

國立交通大學

碩士論文

使用費洛蒙擴散控制器改善關鍵尺寸之變異
Applying Pheromone Propagation Controller to Improve
Lithographic Critical Dimension Variation



指導教授：李安謙 博士

研究生：黎湘鄂

國立交通大學半導體材料與製程設備碩士專班

審查日期：民國九十七年六月五日


使用費洛蒙擴散控制器改善關鍵尺寸之變異

研究生：黎湘鄂

指導教授：李安謙 教授

國立交通大學半導體材料與製程產業研發碩士專班

中文摘要



本論文應用一種新的 Run-to-Run (R2R)製程控制器-費洛蒙擴散控制器(Pheromone Propagation Controller, PPC)以改善微影製程之關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)之變異。首先得到關鍵尺寸與其控制因子-曝光量之關係，藉由迴歸法得到控制模型，經由 PPC 估測器更新每批次之控制式截距項預測值，再透過製程配方產生器來更新製程配方。本論文並已於 300 mm 生產線之 70nm DRAM 製程完成驗證，關鍵尺寸之變異已得到改善。

Applying Pheromone Propagation Controller to Reduce Lithographic Critical Dimension Variation

Student : Hsiang-er Li

Advisor : Dr. An-Chen Lee

Degree Program of Semiconductor Material and Processing Equipment, Nation Chiao Tung
University

ABSTRACT

This thesis presents a new run-to-run (R2R) control scheme to reduce the lithographic critical dimension (CD) variation in photolithography processes. First, the dominative parameter of the lithographic critical dimension, dose, is discovered by experiments and then the process model is fitted by experimental data. This controller, termed 'Pheromone Propagation Controller' (PPC), predicts the bias of the process model through Pheromone Propagation theorem and updates the recipe on each run. In this thesis, PPC is tested in 300mm production line at 70nm DRAM process. The result shows PPC is a good candidate for production run-to-run control.

Key Words: Pheromone Propagation Controller, Run-to-Run Control, Critical Dimension,
Lithography

致 謝

感謝李安謙教授之指導，於 run-to-run 控制器之各種模型之精神與特性有深入淺出之說明；並感謝李安謙實驗室博士班李德修，此論文之 PPC 控制器為其原創，謝謝其許多講解與指導；感謝吳建峰於論文寫作與實驗設計上之諸多指導；並謝謝力晶半導體黃光工程部楊澄圳於實驗上之大力幫忙。



目錄

	頁次
中文摘要	ii
英文摘要	iii
致謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	viii
方程式目錄	x
符號說明	xi
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與目的	1
1.2 文獻回顧	3
1.2.1 先進製程控制	3
1.2.2 群體智能	5
1.2.3 費洛蒙擴散控制器	7
1.3 研究方法	8
1.4 本文組織架構	9
第二章 半導體製程與微影製程介紹	10
2.1 半導體製造流程	10
2.2 微影製程	11
2.3 掃描式曝光機介紹	15
2.4 關鍵尺寸之量測	16
2.5 影響關鍵尺寸之因子	19
第三章 費洛蒙擴散控制法	21
3.1 費洛蒙擴散控制法之概念	21
3.2 PPC 控制系統與模型	23
3.3 截距估測器	25
3.3.1 輸入過濾器與費洛蒙框之產生	25
3.3.2 費洛蒙擴散器	26

3.3.3	偏移量預測器	27
3.3.4	傳遞係數 F 之最佳化	27
第四章	製程說明與模擬	30
4.1	製程說明	31
4.2	模擬步驟與結果	34
4.2.1	訓練資料之模擬結果	34
4.2.2	測試資料之模擬結果	35
4.3	各種干擾之模擬	37
4.3.1	PPC 於各種干擾之模擬	37
4.3.2	於各種干擾下比較 PPC 與 MA5 及 EWMA	39
第五章	實驗結果與討論	41
5.1	實驗步驟	41
5.2	實驗結果	43
5.2.1	PPC 與 MA5 之結果比較	44
5.2.2	EWMA 與 MA5 之結果比較	46
5.2.3	EWMA、MA5 與 PPC 之結果比較	47
5.3	討論	49
第六章	結論與未來工作	50
6.1	討論	50
6.2	未來工作	51
參考文獻	52

表目錄

<u>表編號</u>	<u>表名稱</u>	<u>頁碼</u>
表一	曝光量對應關鍵尺寸之變化	31
表二	模擬一：PPC、MA5 與 EWMA 之訓練資料模擬結果	35
表三	模擬二：PPC、MA5 與 EWMA 測試資料模擬結果	36
表四	PPC 與無 R2R 控制之實驗結果比較	44
表五	PPC 與 MA5 之結果比較	46
表六	EWMA 與 MA5 之結果比較	47
表七	PPC、EWMA 與 MA5 之結果比較	48



圖目錄 LIST OF FIGURES

圖編號	圖名稱	頁碼
圖一	元件尺寸與電路性能變異之趨勢	1
圖二	候鳥之群體飛行	6
圖三	螞蟻覓食路徑	6
圖四	螞蟻的 tandem calling	7
圖五	微影製程步驟	11
圖六	對準誤差測量記號	13
圖七	孔洞形圖像關鍵尺寸	14
圖八	直線形圖像關鍵尺寸	14
圖九	掃描式曝光機動作示意圖	15
圖十	掃描式電子顯微鏡	16
圖十一	掃描式電子顯微鏡圖像之產生	17
圖十二	關鍵尺寸與焦距之關係範例	19
圖十三	費洛蒙傳遞控制法概念圖	22
圖十四	PPC 控制系統方塊圖	24
圖十五	截距估測器	25
圖十六	費洛蒙擴散示意圖	27
圖十七	於線性輸入時，F 值對 Output 之影響	29
圖十八	於線性輸入時，F 值對最終外差結果之影響	29
圖十九	於非線性輸入時，F 值對 Output 之影響	30
圖二十	於非線性輸入時，F 值對最終外差結果之影響	30
圖二十一	關鍵尺寸與與曝光量之關係	32
圖二十二	模擬一：PPC、MA5 與 EWMA 之訓練資料模擬結果	35
圖二十三	模擬二：PPC、MA5 與 EWMA 測試資料模擬結果	36
圖二十四	模擬突波干擾：F=0.1/0.5/0.9	37
圖二十五	模擬漂移干擾：F=0.1/0.5/0.9	38
圖二十六	模擬固定偏移干擾：F=0.1/0.5/0.9	38
圖二十七	模擬突波干擾：PPC 與 MA5、EWMA 之比較	39
圖二十八	模擬漂移干擾：PPC 與 MA5、EWMA 之比較	39

圖二十九	擬固定偏移干擾：PPC 與 MA5、EWMA 之比較	40
圖三十	實驗步驟	42
圖三十一	PPC 實驗結果與無 R2R 控制之比較.....	43
圖三十二	PPC 與無 R2R 控制之結果比較盒鬚圖	44
圖三十三	PPC 實驗結果與 MA5 之比較圖	45
圖三十四	PPC 實驗結果與 MA5 之比較盒鬚圖	45
圖三十五	EWMA 與 MA5 之比較	46
圖三十六	EWMA 與 MA5 之比較盒鬚圖	47
圖三十七	PPC，EWMA 與 MA5 之比較盒鬚圖	48
圖三十八	PPC 實驗結果：加入曝光量	49



方程式目錄

<u>方程式編號</u>	<u>方程式名稱</u>	<u>頁碼</u>
(1)	MA R2R controller 之公式	4
(2)	EWMA R2R controller 之公式	4
(3)	曝光系統依線性關係式	23
(4)	曝光系統控制模型	23
(5)	目標值與 Dose 關係式	23
(6)	下一批曝光量條件之關係式	24
(7)	單一費洛蒙點強度	25
(8)	費洛蒙傳遞方程式	26
(9)	累積之費洛蒙強度	27
(10)	下一批之截距項預測值	27
(11)	CD 與 Dose 之關係	32
(12)	CD 與 Dose 之關係一般式	32
(13)	下一批 Dose 值之產生式	33



符號說明

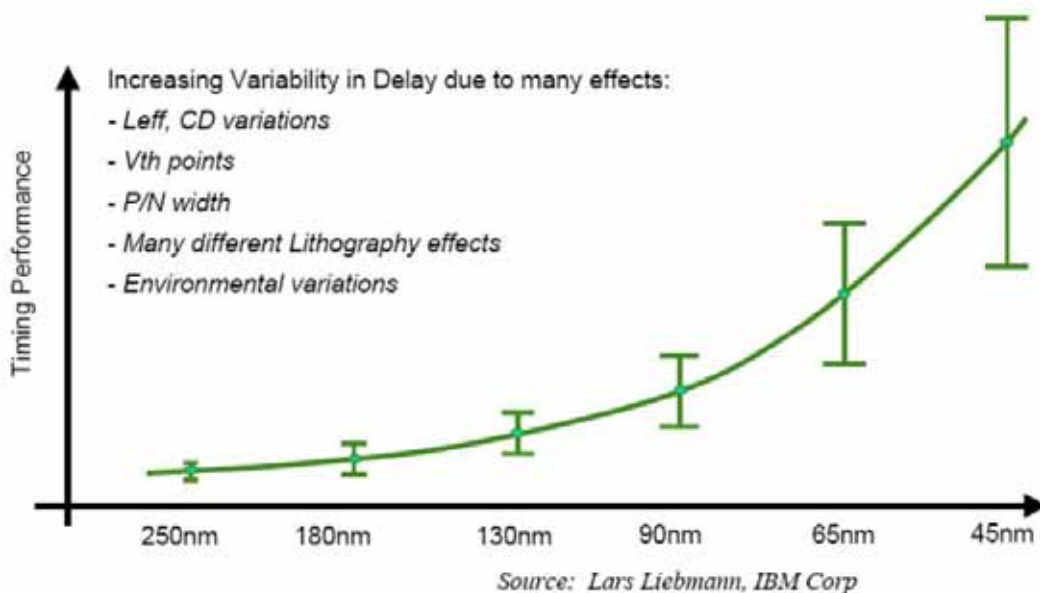
α	截距項
$\hat{\beta}$	系統放大值估計值
β_k	系統放大值真實值
CD_k	第 k 批之 CD 值
$Dose_k$	第 k 批之曝光量
e_k	第 k 批之誤差
\bar{e}	定量之偏移量
F	費洛蒙擴散係數
ε_k	第 k 批之真實截距項
$\hat{\varepsilon}_k$	PPC 預測第 k 批之截距項
η_k	white noise
i	費洛蒙擴散次數
k	第 k 批
M	費洛蒙框大小
m	費洛蒙框點
q	費洛蒙傳遞強度
r	外部輸入參數
s	費洛蒙強度
T	製程 CD 目標值



第一章 緒論

1.1 研究背景與目的

目前先進的半導體製程已全面進入奈米等級(100 nm 以下)，在如此微小尺寸狀況下，因關鍵尺寸之變異所帶來衍生之良率問題，已成為影響良率之主要因子。其主因為同樣程度之製程變異量於大尺寸的狀況下，其變異比例相對較小，而隨著元件尺寸越做越小，此變異量已造成元件與元件間之效能相對變異過大，以致使得不良率(不符規格者)急速上升，如圖一所示。於此情形下，晶圓廠如何控制關鍵尺寸之變異以提升產品的良率，便成為了主要的研究議題。



圖一 元件尺寸與電路性能變異之趨勢

資料來源: Lars Liebmann, IBM

關鍵尺寸之變異可分為兩個主要成分: shot 內(within-shot)之變異及批次間(run-to-run)之變異。其中, shot 內之變異意指單一次曝光內所有關鍵尺寸之變異,例如 90nm 之 DRAM 製程,一次曝光內即包含了數千萬個元件,此 shot 內之變異主要來自機台本身之各種精度總和表現,一般不易透過 R2R(Run-to-Run)控制策略得到改善。

而關於批次間之變異，可再區分為片間差(wafer-to-wafer variation)與片內差(within-wafer variation)兩者，於改善片間差上，半導體廠普遍運用 R2R 之手法，常見的控制器有 MA (Moving Average)，EWMA (Exponentially-Weighted Moving Average)[23]，dEWMA (double-EWMA)[24]。而於片內差之 R2R 補償上之運用仍不多見，這主要由於片內差之變異在多數製程上占總變異之比例相對較小，且並無適當 R2R 之手法，因此並非業界之首要改善標的，而隨著製程日趨精密，片內差之變異改善有可能會日趨重要。

本研究之新控制器主要改善片間差之變異，經由模擬顯示其可行性與更佳表現之潛力，並已於晶圓廠完成實驗，已確認其可行性與實際之性能。



1.2 文獻回顧

1.2.1 先進製程控制

自 1980 年代中期，隨著半導體元件尺寸之日趨微小，製程及產品都需要更精密之管控，業界於是開始著手製程狀態之記錄與追蹤，由於龐大之資料開始出現，接著而來的便是如何解讀這些資料，並賦予其意義，以進行後續之管制，如統計制程控制(Statistical Process Control, SPC) [2]。SPC 之概念僅環繞於平均值與其變異，當製程變化超出管制時，予以停止或提出警告。SPC 並未提出更正之行爲，以取得製程之改善，此爲 SPC 之缺點，也是先進製程控制 (Advanced Process Control, APC)起步之背景，於是很多的學術研究及半導體業界就依此龐大之資料進行各種演算，以進行製程之改善。整體發展有三大方向：

- 第一： 如何有效取得與解讀各種製程資料，使資料成爲具意義之控制製程指標。如 Fault Detection and Classification (FDC)及 in-situ sensor 之擴充。
- 第二： 各種 R2R 控制器或控制策略之發展。如 EWMA [23]、dEWMA[24]、ANN (artificial neural network) [7]等。
- 第三： 發展自動化控制系統，使之更完整，更具彈性之自動化系統。如資料之傳輸規格由單批(lot-base)演進到單片(wafer-base)、傳輸資料由慢速的 RS232 介面提昇成 HSMS(High Speed Message System)、計算速度上的進步更使得各種複雜的演算法變得更有可行性。

自 2000 年起，使用 R2R 控制器的方式改善半導體製程開始蓬勃發展。以往於 200 mm 世代之 SPC 管控方式，於元件尺寸微小化時，對量產廠已不足夠，尤其是進入奈米等級時，這主要來自於系統良率問題迅速嚴重化，如本文 1.1 節所述，使用 R2R 用於控制並改善製程之變異，已顯現出其迫切性。此外，自 2000 年起，半導體廠隨著晶圓尺寸提升至 300 mm 世代，此世代起之工廠自動化軟硬體規格得以提昇，製程資料存取於質與量兩方面伴隨整體資訊技術之發展得以大幅改善。半導體元件尺寸正式進入奈米等級且晶圓尺寸也全面進入 300 mm 的世代，此二者驅動了 APC 之蓬勃發展。

關於 R2R 控制邏輯之發展，最早的方法是使用 MA(Moving Average)，此方法簡單實用，是目前業界最常使用之邏輯。MA 控制器將各點之輸出值與目標值的差距，給予相同之權重，以作為下一批之估算基準。MA 的公式如(1)式所示：

$$\bar{a}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{t-i} \dots\dots\dots(1)$$

其中， \bar{a}_t 為 t 時截距項估計值； a_{t-i} 為 $t-1$ 時截距項真實值； n 為取樣時間的數目。

MA 控制器之好處在於可過濾高頻干擾，因此，可有效降低輸入值(例如量測誤差)之隨機干擾。MA 的缺點為各批次之比重相等，反應較遲緩。

當各批次之比重調整為必要時，可考慮選擇 EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)之控制器。Hunter [23]於 1986 年提出 EWMA 控制器的理論由，EWMA 控制器將輸出值與目標值的差距，依其時點與現今時點的不同，給予不同的權重，此權重是呈現一遞減的指數分配，亦即，離現今時點越近的資料點，所給予的資料點權重就越大。EWMA 之公式為：

$$\bar{a}_t = \lambda(Y_t - bX_t) + (1 - \lambda)\bar{a}_{t-1} \dots\dots\dots(2)$$

其中 \bar{a}_t 為截距項估計值， λ 為 EWMA 之權重值， X_t 與 Y_t 分別為與輸入值輸出量測值。

Sachs 等人[2]於 1991 年針對 IC 產業的特殊生產型態，提出了批次控制(Run-by-run control，RbR、Run to Run，R2R)的概念，同時討論了 EWMA 控制器之靈敏度與穩定性，其控制器為 gradual mode，用以區別劇烈之 SPC 變化，(process shift 通常為 gradual mode，若為劇烈變化時，一般都意味製程已異常，必須停止此製程，或特別處理)。

EWMA 控制器之發展得到普遍之重視與延伸。Butler 與 Stefani [23]注意到若是一個的嚴重的漂移(drift)時，EWMA 控制器之 offset 將太大，為避免此情形，可以加入第二個 EWMA 方程式，稱為 dEWMA。Patel 與 Jenkins [4] 提出 EWMA gain 之最佳化過程。Wang 與 Mahajan [7] 提出使用 artificial neural network (ANN) 控制器以改善 CVD 製程。Smith 與

Boning [3] 提出使用 ANN function mapping 來調整 EWMA 之 weighting。Tseng 等人 [6] 提出 Initial Intercept Iteratively Adjusted (IIIA) Controller，屬於 dEWMA 的強化版，且反應較快。

1.2.2 群體智能

群體智能(Swarm Intelligence, SI)係指由生物之群體行為發展所啟發的理論，例如：粒子群體最佳化(Particle Swarm Optimization, PSO)[25]是由候鳥之群體飛行(如圖二所示)所啟發；螞蟻演算法(Ant colony optimization, ACO)[26]的靈感來自螞蟻之覓食時所釋放的費洛蒙；隨機擴散搜索(Stochastic diffusion search, SDS)[27]則是由螞蟻觸角接觸性的串聯溝通(tandem calling)所激發的，如圖四所示。故群體智能之行為有以下特色：

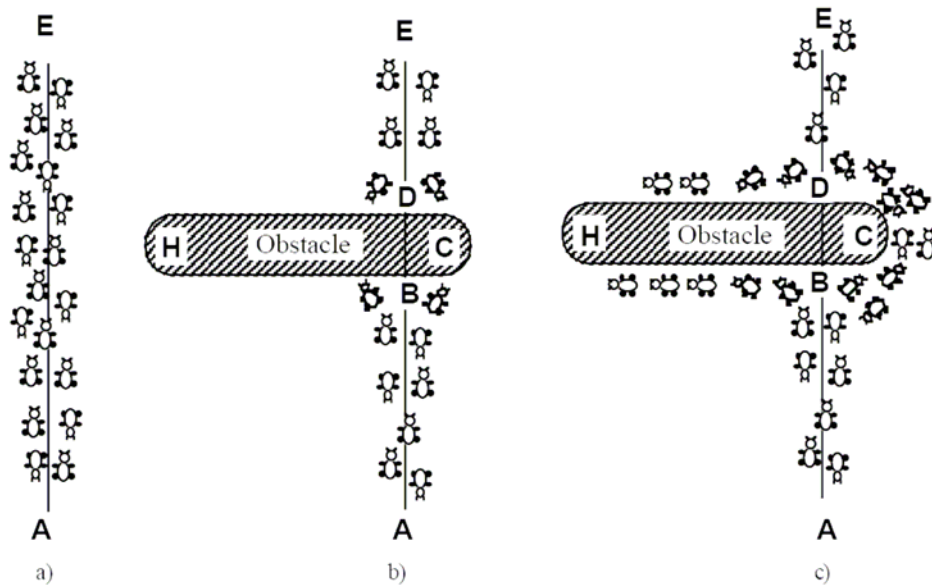
- 1、自我組織(Self-organization)之形成：由許多小區域之交互作用構成，而小區域之交互作用進而達成群體之任務，任何個體不直接接受單一中央命令。
- 2、通常透過間接溝通(如費洛蒙傳遞)：兩個個體不直接溝通，而透過改變外在環境為溝通媒介進行間接溝通，再透過此媒介之更新而進一步反應，此稱為 stigmergy (例如：螞蟻發出費洛蒙，累積費洛蒙濃度，追隨費洛蒙以找尋食物)。

群體智能的應用最早見於 Butrimenko [19] 於 1964 年提出於運用在通訊網路領域，Stefanyuk [20] 於 1971 年運用其於無線電站間之合作，Tsetlin [21] 於 1973 年發現生物間之群體智能行為在許多方面具有高度的潛力，尤其在於分散式系統、混亂系統、媒介間之間接合作 (非中央下令)，自我組織(Self-organization)行為系統。Beni, Hackwood 及 Wang [13、14、15、16、17、18] 並於發展蜂窩型機器人系統(cellular robotic system)上，藉由個別之機器人與其鄰近之機器人相互聯繫(1D 或 2D)而完成全體任務。



圖二，候鳥之群體飛行

(資料來源：<http://www.idsia.ch/~gianni/Lectures/BertinoroLectureACO.pdf>)



圖三 螞蟻覓食路徑 [25]



圖四 螞蟻的 tandem calling

(資料來源：<http://tecfa.unige.ch/tecfa/teaching/UVLibre/0001/bin35>

[/fourmis/chimique/images24/comuvisu.jpg](http://fourmis/chimique/images24/comuvisu.jpg))

1.2.3 費洛蒙擴散控制器



Bruecker [28]於 2000 年發展出數位費洛蒙基礎架構，本文第三章將介紹其三種狀態和兩種傳遞方程式。國立交通大學李安謙實驗室李德修於 2007 年延伸此架構修正邊界效應，開發出一種運用於半導體製程 R2R 的控制策略-費洛蒙擴散控制器(Pheromone Propagation Controller, PPC)[22]。PPC 的概念是假設在時間軸上兩鄰近量測點的誤差彼此會互相影響，進而估測下一批之行爲。故 PPC 具有擴散的特性，此特性符合半導體廠之典型製程誤差特徵—緩慢且遞延之漂移。在實作上，此方法假設製程批次間控制模型的截距項(此截距項包括量測誤差)爲螞蟻發出之費洛蒙，接著透過費洛蒙傳遞機制得到誤差分布的趨勢，得到前後批製程間之關聯性，進而估測下一批之可能誤差與進行補償修正。因此 PPC 可適應複雜的干擾(或誤差)，不像傳統以統計爲基礎的演算法需知道干擾(或誤差)的型式才能選定適合的演算法。

1.3 研究方法

本文之研究方法如下：

- 步驟一： 回顧 APC 與群體智能之相關文獻，以了解目前各 R2R 控制法之特色。
- 步驟二： 瞭解 PPC 的理論運作機制與理論基礎。
- 步驟三： 研究目前業界之黃光製程，並了解目前業界常用之 R2R 控制流程與邏輯。
- 步驟四： 找尋控制器模型與系統模型，先找出 CD 之主要控制參數，再使用迴歸法找出曝光量與 CD 之線性關係式。
- 步驟五： 微調 PPC 演算法中的參數，例如：擴散係數 F、費洛蒙框之點數、輸入值之過濾。
- 步驟六： 進行實際數據之數值模擬，驗證 PPC 之可行性與表現。
- 步驟七： 於晶圓廠進行現場實驗。



1.4 本文組織架構

第一章：包括目前半導體製程所遭遇之問題及 APC 與 R2R 之歷史、群體智能之由來與特色、說明本論文之研究方法。

第二章：介紹半導體的製程與微影製程、曝光機介紹、關鍵尺寸之量測、影響關鍵尺寸之因子。

第三章：說明費洛蒙傳遞控制法與其系統架構。

第四章：說明製程與模擬結果。

第五章：說明實驗結果與討論。

第六章：說明結論與未來工作。



第二章 半導體製程與微影製程介紹

2.1 半導體製造流程

半導體製程可區分為前製程作業、晶片長成、前段製程及後段製程。

前製程作業包括 IC 的設計與光罩的製作；晶片乃是由二氧化矽石還原成矽晶棒 (Silicon Ingot)，最後經過研磨、拋光、切片而成為晶圓片。

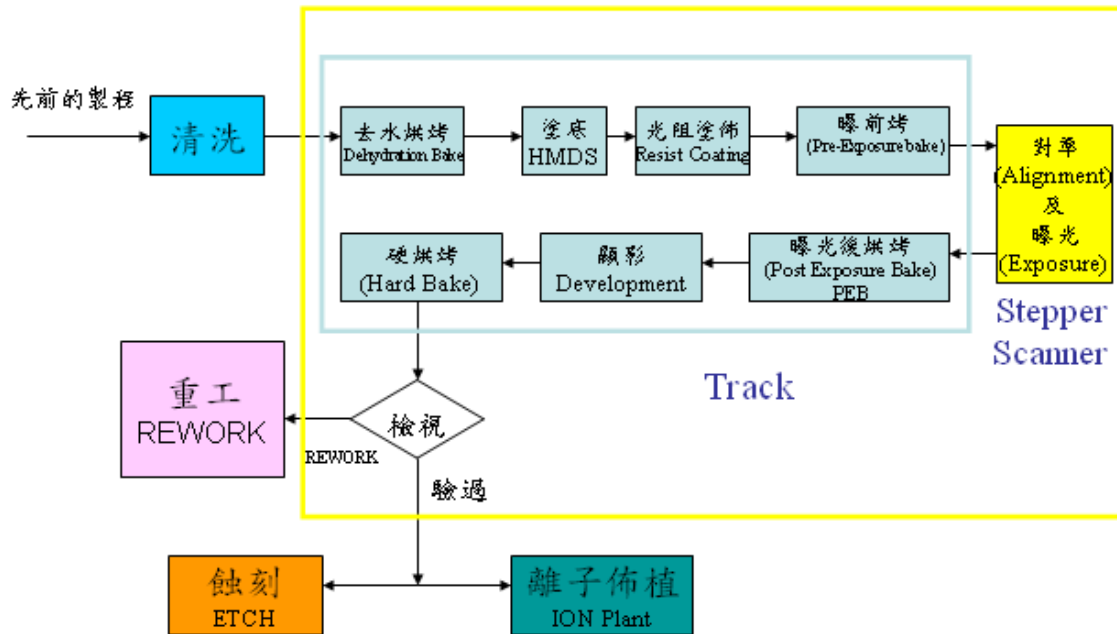
前段製程包括清洗、氧化、成膜、曝光、微影、蝕刻等步驟。IC 由許多線路所構成，其線路中間需有絕緣層，此線路材料與絕緣層皆由成膜製程所形成，各薄膜形成後其線路圖樣由微影製程所定義，藉由蝕刻製程形成真正之最終線路於薄膜上。如此反覆數十次，而形成平面與立體之積體電路。為保護晶圓免受灰塵之污染，故各製程前通常有清洗之必要。

後段製程是將晶片切割成晶片 (Chip)，並進行封裝及測試。封裝的目的除了保護易脆的晶片外，更提供機械強度與適當的灰塵保護，避免積體電路受到污染。測試的目的是測試晶片之最終性能能否達成。



2.2 微影製程

微影製程步驟包括如下步驟，如圖五所示：



圖五 微影製程步驟

步驟一： 清洗：在進入微影製程前，先去除晶片表面雜質。

步驟二： 去水烘烤：其目的是將晶片表面所吸附的水分蒸發，以利後續的光阻塗佈。

步驟三： 塗底：在晶片上塗上一層薄膜，用來增加光阻與晶片表面附著的能力，通常為六甲基乙矽氮烷 HMDS(Hexamethyldisilazane)。

步驟四： 光阻塗佈：利用真空吸附原理，吸附晶圓於塗佈機的托盤上之後，將光阻液便滴在晶圓上，晶圓同時轉動，讓光阻往外圍移動，均勻地佈滿整片晶圓，而且多餘的光阻將會被甩出。

步驟五： 曝光前烘烤：一般又稱軟烤，是將晶片上光阻層溶劑去除，並使光阻由原來的液態，經過軟烤之後，而成爲固態的薄膜，以加強光阻層對晶片表面的附著能力。

步驟六： 對準：在曝光前，必須將光罩上的線路圖一層層的對準，以使之後進行之曝光所得之移轉圖形能有上下層之準確對準。

步驟七： 曝光：曝光目的即是圖案之轉移，將光罩上定義好的圖案，完全轉移至光阻上。光線經過光罩，透鏡而成像在晶片上，晶片塗有感光的光阻，光阻與光線作用後，即可將光罩的圖形移轉到晶片上。微影成像的必備條件有光源、光罩、光阻、光阻塗佈顯影設備及對準曝光光學系統。

曝光主要控制的條件是: 1：曝光光源強度，2：曝光的時間，3：光阻的厚度，4：軟烤的程度，5：顯影的條件。

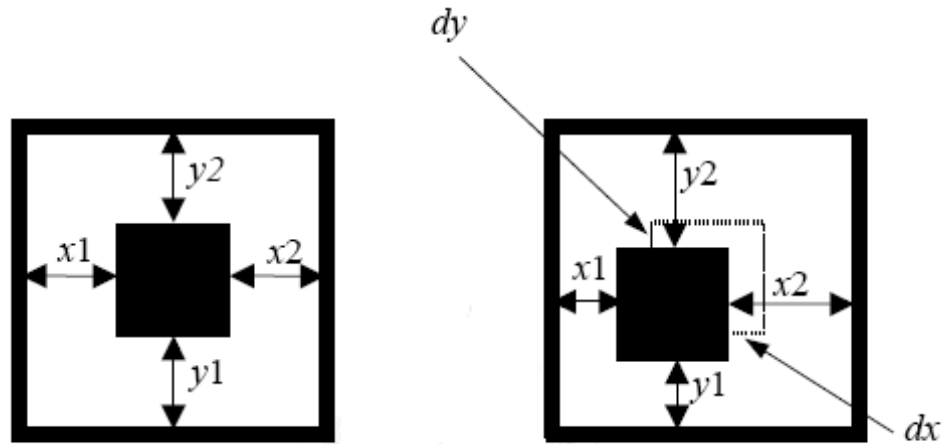
步驟八： 曝光後烘烤：其目的是使光阻結構重新排列，使駐波效應(在曝光時，光波在不同厚度的光阻會有不同的干涉效應產生，在入射光與反射光之處產生建設性干涉與破壞性干涉之故)減至最輕。

步驟九： 顯影：去除不必要的光阻，以保留所要圖像。

步驟十： 硬烤：除去剩餘之溶劑及水氣，使光阻內未溶解之感光化合物和樹脂間之結合更緊密，以增加光阻對熱之穩定性及底層物質之附著力，使之在之後的蝕刻或離子植入製程中，能確實發揮圖形保護之功能。

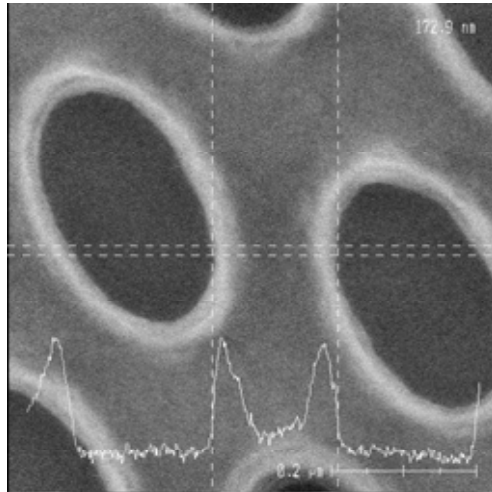
步驟十一： 顯影後檢視：其目的是用來確保微影製程的正確性。最主要的兩個 ADI 項目如下：對準誤差量測(Overlay)與關鍵尺寸量測(Critical Dimension, CD)，對準誤差測量記號如圖六，圖六中之左圖中央之實心體爲本層爲

對準誤差測量記號，其外圍之長方形框為對準層(底層)之對準誤差測量記號，當對準產生誤差時，可由圖六中之左圖與右圖之相對位移量得取前後層之對準誤差 dx 及 dy 。

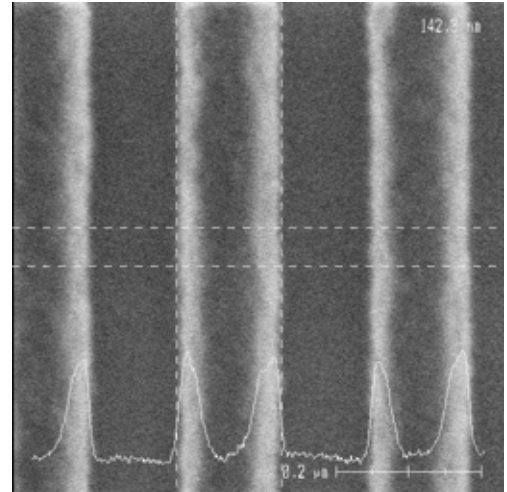


圖六 對準誤差測量記號

一般常見之關鍵尺寸圖像有兩種形式: 孔洞形(Hole pattern, 如圖七所示)與直線形(Line pattern, 如圖八所示); 直線形之關鍵尺寸典型常見於電晶體閘尺寸與導線之尺寸, 而孔洞形之關鍵尺寸則常見於導線間之連結孔量測。



圖七 孔洞形圖像關鍵尺寸



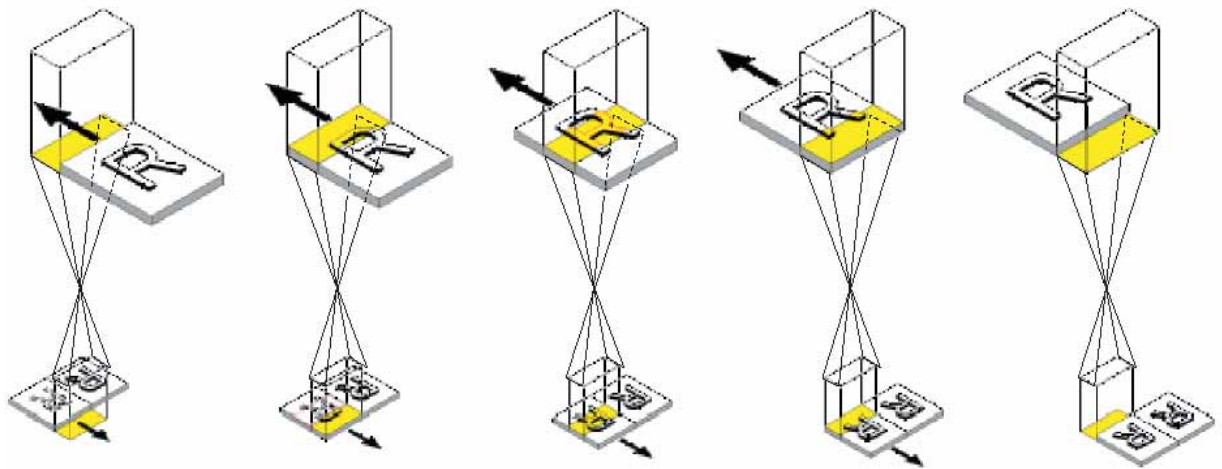
圖八 直線形圖像關鍵尺寸

本次實驗之製程控制點在上述步驟七之曝光製程，此曝光製程之準確度會受前製程與其系統自身變異之影響。當前製程產生變化時(例如底層膜厚改變)，以及曝光機本身產生變化(例如曝光光源衰竭)時，CD 將有所改變，藉由曝光時間之 run-to-run 控制，可補償此 CD 之改變量。



2.3 掃描式曝光機介紹

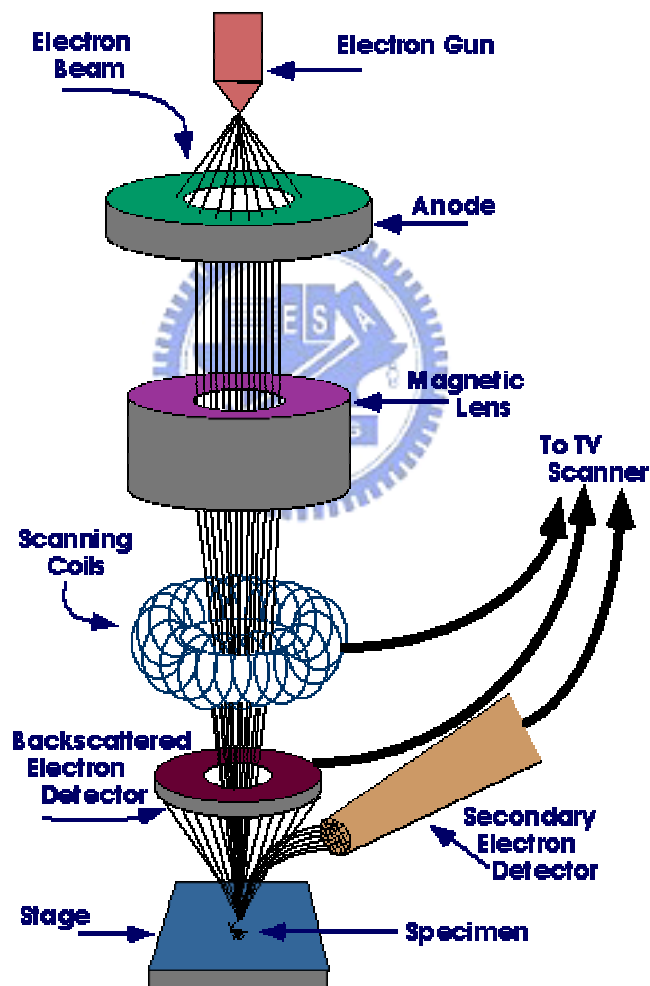
掃描式曝光機(Scanner)是由光源、光學照明系統、對準系統、光罩承接平台及晶圓承接平台等部分組合而成，動作示意圖如圖九所示。在圖九中，光源為 KrF(波長為 248nm) 或 ArF(波長為 193nm)，曝光方式為光源固定，而同時移動光罩承接平台及晶圓承接平台對準後曝光。因為曝光時有如掃描式的將光罩的圖案投影至晶圓上，故稱為掃描式曝光機。



圖九 掃描式曝光機動作示意圖

2.4 關鍵尺寸之量測

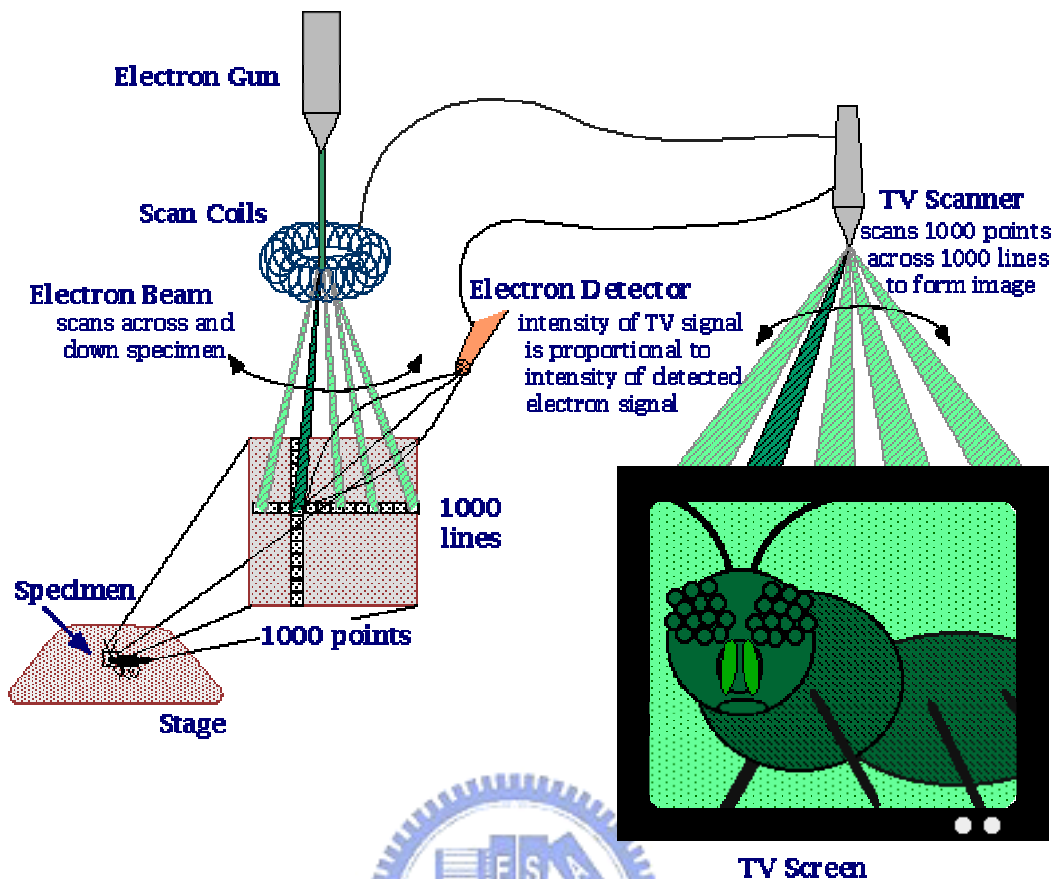
本研究的關鍵尺寸是為由光罩所轉移至晶圓上的圖案之線寬。其量測的方式是使用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)來進行量測，如圖十所示。SEM 之原理為由電子槍(Electron Gun)打入電子束(Electron Beam)，經磁場(Magnetic Lens)集束之，再經掃描線路(Scanning Coil)來回掃描，使電子束打入基材(Specimen)，基材表面產生二次電子(Secondary Electron)，此二次電子經由偵測器(Secondary Electron Detector)偵測後產生明暗對比之圖像，如圖十一所示。由偵測器產生圖像中量得之線寬尺寸，即為關鍵尺寸。



圖十 掃描式電子顯微鏡

資料來源：Website, Department of Materials Science and Engineering, Iowa State University

<http://www.mse.iastate.edu/microscopy/path2.html>



圖十一 掃描式電子顯微鏡圖像之產生

資料來源：Website, Department of Materials Science and Engineering, Iowa State University
<http://www.mse.iastate.edu/microscopy/proimage.html>

SEM 有破壞式與非破壞式兩種，破壞式 SEM 使用切片之樣本，可量測樣本之立體尺寸；而非破壞式 SEM 直接量測晶圓表面，不需製作樣本，量產上極為便利，其缺點是可得資訊較少。

另外，關鍵尺寸之量測於量產上仍有兩項要點：

- 1、取樣計劃(Sampling plan): 如多少批該量測一批；每批該量多少片，每片該量多少點...等等，此取樣計劃通常會根據整體良率水準及製程穩定程度而有所不同。
- 2、量測資料回饋之時間差：由於從微影製程完成至量測資料之取得有時間之延遲，於此延遲期間，曝光機本身或者前製程都可能已經產生些許變化，因此，如何

回饋 SEM 之量測到的關鍵尺寸資料至控制器以控制下一批晶圓，也值得深入探討，但此部份不在本論文研究範圍。

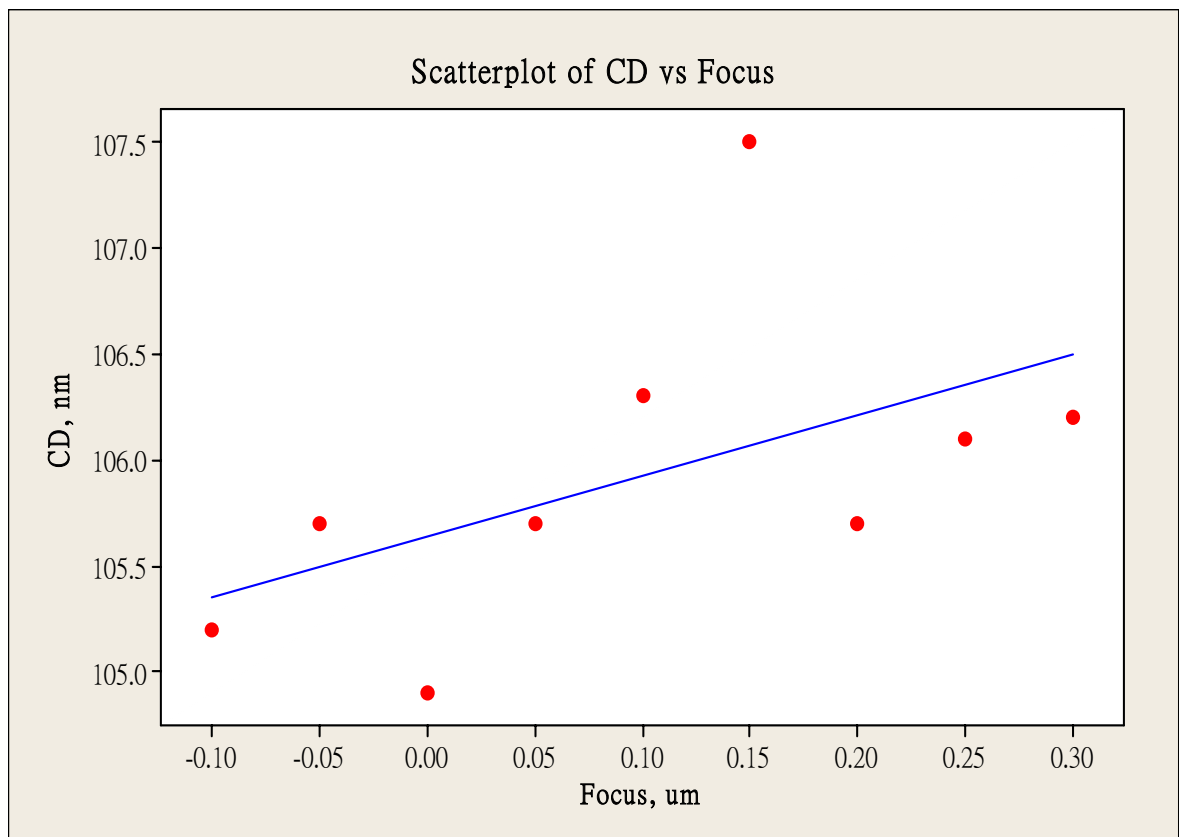
本論文實驗之CD資料均以非破壞式SEM量得，SEM自身有其量測誤差。又，生產線之SEM通常有許多台，各台SEM之間也有些許誤差。為使PPC控制系統不受這些誤差所干擾，本論文之PPC於CD資料之取得後，先加入移動平均邏輯以濾除之，此邏輯於本文3.3節敘述。



2.5 影響關鍵尺寸之因子

如 2.2 節所述，影響曝光之結果有許多因素，其中最大的兩個因素為：曝光能量 (Exposure Energy，或稱 Dose)與焦距(Focus)。因此，本文考慮以此兩個參數做為關鍵尺寸控制之輸入變數。然而，欲使用焦距來調整 CD 時，通常有以下困難：

1. 焦距之調整可能伴隨光阻成型時之輪廓改變(例如歪斜)，進而使得後製程蝕刻後之最終 CD 值有不預期之改變。
2. 焦距與 CD 值之關係線性度通常不佳，如圖十二之例，100 nm DRAM 製程，取聚焦深度-0.1u 至 0.30u 與 CD 值作線性迴歸，得判定係數 $R^2=0.27$ ，這樣的結果顯示不可使用此線性關係。



圖十二 關鍵尺寸與焦距之關係範例

反之，若使用曝光量調整 CD 時，於大多數製程曝光量與 CD 都具有極為線性之關係，且於量產上控制極為便利，通常使用曝光時間來控制曝光量即可。考慮上述聚焦深

度調整 CD 時之困難後，於量產上普遍採用此單一輸入變數(即曝光量)之調控以使 CD 符合目標值。

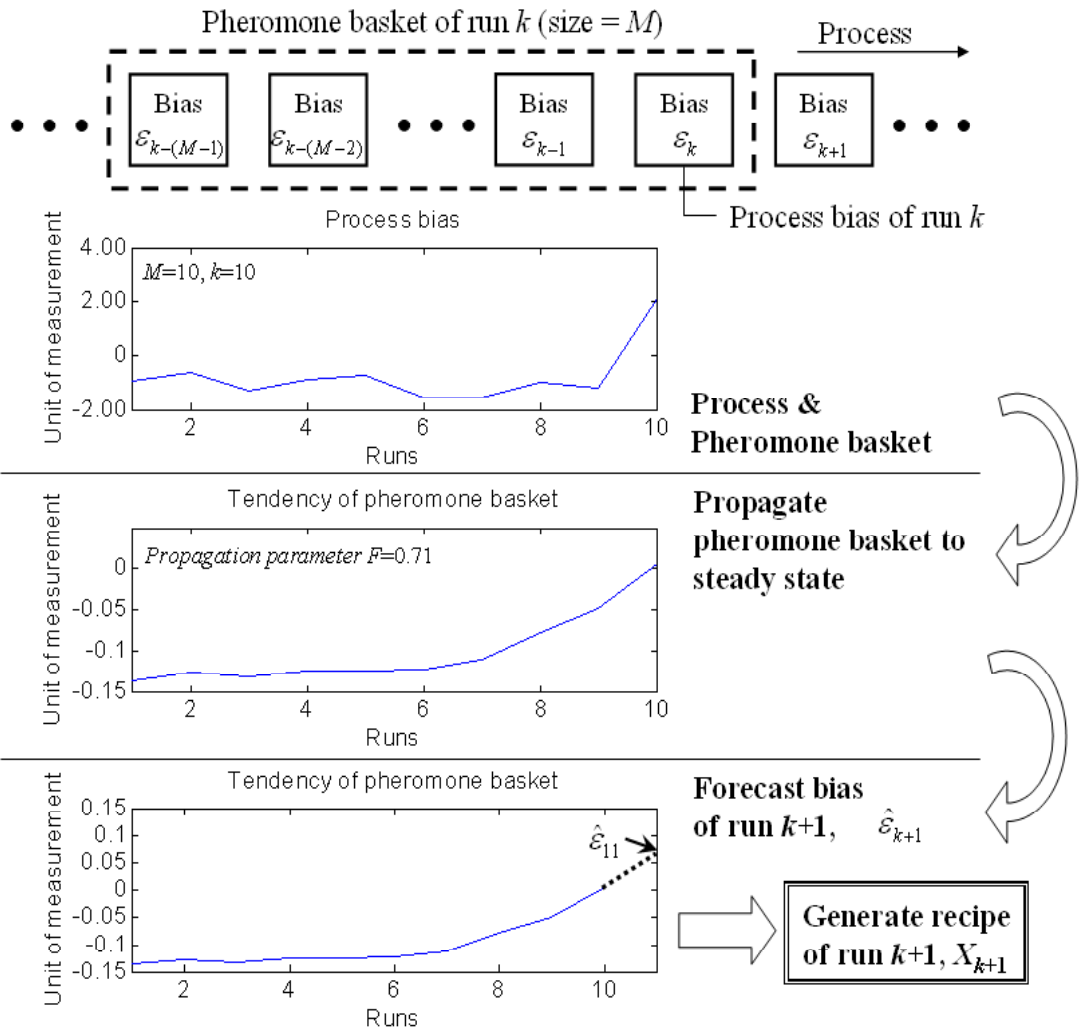


第三章 費洛蒙擴散控制法 (Pheromone Propagation Controller, PPC)

3.1 費洛蒙擴散控制法之概念

半導體製程上，前後批製程通常有某種關聯性，此關聯性之確切形式不得而知。而費洛蒙擴散控制法 (Pheromone Propagation Controller, PPC) 的概念是假設在時間軸上兩鄰近量測點的誤差彼此會互相影響，進而估測下一批之行爲。PPC 的示意圖如圖十三所示。在圖十三中，假設製程模型偏移量(bias)或截距項(offset) ε_k 爲費洛蒙，連續數點之費洛蒙構成費洛蒙框(Pheromone Basket)，製程偏移量依數位費洛蒙傳遞理論於費洛蒙框內進行擴散。當擴散完成後，費洛蒙框內的費洛蒙會達到穩定的狀態，下一批之製程預估之偏移量 $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 可由穩態的費洛蒙框的最後兩個費洛蒙值直接外插得到。最後，配方產生器(recipe generator)利用下一批製程之預估偏移量產生下一批次的配方。





圖十三 費洛蒙擴散控制法概念圖[22]

3.2 PPC 控制系統與模型

PPC 控制系統方塊圖如圖十四所示。曝光系統(Plant)依線性關係式描述，以下式表示：

$$CD_k = \beta_k Dose_k + \varepsilon_k + e_k \dots\dots\dots(3)$$

其中：

ε_k 為截距項；

β_k 為第 k 批之 system gain；

e_k 為第 k 批之干擾項(disturbance)； $e_k = \bar{e} + ak + \eta_k$ ，其中 \bar{e} 為定量之偏移； ak 為緩慢之飄移量； η_k 為 white noise。

此曝光系統之系統增益值於實際經驗上變化不大，也就是經由迴歸運算之線性方程式之 β_k 值可近似於固定值 $\hat{\beta}$ 。即曝光系統控制模型為：

$$CD_k = \hat{\beta} Dose_k + \hat{\varepsilon}_k \dots\dots\dots(4)$$

其中， $\hat{\varepsilon}_k$ 為系統偏移量的估計值。在系統(曝光系統)經變化後，其產出值 CD_k 並不等於目標值 CD_k ，PPC 控制器將進行補償。當每一批晶圓完成曝光後，可得到實際量測值之時，再比較得到實際 CD 值與目標值之差異，再透過估測器來更新 $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 。

而系統之後續控制模型依線性模型進行，亦即等量之輸入(曝光量)變化會造成等量之輸出(CD)變化，即：

$$T = \hat{\varepsilon}_{k+1} + \hat{\beta} Dose_{k+1} \dots\dots\dots(5)$$

其中：

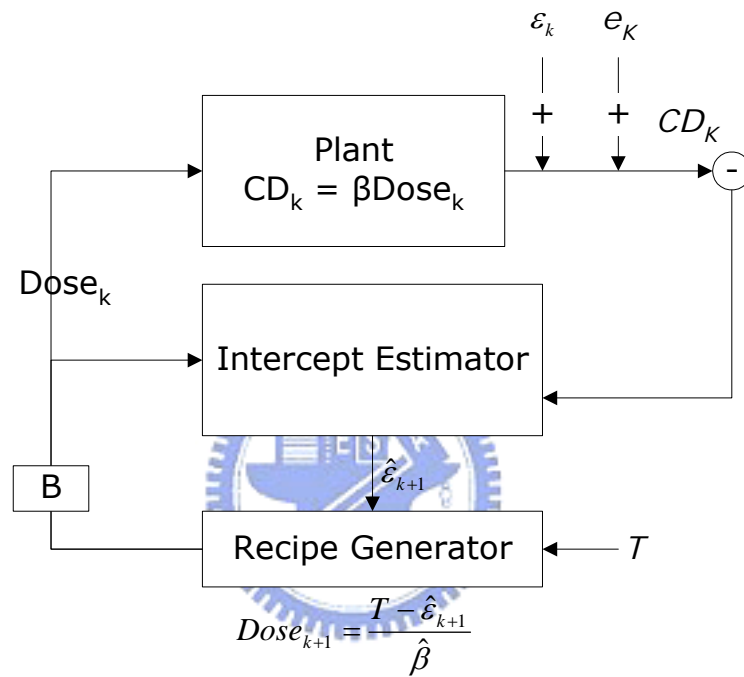
T 為 CD 目標值；

$\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 為截距項預測值；

$\hat{\beta}$ 為 system gain ;

藉由截距項估值 $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 與 $\hat{\beta}$ 值代入(5)式，可以得到下一批之曝光量條件為：

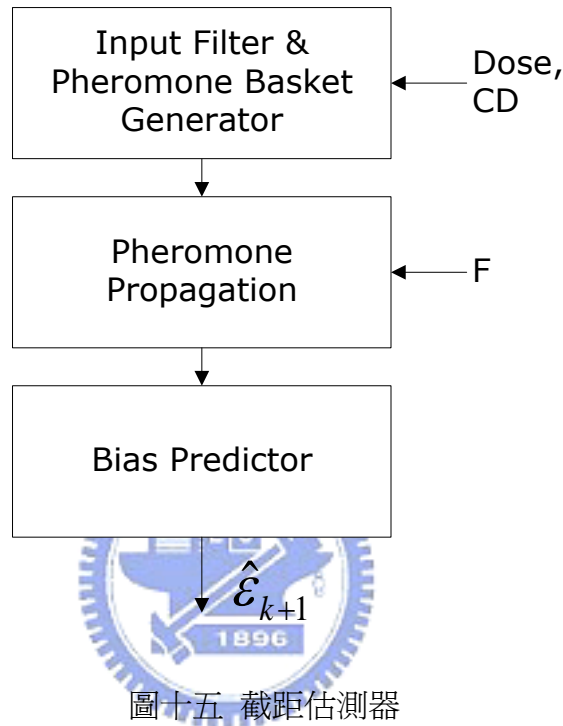
$$Dose_{k+1} = \frac{T - \hat{\varepsilon}_{k+1}}{\hat{\beta}} \dots\dots\dots(6)$$



圖十四 PPC 控制系統方塊圖

3.3 截距估測器

在圖十四中，截距估測器(Intercept Estimator)包括三部份：輸入過濾器與費洛蒙框產生器(Input Filter & Pheromone Basket Generator)、費洛蒙擴散器(Pheromone Propagation)及偏移量預測器(Bias Predictor)，如圖十五所示。



圖十五 截距估測器

3.3.1 輸入過濾器與費洛蒙框產生器

PPC 主要有三個狀態，分別為費洛蒙框的輸入費洛蒙 r 、正在傳遞中的費洛蒙 q 和累積在不同位置的費洛蒙強度 s 。本文之輸入過濾器以三點移動平均法(MA3)先過濾輸入值：先以真實之 CD 值與 Dose 量計算各點之真實截距項，再以前三點真實截距項平均之，此值即為單一費洛蒙點，由於 MA3 為一低頻過濾器(Low-Pass Filter)，可有效過濾隨機之干擾，且對於量測機台之不準度也可過濾之。在第 k 批次所輸入的費洛蒙強度如下式表示：

$$r_k = (\varepsilon_{k-2} + \varepsilon_{k-1} + \varepsilon_k) / 3 \dots\dots\dots(7)$$

其中， $\varepsilon_k = CD_k - (-3.56Dose_k)$ 。

得到單一費洛蒙點強度後，若費洛蒙框的大小為 M ，對應到製程批次後，費洛蒙框組成的內容即為 $\{r_{k-M-1}, r_{k-M-2}, \dots, r_{k-1}, r_k\}$ 。

3.3.2 費洛蒙擴散器

M 筆輸入值 r 放入費洛蒙框後即開始進行費洛蒙擴散。費洛蒙擴散依傳遞方程式(Transition Functions)運作，於起始條件下，外部輸入 r 加入成為費洛蒙傳遞量之起始值，之後，外部輸入即不再輸入，也就是當 $i > 0$ 時， $r = 0$ ；當外部輸入加入後，費洛蒙框之中間點之費洛蒙傳遞量 q 依 $F/2$ 比例傳遞至鄰近點，而於邊際點(Boundary condition)時，費洛蒙之傳遞量修正為 $F/(2-F)$ ，而累積之費洛蒙強度即得 $(1-F)q$ 與 $(1-F/(2-F))q$ ，示意圖如圖十六；其傳遞方程式如下：

$$q(k, m, i+1) = \begin{cases} \frac{F}{2}(r(k, m+1, i) + q(k, m+1, i)), & \text{if } m = 1 \\ \frac{F}{2-F}(r(k, m-1, i) + q(k, m-1, i)) + \frac{F}{2}(r(k, m+1, i) + q(k, m+1, i)), & \text{if } m = 2 \\ \frac{F}{2}(r(k, m-1, i) + q(k, m-1, i)) + \frac{F}{2}(r(k, m+1, i) + q(k, m+1, i)), & \text{if } 2 < m < M-1 \\ \frac{F}{2}(r(k, m-1, i) + q(k, m-1, i)) + \frac{F}{2-F}(r(k, m+1, i) + q(k, m+1, i)), & \text{if } m = M-1 \\ \frac{F}{2}(r(k, m-1, i) + q(k, m-1, i)), & \text{if } m = M \end{cases} \quad (8)$$

其中：

F 為費洛蒙擴散係數；

i 為傳遞次數；

k 為批次號碼；

M 為費洛蒙框大小；

m 為費洛蒙框中之單點位置；

r 為外部輸入之起始費洛蒙大小；

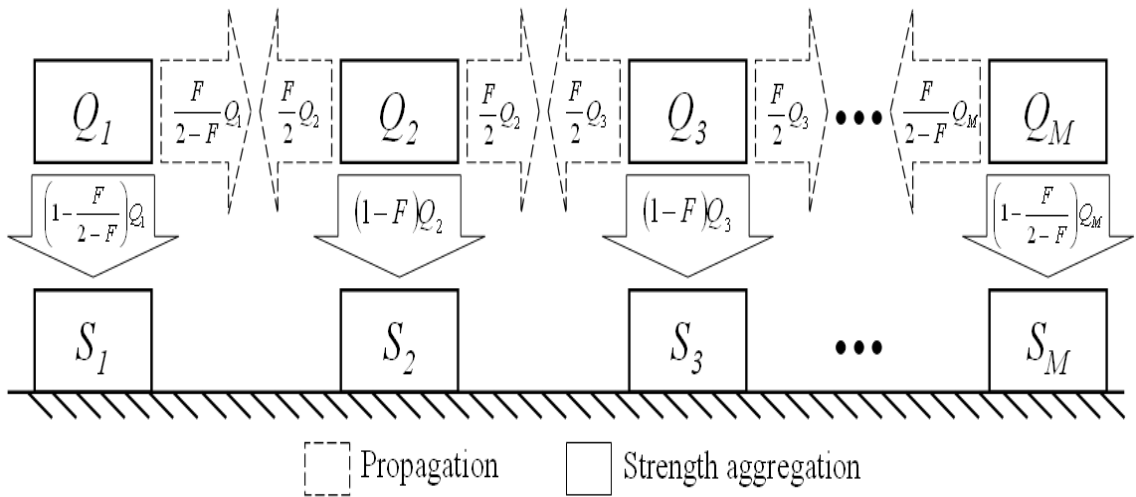
q 為費洛蒙傳遞強度，其初始值為零。

費洛蒙強度之累積依以下方程式循環累積，直到 q 等於零，即外部輸入完全傳遞至費洛蒙框，此時 s 也將達到飽和，不再增加。

$$s(k, m, i + 1) = \begin{cases} s(k, m, i) + (1 - \frac{F}{2-F})(r(k, m, i) + q(k, m, i)), & \text{if } m = 1, M \\ s(k, m, i) + (1 - F)(r(k, m, i) + q(k, m, i)), & \text{if } 1 < m < M \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

其中：

$s(k, m, i)$ 為累積之費洛蒙強度，即其初始值為零。



圖十六 費洛蒙擴散示意圖 [22]

3.3.3 偏移量預測器

當費洛蒙完成傳遞後，取最後兩點，使用外差法估計下一批之截距項預測值為：

$$\hat{\varepsilon}_{k+1} = s(k, M, \infty) - s(k, M - 1, \infty) + s(k, M, \infty) \dots\dots\dots(10)$$

3.3.4 傳遞係數 F 之最佳化

傳遞係數(propagation parameter) F 值介於零至一之間，可依製程特性，對傳遞係數再作最佳化。

本文以相同的輸入值觀察傳遞係數的影響，且輸入之形式假設有線性與非線性兩種。圖十七為線性輸入時， F 值對 Output 之影響；圖十八為線性輸入時， F 值對最終外差結果之影響；圖十九為非線性輸入時， F 值對 Output 之影響；圖二十則為非線性輸入時， F 值對最終外差結果之影響。

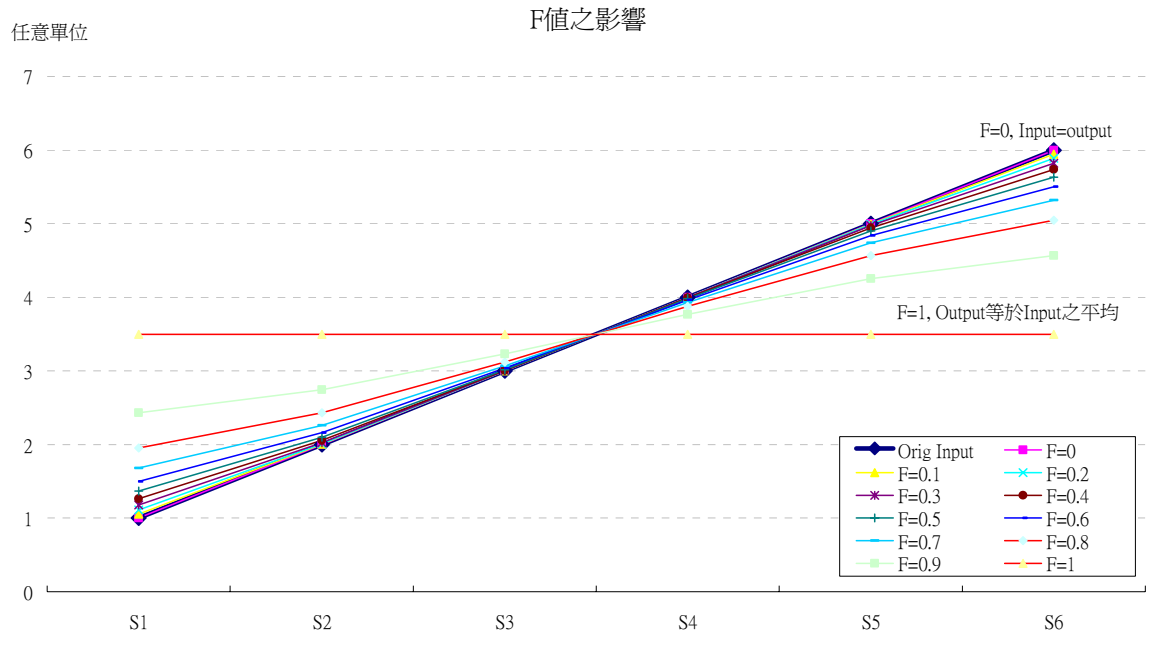
在圖十七和圖十九中皆顯示當傳遞係數越小時，表示某個量測點受其鄰近量測點的影響越小，當 F 值為 0 時，表示費洛蒙框中所有值都互不影響，故輸入與輸出相等。此外，傳遞係數越大，表示量測點間相互影響越大，而隨著 F 值增大至 1 時，輸出值等於費洛蒙框中所有輸入值之平均。

在圖十八和圖二十中，可以觀察出當傳遞係數越小，擴散後外插的結果越接近直接取最後(近)兩個批次的外插；傳遞係數越大，擴散後外插的結果越接近輸入的平均值，如圖十八與圖二十所示。

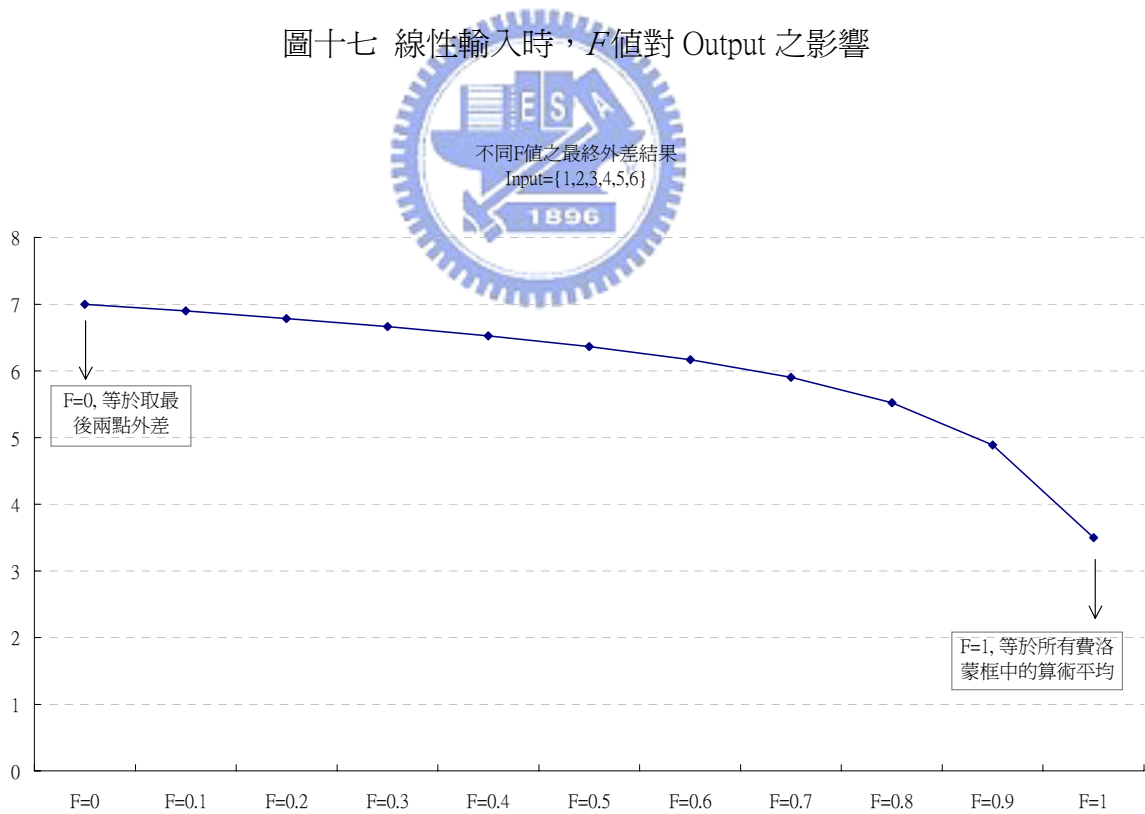
在實作上，PPC 有兩種選擇以更新傳遞係數 F 之方式：

- 1，固定式：根據歷史資料尋找最佳之固定值。；
- 2，自我調變(Self-tuned)：也就是即時地自動調變適當的擴散係數。

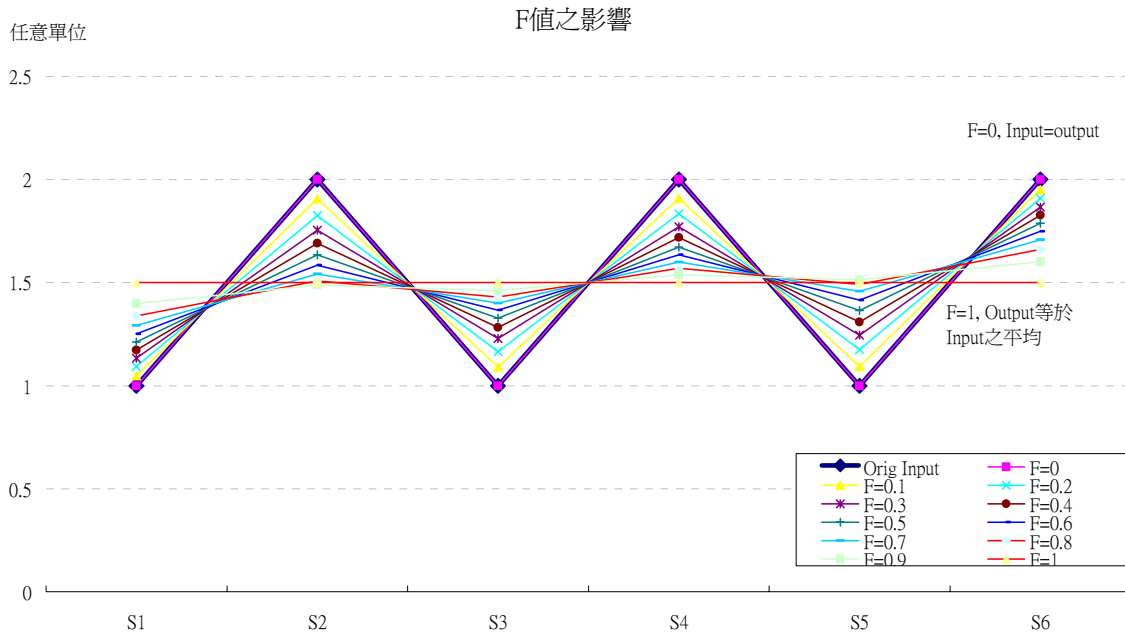
因為半導體製程多為穩定製程，本論文以歷史資料學習後固定式來進行模擬及實驗，不即時自動調變擴散係數 F 。



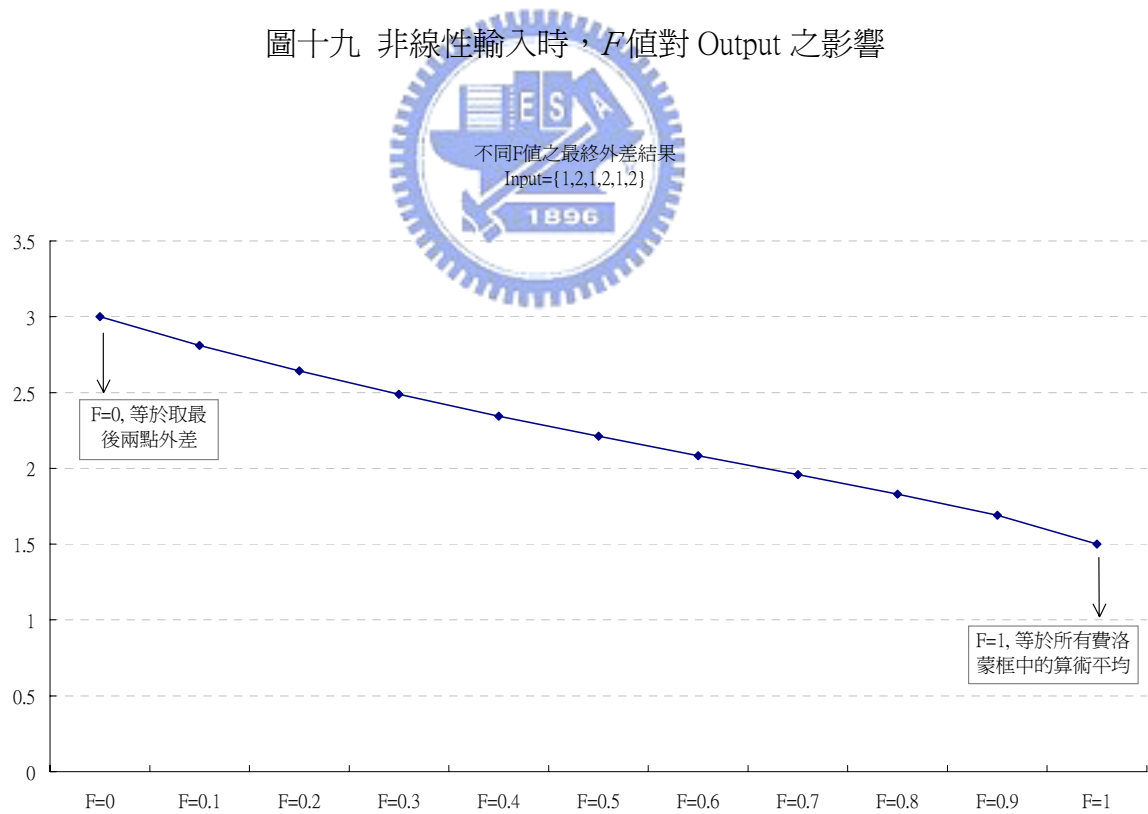
圖十七 線性輸入時， F 值對 Output 之影響



圖十八 線性輸入時， F 值對最終外差結果之影響



圖十九 非線性輸入時， F 值對 Output 之影響



圖二十 非線性輸入時， F 值對最終外差結果之影響

第四章 製程說明與模擬

4.1 製程說明

本文選定之製程為70nm 512M DDR2 DRAM之電晶體閘關鍵尺寸之控制。本製程曝光機使用機台為Nikon S308 ArF曝光機，CD規格值為76 nm±3 nm。本製程目前使用之R2R控制法採用MA5控制邏輯。

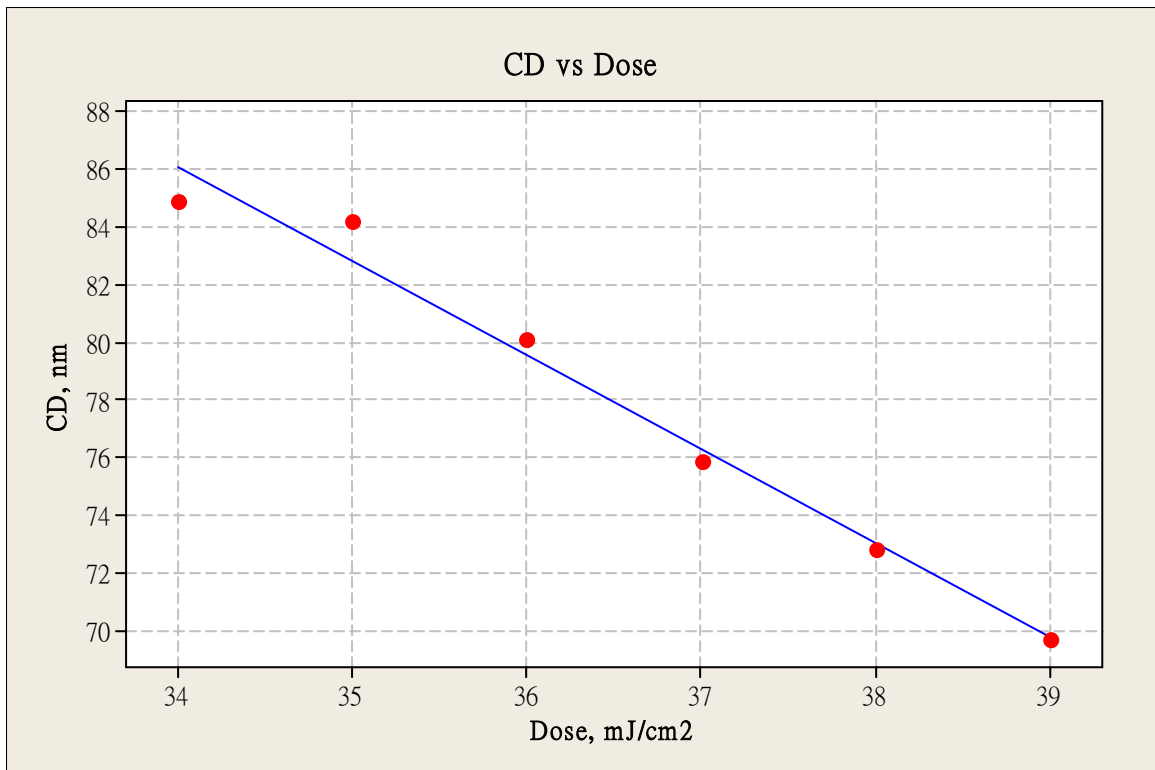
本實驗之主要目的為驗證PPC之可行性，測試透過PPC之控制是否能使CD平均值落於目標值，同時變異量達到最小。在驗證PPC性能的同時，並比較PPC與MA5(原製程)及EWMA之表現，此為本實驗之次要目的。

本製程之曝光量與關鍵尺寸之變化關係經實驗可得結果列於表一：

表一 曝光量對應關鍵尺寸之變化

Dose, mJ/cm ²	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0
CD, nm	84.9	81.4	78.4	74.3	70.7	67.1

關鍵尺寸與曝光量之關係經取曝光量範圍 35 mJ/cm² ~ 39 mJ/cm²，進行線性迴歸運算可得 Gain 為-3.56 nm/(mJ/cm²)，截距項值為 204，且線性度良好，如圖二十一所示。



圖二十一 關鍵尺寸與與曝光量之關係

其線性關係式為：

$$CD_k = 204 - 3.56Dose_k \dots\dots\dots (11)$$

其中：

k 為批次號碼；

CD_k 為第 k 批之 CD 值；

$Dose_k$ 為第 k 批之曝光量；

由此我們可依線性關係式描述本系統，轉換(11)式為下列控制模型：

$$\hat{CD}_k = -3.56Dose_k + \hat{\varepsilon}_k \dots\dots\dots (12)$$

其中：

$\hat{\varepsilon}_k$ 為第 k 批之估計截距項； \hat{CD}_k 為估計的 CD 值。

此系統之增益值於實際經驗上變化不大，也就是經由迴歸運算之線性方程式之增益值可近似於固定值。藉由 CD_k 等於目標值 T 與截距項估值 $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 代入(12)式，可以得到下一批之曝光量條件為：

$$Dose_{k+1} = \frac{T - \hat{\varepsilon}_{k+1}}{-3.56} \dots\dots\dots(13)$$

其中：

T 為 CD 目標值； $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 為下一批之截距項預測值；



4.2 模擬步驟與結果

實驗前之模擬步驟為：

步驟一： 選擇費洛蒙框之筆數：參考目前本製程之 R2R 控制邏輯為 5 點之移動平均模式，而若費洛蒙框以 5 點進行，其擴散或有不對稱之行爲，故費洛蒙框選定為 6 點。

步驟二： 進行模擬一。模擬一為取得第一組歷史資料作為訓練資料，用以找到最佳的控制參數，例如 PPC 的傳遞係數 F 和 EWMA 的權重 W 。

步驟三： 進行模擬二。模擬二為取得另一組歷史資料，用步驟二調教好之 F 和 W 值進行第二次模擬。

4.2.1 模擬一：訓練資料之模擬結果

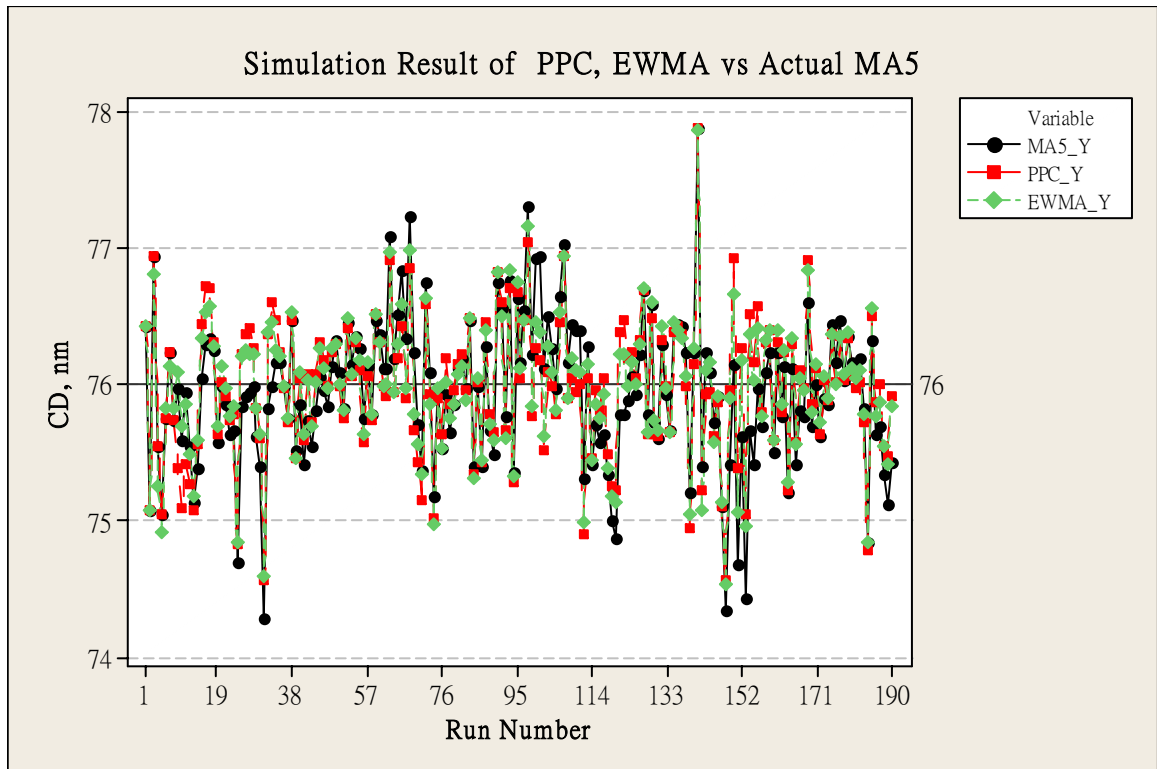
實驗前之首次模擬共取得 2 週計 190 筆之實際生產資料，其平均值為 75.941 nm，製程標準差 σ 為 0.535 nm。

還原干擾值之作法為：將原資料中每次之 R2R 補償值減去後，即可得取各次之干擾值，將此干擾值代入以進行 PPC 之行爲模擬。

使用 PPC 進行模擬時，先嘗試不同之 F 值，當得到最小 MSE 之際，即為最佳之 F 值。本文模擬結果最佳之 F 值為 0.9，此時之 CD 平均值為 75.976 nm，製程標準差 σ 為 0.504 nm，模擬結果顯示 PPC 比 MA5 有較好之表現，如圖二十四及表二所示。

本次模擬並加入 EWMA 控制器之模擬以與 PPC 作比較。EWMA 控制器之權重 W 值之取得與上述 PPC 之 F 值之取得方式相同，取得方式為由 0.01 遞增至 0.99，當得到最小 MSE 之際，即為最佳 W 值。本文模擬結果最佳 W 值為 0.2。以此進行模擬，EWMA 之模擬結果如圖二十二及表二所示。

在表二中可以發現在模擬一中，PPC訓練結果比MA5好；而EWMA在訓練資料模擬結果比PPC好。但模擬一只是在已知量測資料的情況下回溯尋找最佳的控制參數。在真實的情況下是利用模擬一找到的參數進行模擬二。



圖二十二 模擬一：PPC、MA5 與 EWMA 之訓練資料模擬結果

表二 模擬一：PPC、MA5 與 EWMA 之訓練資料模擬結果

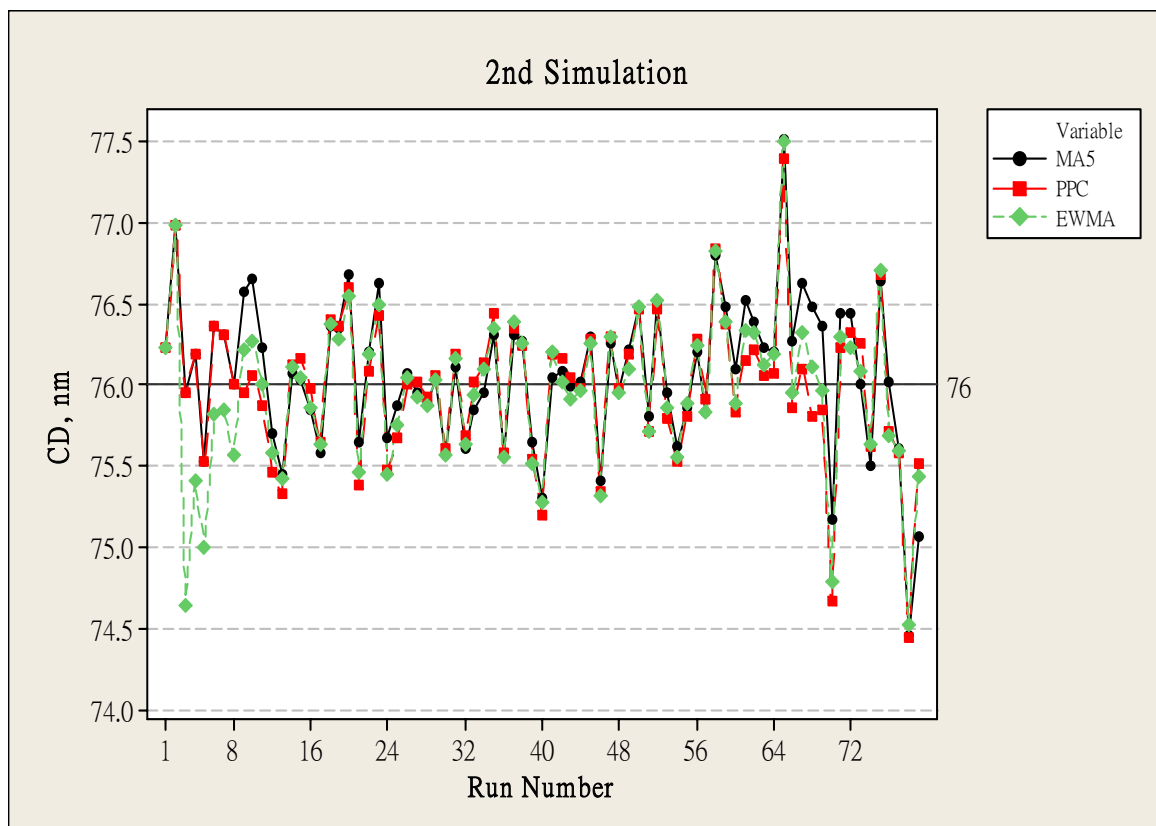
	N	Mean	MSE	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
MA5	190	75.941	0.0288	0.535	75.967	1.869	-0.020	1.832
PPC	190	75.976	0.0253	0.504	75.997	1.984	-0.008	1.968
EWMA	190	75.985	0.0244	0.495	76.026	2.020	-0.005	2.010

4.2.2 模擬二：測試資料之模擬結果

為了驗證 PPC 控制系統之可靠度，及驗證 F 值之恰當性，模擬二使用模擬一找到的控制參數並取得另一組 79 筆之歷史資料，進行測試資料的模擬。

圖二十三及表三為模擬二的模擬結果。在表三中可看出，雖然 PPC 訓練結果比 EWMA

差，但將訓練結果應用於測試資料時，PPC 則優於 MA5 和 EWMA。故知 PPC 控制法可適用於本曝光製程。



圖二十三 模擬二：PPC、MA5與EWMA測試資料模擬結果

表三 模擬二：PPC、MA5與EWMA測試資料模擬結果

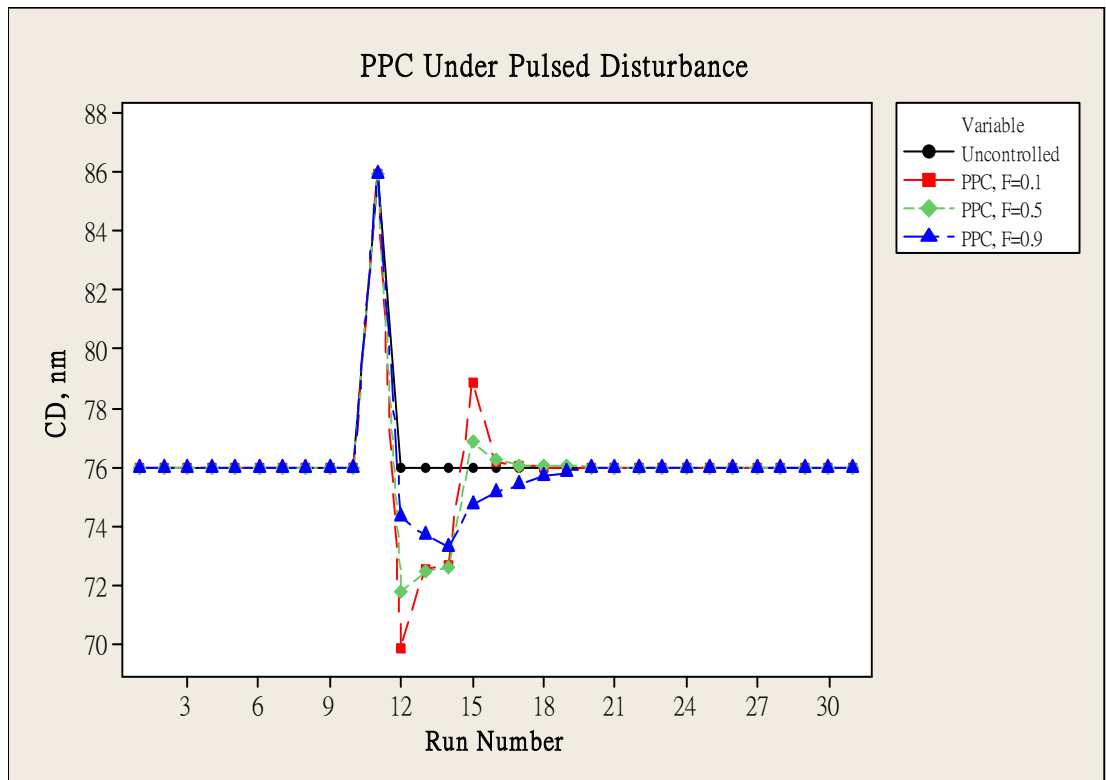
	N	Mean	MSE	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
MA5	79	76.066	0.211	0.458	76.072	2.183	0.022	2.135
PPC	79	75.991	0.201	0.451	76.040	2.217	-0.003	2.211
EWMA	79	75.957	0.234	0.485	76.001	2.062	0.014	2.032

4.3 各種干擾之模擬

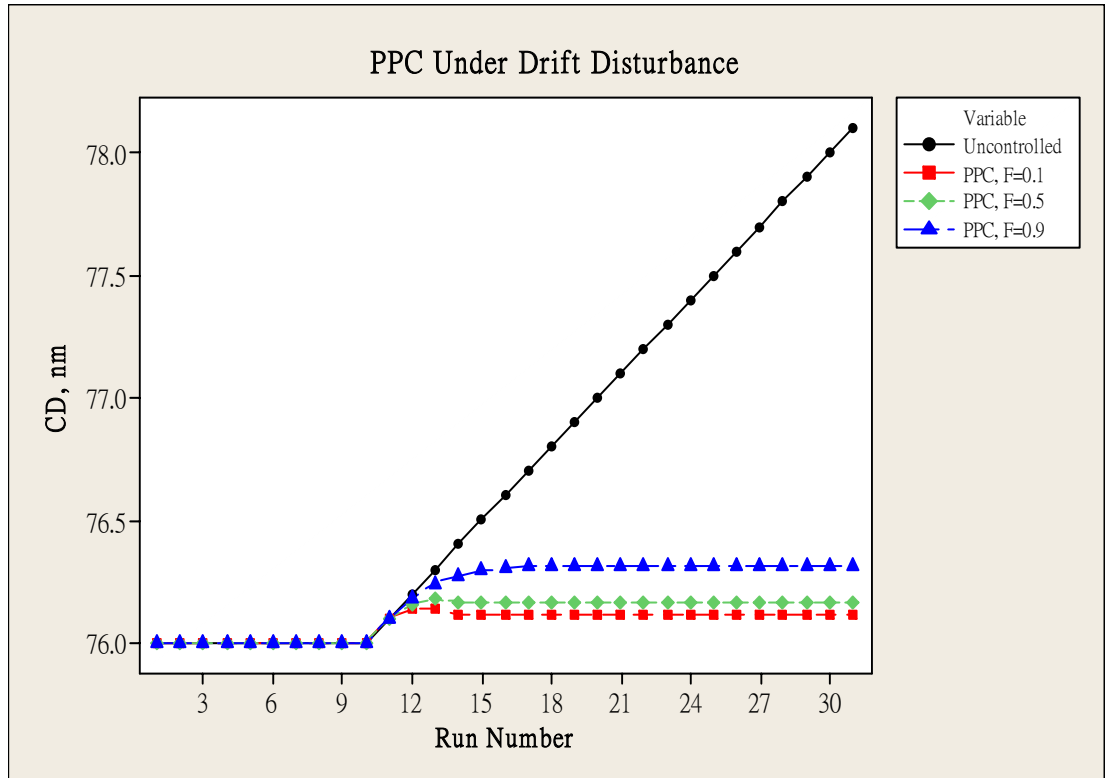
4.3.1 PPC於各種干擾之模擬

爲了了解 PPC 之反應特性，實驗前之模擬加入了三種特定模式之干擾來模擬：突波(Pulse)、漂移(Drift)、固定偏移(Shift)，並使用三種 F 值(0.1, 0.5, 0.9)進行模擬，模擬結果分別於圖二十四(突波干擾)、圖二十五(漂移干擾)與圖二十六(固定偏移干擾)。

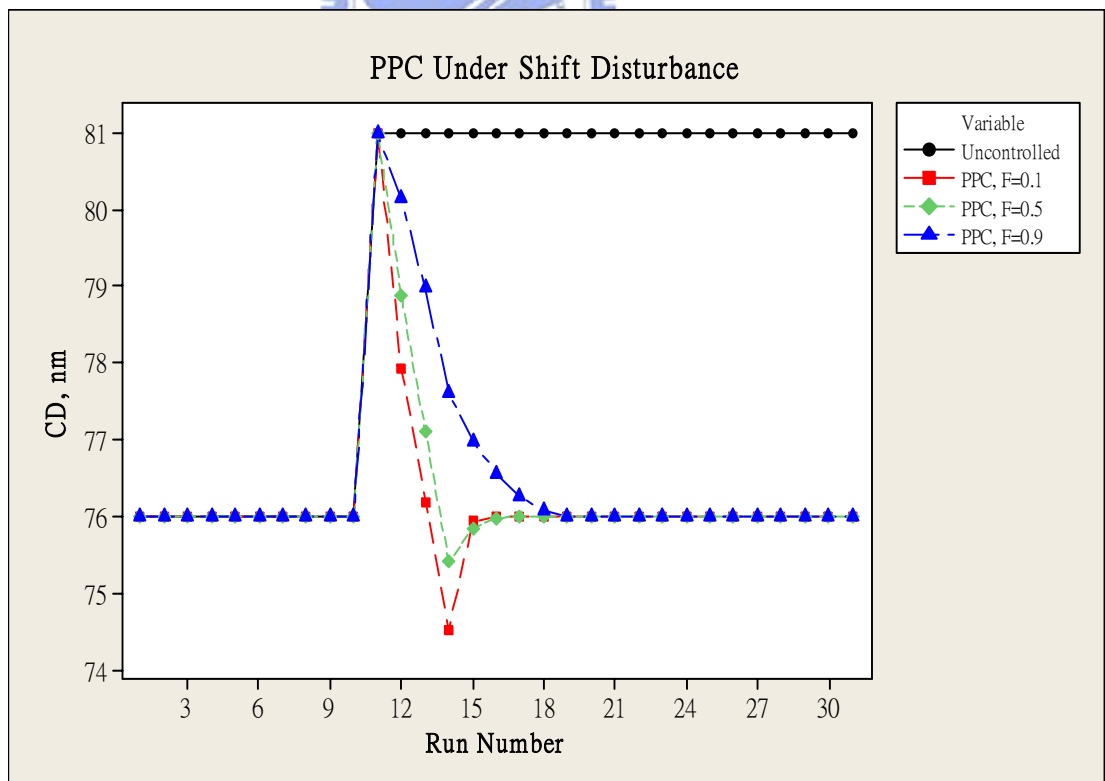
PPC 於 F 值爲 0.1 時反應快速，但易過度反應，如圖二十四與圖二十六； F 值爲 0.9 時反應緩慢，當系統處於漂移干擾下，易來不及控制，形成固定量誤差，如圖二十五。



圖二十四 模擬突波干擾：F=0.1/0.5/0.9



圖二十五 模擬漂移干擾：F=0.1/0.5/0.9

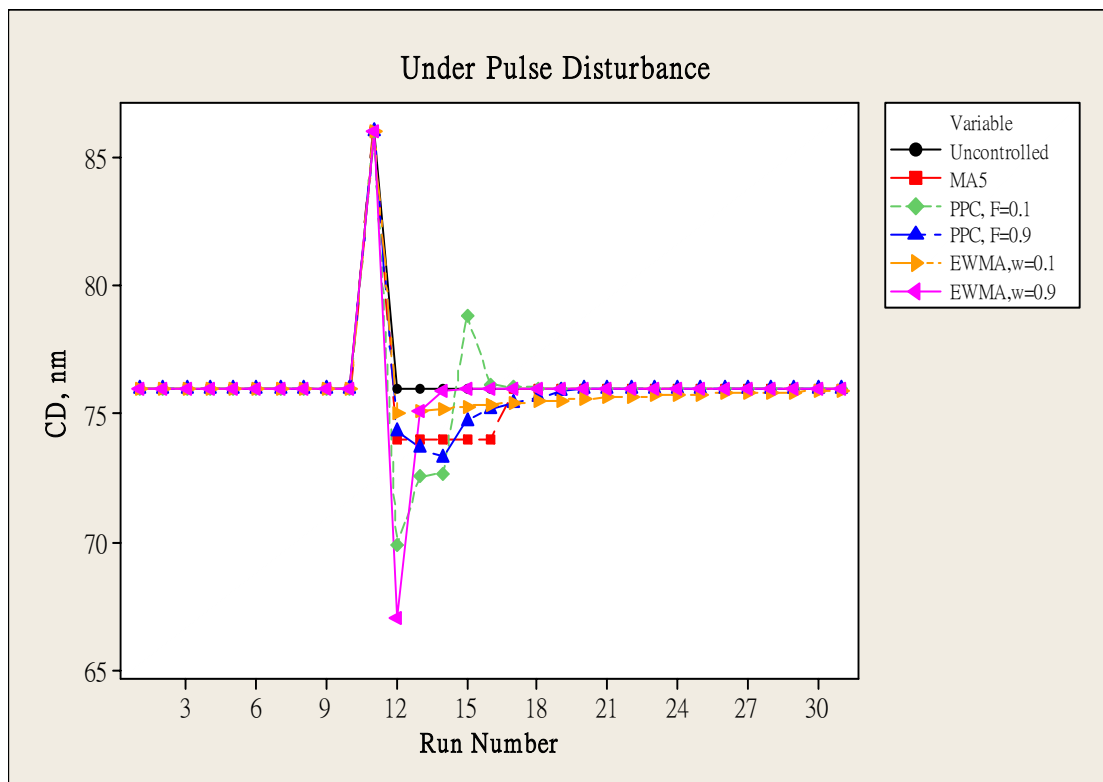


圖二十六 模擬固定偏移干擾：F=0.1/0.5/0.9

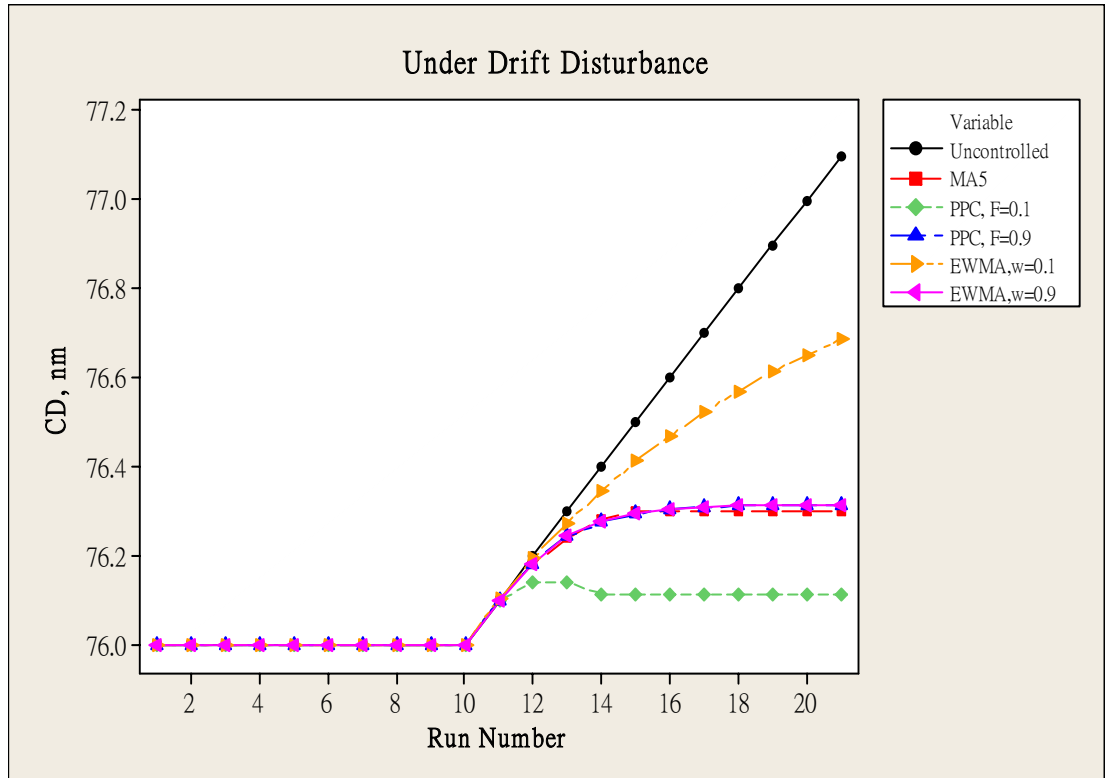
4.3.2 於各種干擾下比較PPC與MA5及EWMA

並將以上之干擾情況模擬於MA5與EWMA控制器上，以比較PPC與MA5及EWMA，其中EWMA之權重 W 以0.1與0.9作為模擬。模擬結果分別於圖二十七(突波干擾)、圖二十八(漂移干擾)與圖二十九(固定偏移干擾)。

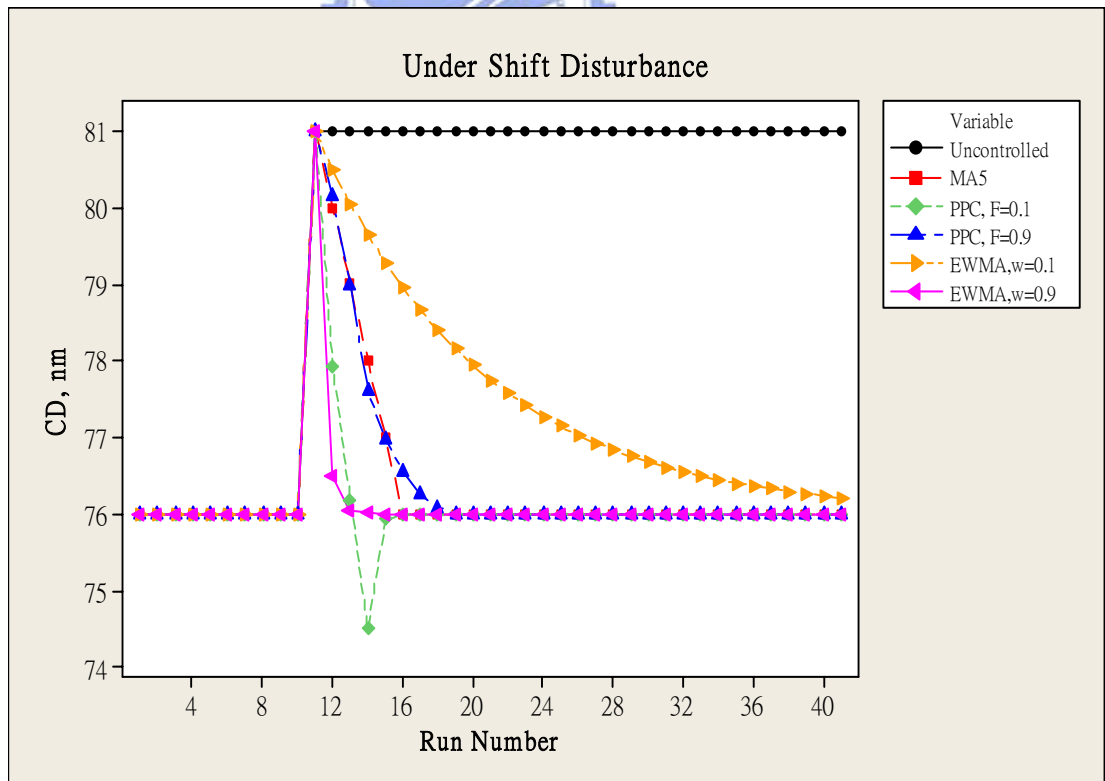
於漂移干擾下，PPC($F=0.1$)有最佳之表現，如圖二十八；而於固定偏移干擾情況下，EWMA($W=0.9$)表現最好，如圖二十九，值得注意的是，PPC($F=0.1$)之反應接近EWMA($W=0.9$)，但PPC會過度反應；於突波干擾下，如圖二十七，PPC($F=0.9$)與EWMA($W=0.1$)及MA5之表現接近，這主要來自於此三者(MA、EWMA於低 W 值時、PPC於高 F 值時)之特性屬低頻過濾器(Low-pass filter)，高頻之干擾將被濾除。



圖二十七 模擬突波干擾：PPC與MA5、EWMA之比較



圖二十八 模擬漂移干擾：PPC與MA5、EWMA之比較



圖二十九 模擬固定偏移干擾：PPC與MA5、EWMA之比較

第五章 實驗結果與討論

5.1 實驗步驟

在完成模擬後，即開始進行晶圓廠之現場實驗。先以線性迴歸求得曝光系統 Gain 值為 $-3.56 \text{ nm}/(\text{mJ}/\text{cm}^2)$ ，之後，即由系統自動依以下所述之流程進行控制：

步驟一： 取得外部輸入：將前 8 批之真實截距項帶入輸入過濾器產生 6 個外部輸入。

步驟二： 算得下一批之截距項估算值 $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ 。

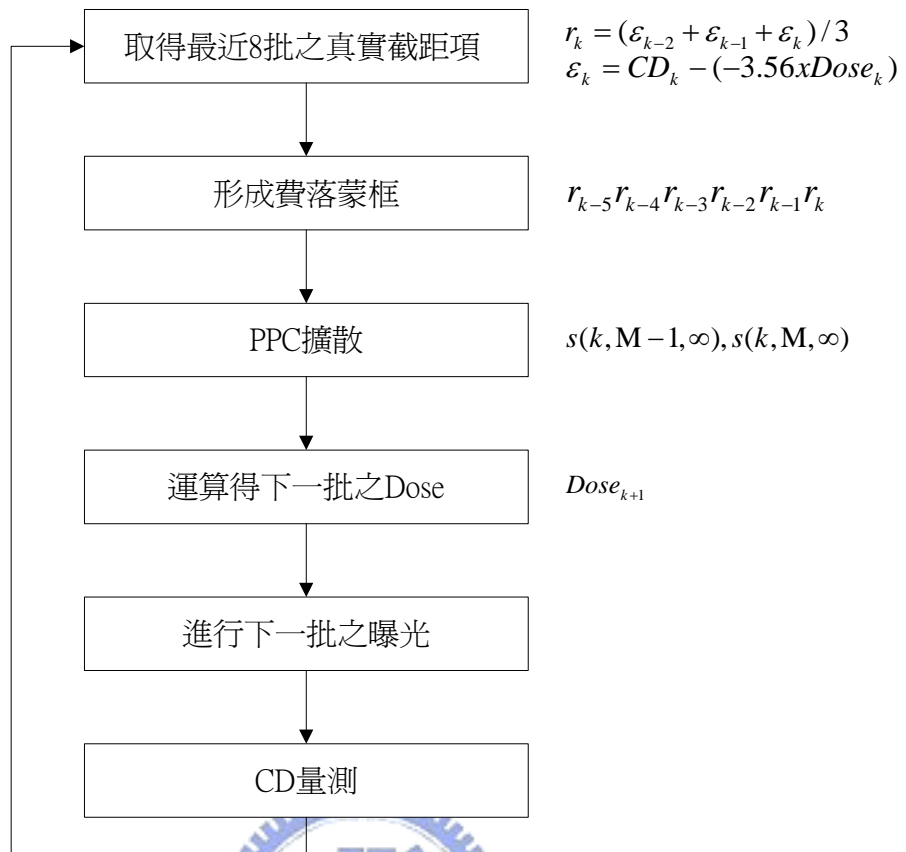
步驟三： 算得到下一批之曝光量條件。

步驟四： 進行曝光。

步驟五： 以 SEM 量取 CD 結果。

重複步驟一至步驟五，流程如圖三十四。



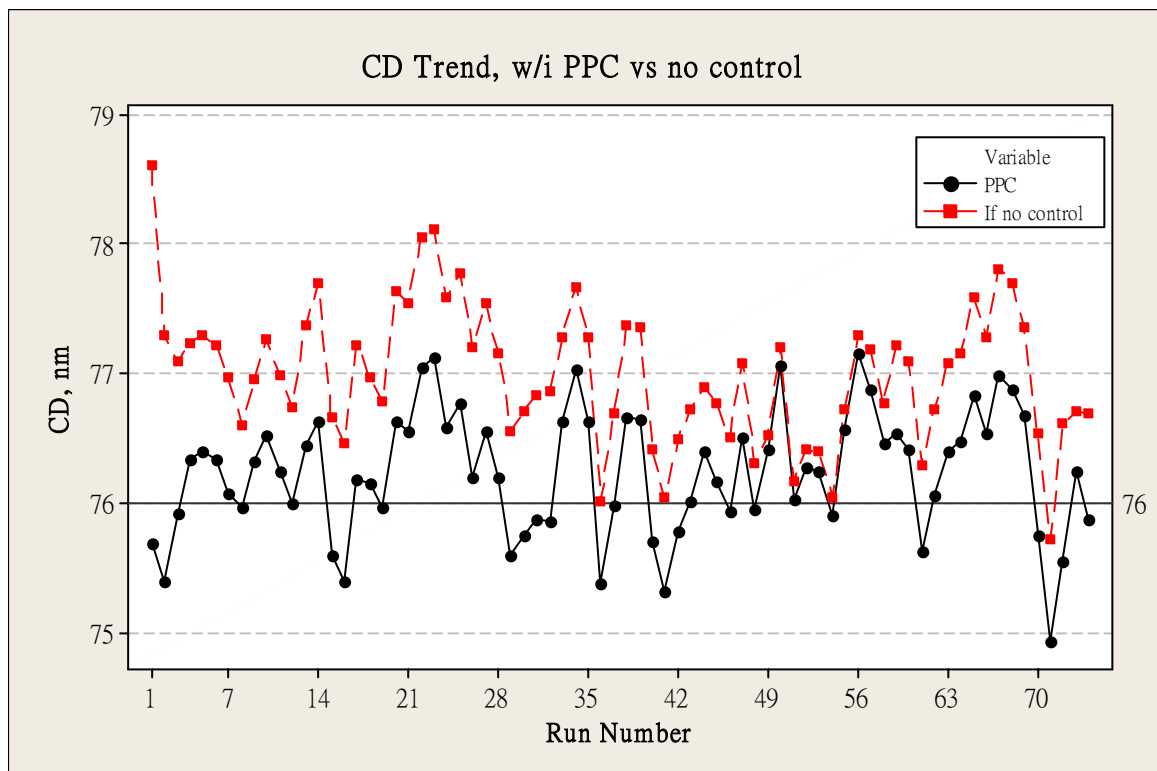


圖三十 實驗步驟

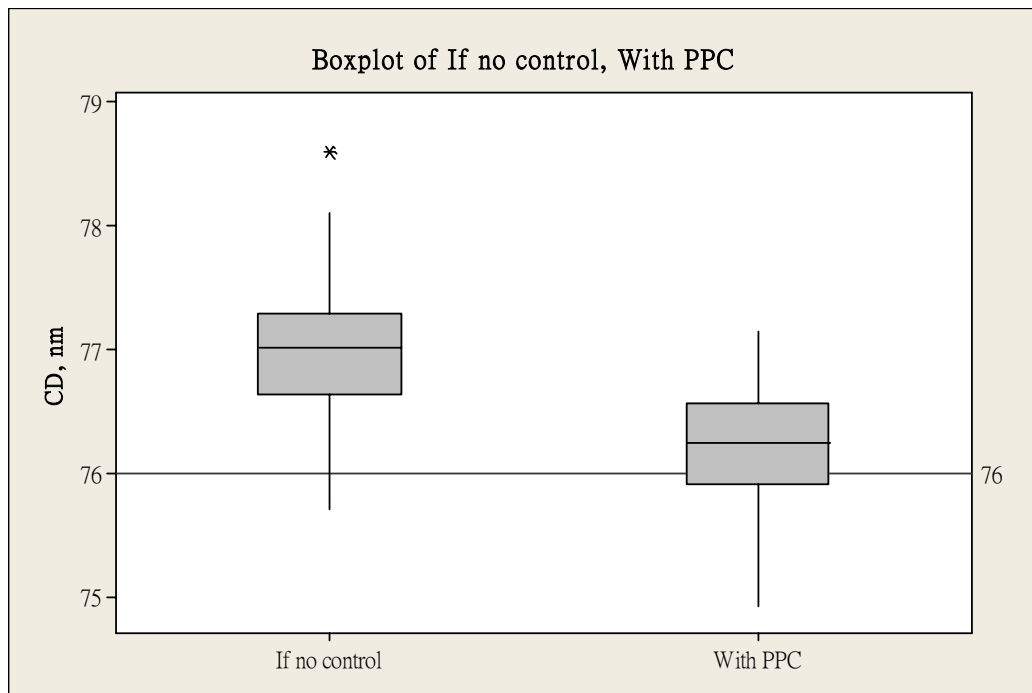
5.2 實驗結果

本次實驗共進行 2 週 73 批 lot(每批 lot 有 25 片晶圓)，以 PPC 控制之，結果如圖三十一，依 4.2.1 節相同之邏輯，還原成無控制時之結果，再與 PPC 之對照組比較，可看出藉由 PPC 控制可得稱職之表現，CpK 可由 1.246 提昇至 1.919。

其中中位數為 76.253 nm，平均值為 76.237 nm，標準差 σ 為 0.4802 nm，且多數點皆落於 $76 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ 之內，此表現已可達成製程之要求 $76 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ ，參考圖三十一與表四。



圖三十一 PPC 實驗結果與無 R2R 控制之比較



圖三十二 PPC與無R2R控制之結果比較盒鬚圖

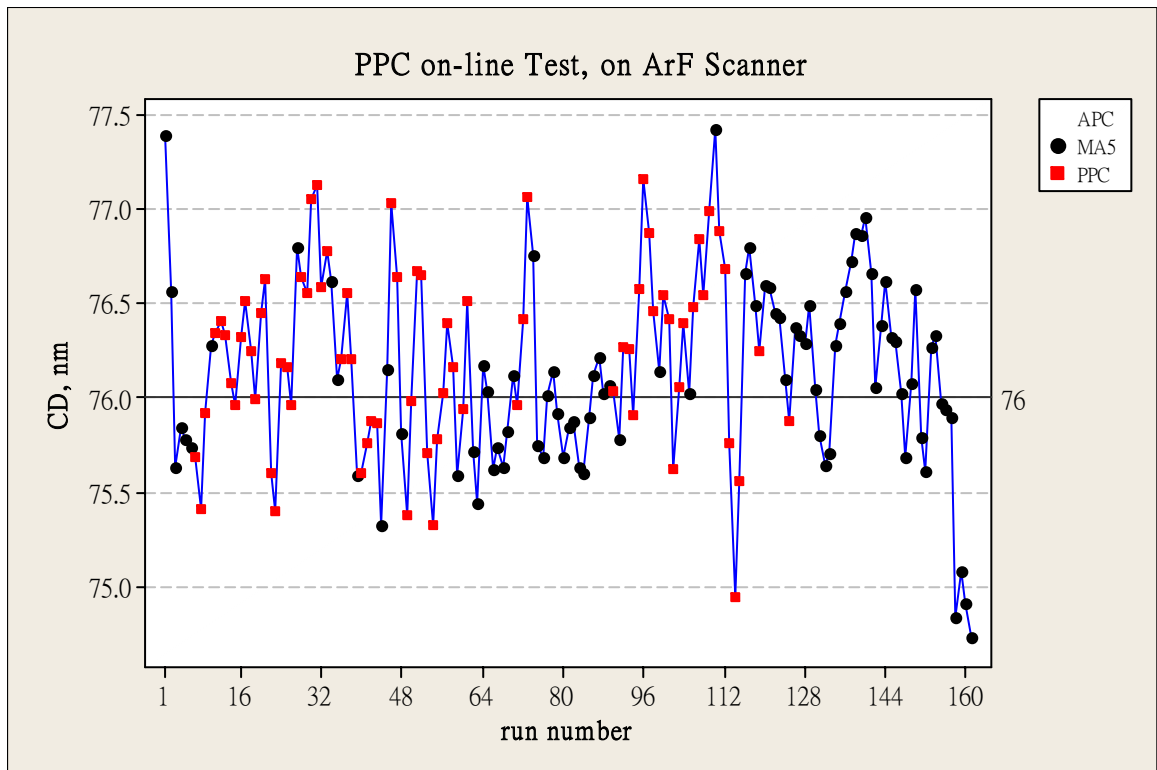
表四 PPC與無R2R控制之實驗結果比較

	N	Mean	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
With PPC	73	76.237	0.480	76.253	2.083	0.079	1.919
Without PPC (Without R2R)	73	77.000	0.535	76.989	1.869	0.333	1.246

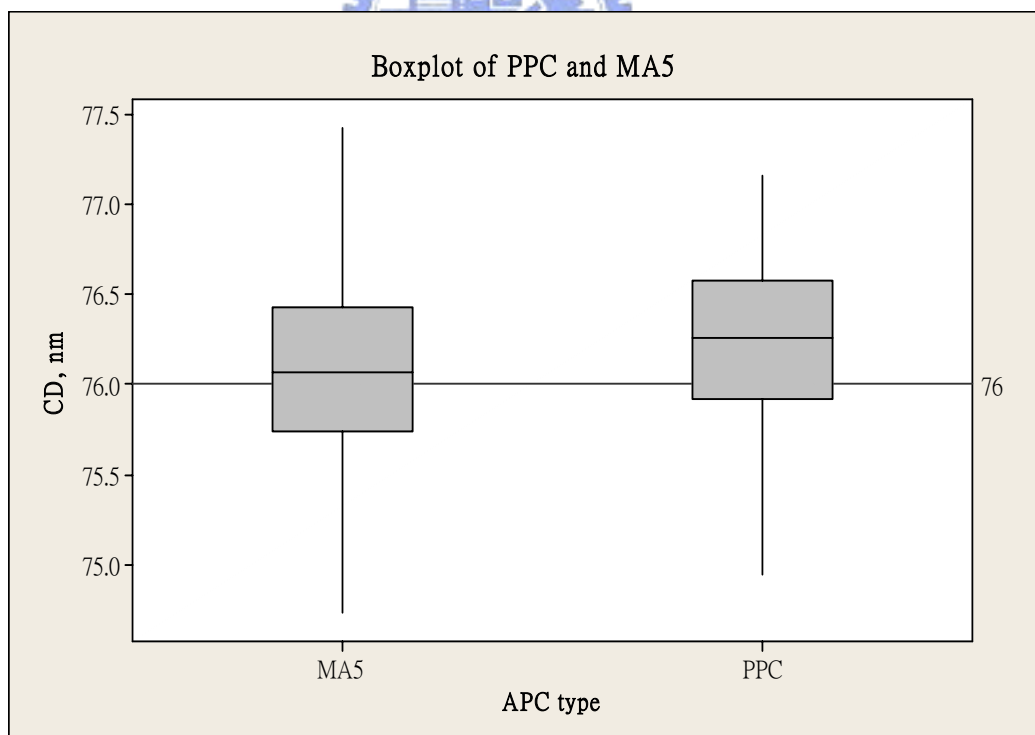
5.2.1 PPC 與 MA5 之結果比較

因本實驗之進行為系統自動派工，除了 PPC 之實驗組之外，生產線之其他產品仍持續以 MA5 進行控制，因此可用以比較之。

對照組之 MA5 中位數為 76.061 nm，平均值為 76.086 nm，標準差 σ 為 0.500 nm，PPC 之 CpK 為 1.979，MA5 之 CpK 為 1.943，二者表現接近，MA5 之分布較發散，但 MA5 分布較接近目標值，由圖三十三，圖三十四及表五可見。



圖三十三 PPC實驗結果與MA5之比較圖



圖三十四 PPC實驗結果與MA5之比較盒鬚圖

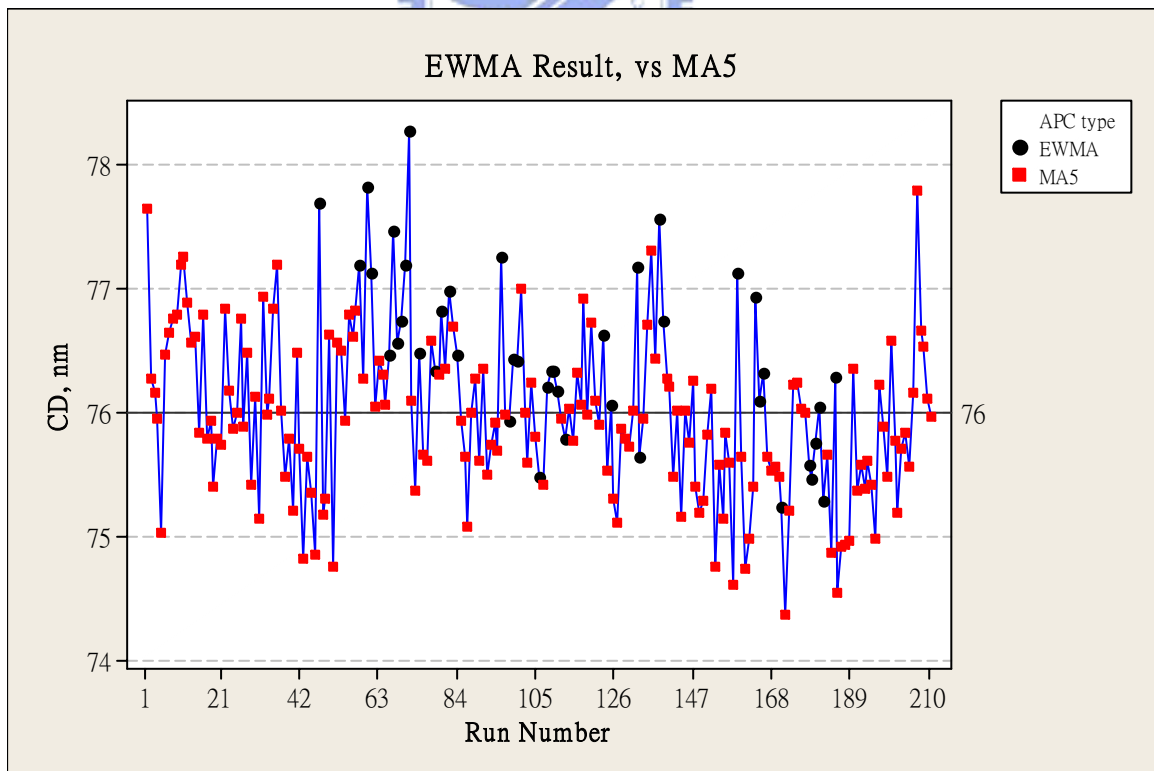
表五 PPC與MA5之結果比較

	N	Mean	MSE	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
PPC	73	76.237	0.2837	0.480	76.253	2.083	0.079	1.919
MA5	88	76.086	0.2547	0.500	76.061	2.000	0.029	1.943

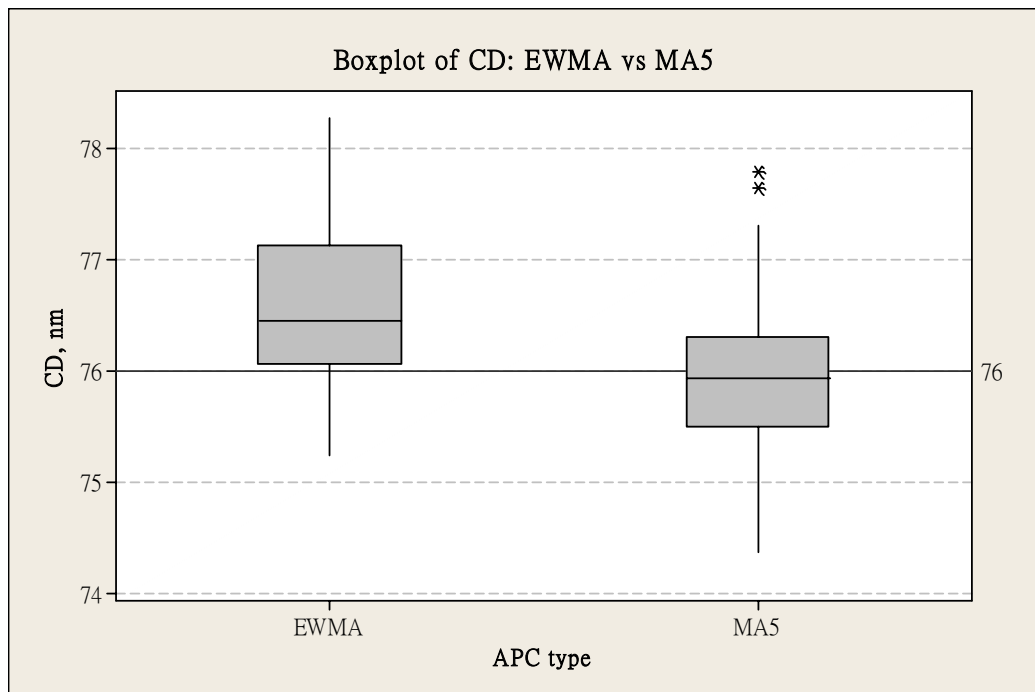
5.2.2 EWMA 與 MA5 之結果比較

本實驗並進行了 EWMA 之對照組以作為比較，此 EWMA 之實驗於另一台曝光機進行，EWMA 之實驗組中間穿插生產線之 MA5 產品，同前一節所述，結果如圖三十五及表六，EWMA 之 CpK 為 1.161EWMA，MA5 之 CpK 為 1.541。

EWMA 初期之數點都偏上方，其後各點與 MA5 表現接近。於圖三十六中亦可見 EWMA 於此次實驗中之表現不如 MA5，推測 EWMA 表現不佳之原因主要來自 EWMA 實驗中連續投入實驗批，而 CD 量測延遲致無法及時回饋，如圖三十五中之 EWMA 點皆偏單邊。



圖三十五 EWMA與MA5之比較



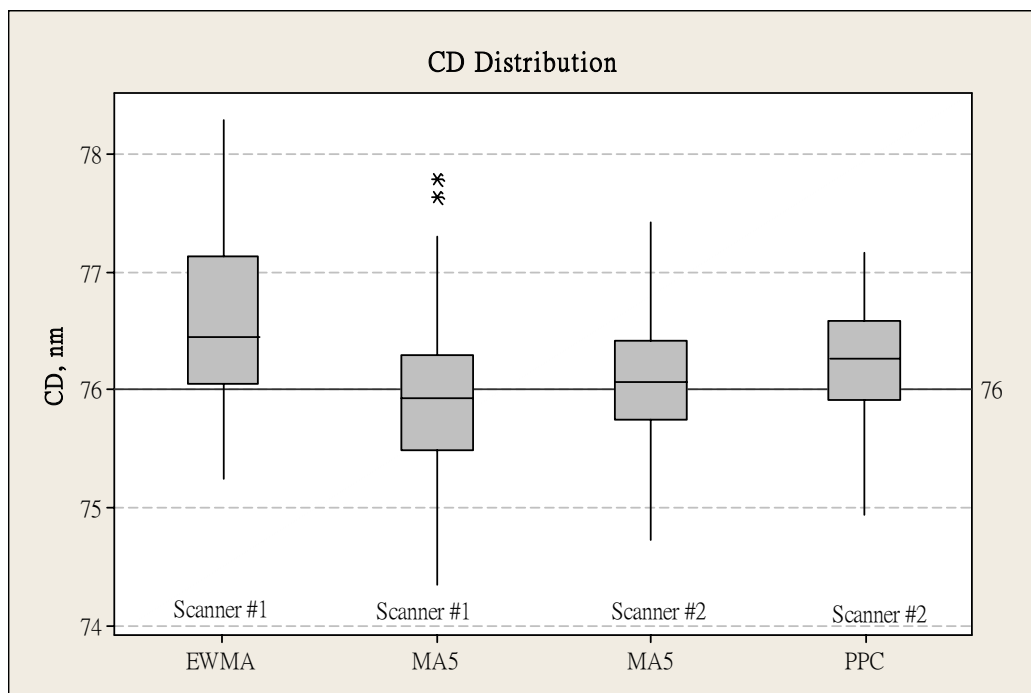
圖三十六 EWMA與MA5之比較盒鬚圖

表六 EWMA與MA5之結果比較

	N	Mean	MSE	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
EWMA	42	76.517	1.033	0.713	76.442	1.403	0.172	1.161
MA5	169	75.912	0.46	0.630	75.922	1.587	-0.029	1.541

5.2.3 EWMA、MA5 與 PPC 之結果比較

雖然 EWMA 實驗之曝光機與 PPC 實驗之曝光機為不同機台，但約略可看出 PPC 所得之 CD 最為收斂，參考圖三十七與表七，PPC 與 MA5 之中間值接近，EWMA 表現不甚理想。



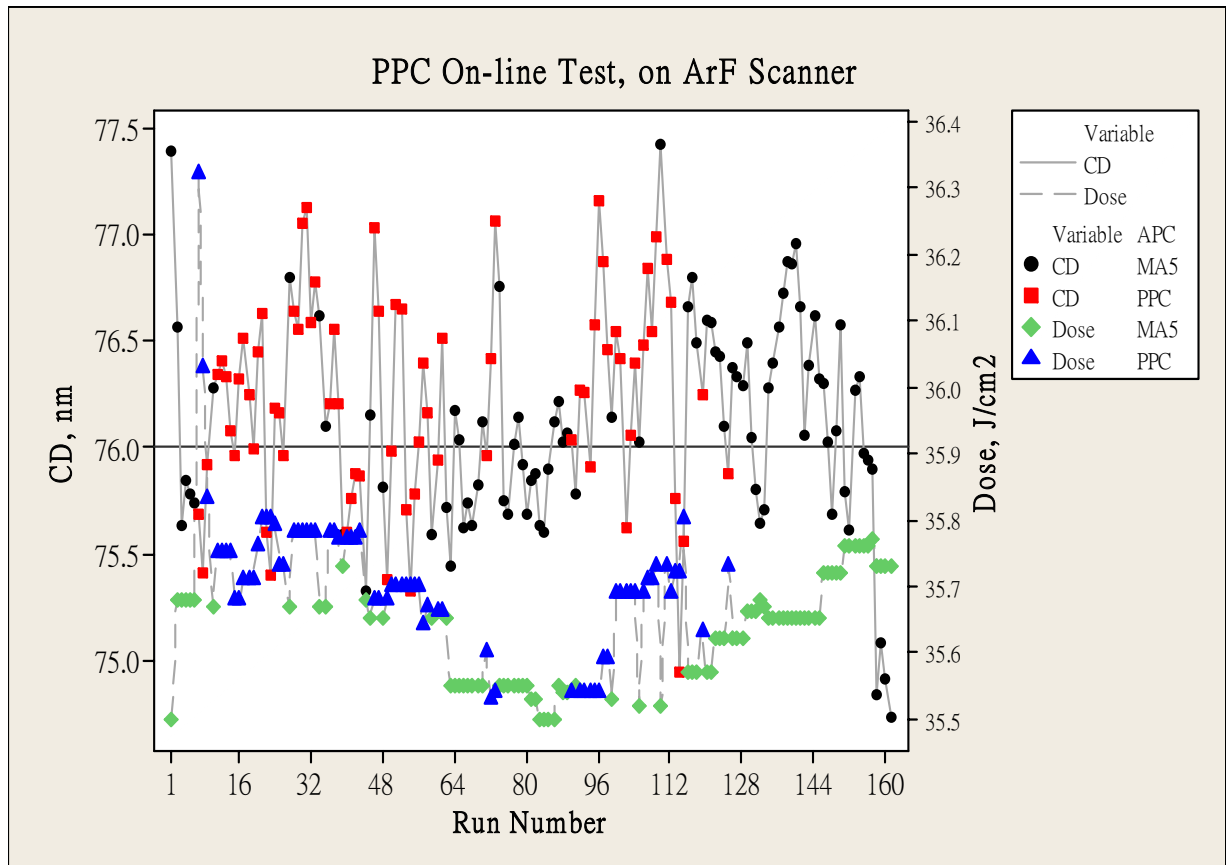
圖三十七 PPC、EWMA 與 MA5 之比較盒鬚圖

表七 PPC、EWMA 與 MA5 之結果比較

		N	Mean	MSE	StdDev	Median	Cp	Ca	Cpk
Scanner#1	EWMA	42	76.517	1.033	0.713	76.442	1.403	0.172	1.161
	MA5	169	75.912	0.46	0.630	75.922	1.587	-0.029	1.541
Scanner#2	PPC	73	76.237	0.2837	0.480	76.253	2.083	0.079	1.919
	MA5	88	76.086	0.2547	0.500	76.061	2.000	0.029	1.943

5.3 討論

1. 由目前之數據可得知 PPC 控制器可確實改善曝光製程。
2. 目前之實驗數據尚無法得知 PPC 控制器優於 MA5 控制器。
3. 如 4.3.2 節之模擬結果所示，不同的 R2R 控制器於不同的干擾下，其性能各有優劣。PPC 之優勢推論會顯示於具一定漂移趨勢之製程，本次實驗之干擾狀況不易明顯看出此一優勢，推論此乃因為干擾多屬隨機干擾之故。
4. 在實務上，由量測得 CD 值至進行曝光量之補償有時間差，致使在同樣曝光條件下常常需連續處理數批，來不及回饋，如圖三十八，此因素為 R2R 控制器性能之一大普遍性障礙。



圖三十八 PPC實驗結果：加入曝光量

第六章 結論與未來工作

6.1 結論

本論文已成功將 PPC 運用至於 300mm 晶圓廠之 CD 控制，此實驗為 PPC 首次運用於半導體晶圓廠進行 R2R 控制。

PPC 結合移動平均法以過濾隨機干擾，並經由費洛蒙擴散來估測製程趨勢，結果顯示 PPC 確實可以改善製程批次間之變異。透過 PPC 可自動控制製程使貼近目標值，當 CD 偏離目標值時，曝光量將依照 PPC 之估測而修正曝光量，此曝光量之修正可補償前製程之變異以及曝光製程本身之變異，PPC 對趨勢之估算表現稱職。



6.2 未來工作

1. 如 5.3 節所述，由量測得 CD 值至進行曝光量之補償有時間差，至來不及回饋至下一批，是否有適當估算法可對策之，尙待改進。
2. 不同之量測機台貢獻了部分誤差，此部份可再探討改善。
3. 本文實驗中，不同製程產品彼此穿差貢獻了部分誤差，此部份可再探討改善。
4. EWMA 與 MA 相比較多了一個權重項，可針對不同的製程特性進行調整，但 MA 與 EWMA 皆無法估測下一批之行爲，且此二者皆無法延伸至面內差之補償。PPC 則是採用兩鄰近量測點誤差彼此會互相影響的概念估測下一批之行爲。如果未來發展二維平面的擴散機制，則可以進行面內差之補償。在本論文中，PPC 屬於時間軸的擴散，未來可發展屬於二維平面擴散的 2D PPC，如此可以可延伸至面內差之補償，此爲 PPC 相對於 MA 與 EWMA 之潛在優勢。



參考文獻

- [1] G. E. Box and M. Jenkins, Time Series Analysis – Forecasting and Control, Oakland, CA: Holden-Day, 1976.
- [2] E. Sachs, A. Hu and A. Ingolfsson, Run by Run Process Control; "Combining SPC and Feedback Control", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 8, No. 1, PP. 26-43, February 1995.
- [3] T. Smith, D. Boning, "A Self-Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques", IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part C, Vol. 20, No. 2, PP. 121-132, March 1997.
- [4] N. S. Patel and S. T. Jenkins, "Adaptive optimization of run-to-run controllers: the EWMA example", IEEE Transactions on Semiconductor Engineering, Vol. 13, No. 1, PP. 97-107, February 2000.
- [5] D. C. Enrique, "Long run and transient analysis of a double EWMA feedback controller", IIE Transactions, Vol. 31, No. 12, PP. 1157-1169, December 1999.
- [6] S.T. Tseng, Wheyming Song, and Yu-Chi Chang "An Initial Intercept Iteratively Adjusted (IIIA) Controller: An Enhanced Double EWMA Feedback Control Scheme", IEEE Transactions on Semiconductor Engineering, Vol. 18, No. 3, PP. 448-456, August 2005.
- [7] X. A. Wang and R. L. Mahajan, "Artificial neural network model-based run-to-run process controller", IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Parts C, Vol 19, No. 1, PP. 19-26, January 1996.
- [8] J. A. Sauter, Robert Matthews, H. Van Dyke Parunak, Sven A. Brueckner, "Performance of Digital Pheromones for Swarming Vehicle Control", Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Agents and Multi agent Systems, AAMAS 05, PP. 1037-1044,

2005.

- [9] J. Moyne, E. D. Castillo, and A. M. Hurwitz, Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing, CRC Press, 2001.
- [10] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Oxford, 1996.
- [11] J. Antony, Design of Experiments for Engineers and Scientists, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [12] S. Brueckner, "Return from the Ant: Synthetic Ecosystems for Manufacturing Control", PhD thesis, Humboldt University Berlin, 2000.
- [13] G. Beni, "The Concept of Cellular Robotics System." Proceedings 1988 IEEE International Symposium on Intelligence Control, PP. 57-62, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1988.
- [14] G. Beni and J. Wang, "Swarm Intelligence." Proceedings Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan, PP. 425-428, Tokyo: RSJ Press, 1989.
- [15] G. Beni and J. Wang, "Theoretical Problems for the Realization of Distributed Robotic Systems." Proceedings 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, PP. 1914-1920, Los Alamitos, CA:IEEE Computer Society Press, 1991.
- [16] G. Beni and S. Hackwood, "Stationary Waves in Cyclic Swarms." Proceedings 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control, PP.234-242, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1992.
- [17] S. Hackwood and G. Beni, "Self-organizing Sensors by Deterministic Annealing." Proceedings 1991 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, IROS'91, PP. 1177-1183, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1991.

- [18] S. Hackwood and G. Beni. "Self-organization of Sensors for Swarm Intelligence." Proceedings 1992 International Conference on Robotics and Automation, PP. 819-829, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1992
- [19] A.V. Butrimenko, "On the Search for Optimal Routes in Changing Graphs." Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Tekhn. Kibern. 6 , 1964.
- [20] V.L. Stefanyuk, " On Mutual Assistance in the Collective of Radiostations." Information Transmission Problem 7, 1971, PP. 103-107.
- [21] M.L.Tsetlin, Automation Theory and Modeling of Biological Systems. New York, Academic Press, 1973.
- [22] 李德修, "費洛蒙傳遞控制器 - 結合群體智能與先進製程控制的控制器", 國立交通大學, 未發表博士論文, 2007年。
- [23] J. S. Hunter, "The exponentially weighted moving average," J. Qual. Technol., Vol. 18, PP. 203–209, 1986.
- [24] S. Bulter and J. Stefani, "Supervisory run-to-run control of polysilicon gate etch using *in situ* ellipsometry," IEEE Trans. Semiconduct. Manuf., Vol. 7, PP. 193–201, May, 1994.
- [25] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, PP. 1942–1948, 1995.
- [26] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, "The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 26, PP. 29–41, February 1996.
- [27] J. M. Bishop, "Stochastic Searching Networks," Proceeding of 1st IEE Conference on Artificial Neural Networks, London, PP. 329-331, October 1989.
- [28] S. Brueckner, Return from the Ant: Synthetic Ecosystems for Manufacturing Control,

PhD thesis, Humboldt University Berlin, 2000.

