceedings of the IEEE*, 52, 1537-1545 (1964)
- 【5】M. Raghavachari, Aparna Srinivasan, Pasquale Sullo, “Poisson mixture yield models for Integrated circuits: a critical review”, *Microelectron Reliability*, 37, 565-580 (1997).
- 【6】S. Kikuda, H. Miyamoto, “Optimized redundancy selection based on failure-related yield model for 64Mb DRAM and beyond”, *IEEE of Journal of Solid State Circuits*, 26, 1550-1555 (1991).
- 【7】A. V. Ferris-Prabhu, “Modeling the critical area In yield forecasts”, *IEEE of Journal of Solid State Circuits*, 20, 874-878 (1985).
- 【8】A. V. Ferris-Prabhu, “A cluster-modified Poisson model for estimating defect density and yield”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 3, 54-59 (1990).