

以限制理論為基礎的晶圓製造系統派工法則的研究

A TOC-BASED JOB DISPATCHING METHOD FOR SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

謝淑華* 侯凱中†

Suhua Hsieh Kai-Chung Hou

*教授 †研究生

國立台灣大學機械工程學系

*Professor †Graduate student

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

Most of the traditional manufacturing systems apply flow-line layout, and there is very few phenomenon of reentrance. The values of all WIP in a station are similar. Therefore, the maximum throughput always leads the maximum profit. This results throughput is used as an indicator in determining optimal dispatching rules. In a wafer fabrication system, products have to re-visit machines many times. The value of a lot of WIP in a station is very different from that of another lot. The number of layer processes increases the value of wafer. The dispatching rules based on maximum throughput no longer leads maximum profit.

The main purpose of this study is to develop a profit-based dispatching rule by the theory of constraints (TOC) for wafer fabrication. In this study the present costs and values of WIP wafers based on the consumption of system resources are estimated. The profitability of each WIP wafers is thus derived. By comparing their associated profitability of a time unit among all WIP wafer lots, the one with highest profitability is selected to be processed next. A profit-based dispatching rule named DTC (Dispatching by theory of Constraints) is therefore developed. For the purpose of evaluation of the proposed DTC, a wafer fabrication simulation model is built in this study. Besides using DTC to dispatch jobs, MCR and MBS dispatching rules are adopted, respectively. Simulation results reveal that MCR and MBS do not respond to profit, while DTC does. Simulation results show that DTC does lead high-profit-wafers to short cycle times, and thus reduces the WIP inventory effectively.

Keywords: dispatching rules, theory of constraints, system resources, profit.

摘要

生產事業都需要依賴營利以維持生存，大多數的傳統製造業基本上採用生產線的方式，在製品鮮有回流加工的現象，因此大部分在製品在某一製程的獲利基礎相似，於是大多數的派工法則即使以限制理論為基礎，所期望加強的為物流，而不討論金流。但對晶圓製造系統而言，回流現象嚴重，某一製程的在製品獲利基礎可能相去甚遠。但目前晶圓製造系統仍以物流的觀點建立派工法則，以致於機台的派工決策，常常不能直接引領系統至最佳獲利。

本研究擬提出以產品獲利能力為判準的派工法則。所提出的法則仍以限制理論 (Theory of Constraints) 的觀點出發，藉著在製品的系統產能資源消耗量，提出晶圓在製品成本、現階段價值和獲利強度的估算法，並發展出一系統化的限制理論基礎派工法則 (Dispatching by theory of Constraints, DTC)，以期使得高獲利能力產品的生產反應速率加快、囤積成本下降，而達到系統整體獲利能力提昇的目標。本研究以模擬模型，進行 DTC、MCR 和 MBS 法則生產獲利的績效評估。模擬實驗結果發現，MCR、MBS 派工法則不具備檢視產品獲利的能力，而 DTC 法則可提高獲利能力高的產品的生產反應速率，且將囤積成本有效降低，並改變在製品加工時間的分佈，不良率降低。

關鍵詞：派工法則、限制理論、系統資源、獲利。

1. 研究背景與動機

由於半導體晶圓製造有下列的特質：1. 市場價格變化大，高成本的產品不一定是高利潤的產品。2. 產

品週期短、交期滿足度要求高。3. 製造成本大多來自設備折舊等間接成本。4. 晶圓自投料到產出的價格變化甚大。5. 製程長且影響製程的因素多。6. 成批加工和隨機的再進入 (reentry) 的現象使得半導體生產線

不平衡 (unbalanced)。使得系統排程的困難度高。尤其在多產品混合生產的系統之中，因為傳統的派工法則不具備檢視產品售價或獲利的能力，所以高獲利能力的產品，仍與低獲利能力產品機台的派工極為相似，如此導致系統囤積成本居高不下，現金流動率、系統獲利也無法提昇。晶圓良率與晶圓批的停滯時間長短有關，一般而言停滯時間越長，良率越低。所以應令加工至後段，或是獲利能力較高的晶圓批，迅速離開系統產出，以免損壞導致較高的損失且以提高現金週轉率，對生產系統來說，直接掌握在製品對系統獲利的影響，將可以更有效地提昇系統的獲利能力。因此建立晶圓獲利能力的評估方法，由獲利的角度來決定派工是有必要的。

Goldratt [1] 提出限制理論，認為系統產能的受限於瓶頸機台的加工速度。晶圓製造系統中，系統產能當然受限於瓶頸機台的加工速度。限制理論認為製造系統的目標是賺錢，對一般工廠來說，同一機台一般只針對價格接近的類似產品加工，則加工不同的產品對系統整體利益來說都是一樣的。但是半導體產品的價格差異極大，所以即便是生產的數量相同，在產值上也可能相差很多。因此採用限制理論對物流最大化的作法，應改為以產值的最大化的金流概念。

Baudin [2] 整理出目前晶圓製造系統中五種派工法則：1. 先進先出法 (First In First Out, FIFO)。2. 最早交期法 (Earliest Due Date, EDD)。3. 最短加工時間法 (Shortest Processing Time, SPT)。4. 浮時法 (Slack)。5. 關鍵比值法 (Critical Ratio)。本著 QNET 方法 (Harrison and Nguyen, 1993), Dai 等人 [3] 提出以執行效率為判準的派供法則。Glassey 與 Resendes [4] 以限制理論飢餓避免法則 (Starvation Avoidance) 的觀點，提出 closed-loop job control policy，進行加工批次的選擇。Pierce [5] 提出一種以晶圓在製品價值為基礎的半導體派工概念 (Value-Based Dispatching for Semiconductor Wafer Fabrication — VBD)，建議賦予各個在製品明確的價值，有助於派工時的直覺判斷和投料選擇。

成批機台經常為晶圓製造系統中的瓶頸機台，因此對成批機台的派工研究為晶圓製造的重要研究。Glassey 與 Weng [6] 提出最小批量法則 (Minimum Batch Size rule — MBS)，研究單一成批機台加工系統至少有 L 個在製品才可進行加工。Bitran 與 Tirupati [7] 與 MBS 方法一樣，針對多產品單一成批機器加工的系統進行研究。Hoitomt 與 Luh [8] 利用最早到期法則 (Earliest Due Date rule — EDD)，進行成批產品混合生產和投料時間的研究。由於不同產品別的在製品不能分配在同一批次中加工。Uzsoy 等人 [9] 進行了不相容批次的研究的回顧與未來研究的方向。Glassey

與 Weng [4] 建立 Dynamic Batching Heuristic — DBH 法則，以動態規劃方式進行在製品成批的最佳化研究，並獲得平均等候時間最小化的結果。Fowler 等人 [10] 將 DBH 修改至多產品的系統中，並引進滾動幅度 (Rolling Horizon) 的觀念，稱為 Next Arrival Control Heuristic — NACH，在每一個新品圓批到來時，立即修正原先的排程資料。Weng 與 Leachman [11] 提出最小成本率 (Minimum Cost Rate — MCR) 法則，該研究試圖降低等候線內等候加工晶圓批的數目，使單位時間的持貨成本最小化。Robinson 等人 [12] 將滾動區間觀念納入成本率 (CR) 函數中，提出 Rolling Horizon Cost Rate Heuristic 法則。Van Der Zee 等人 [13] 結合 NACH 與 MCR，提出 Dynamic Job Assignment Heuristic，此法與 MCR 的差別，在於加入如設定成本等其他成本因素。Alexander 與 Matthias [14] 研究半導體製造系統的看版 (kanban) 系統，並以單版看版系統的成批策略與暫存區位置，與數個加工策略進行比較。

限制理論提出後，Blackstone Jr. [15] 認為近年來限制理論的發展，已由生產規劃跨足到績效評估、供應鏈管理、行銷策略以及銷售管理的範圍。Lockamy 與 Spencer [16] 認為限制理論環境下的績效評估系統可以提供區域績效與整體績效的相對評量，促使區域性的規劃能得到良好的整體績效。Fredendall 和 Lea [17] 利用限制理論，進行多產品混線生產的主排程規劃 (MPS) 研究。Ronald J. [18] 便曾利用作業基礎成本制和限制理論方法，進行加工週期的縮減研究。Kee 與 Schmidt [19] 則是以限制理論和作業基礎成本制，作為系統資源分配的決策參考，進行混合產品生產決策的研究。

針對在製品明確的價值的研究，Gunasekaran 與 Sarhadi [20] 提出製造系統推行作業基礎成本制 (Activities Based Costing, ABC) 的資訊架構。Boons [21] 利用作業 (Activity) 為成本動因，考慮了因作業而產生的資源消耗，將資源成本追溯至各項作業後，經由作業將成本歸屬到產品或勞務。因此 ABC 制度可為高間接成本的製造系統，提供較佳的成本分析資訊。作業基礎成本制除了關注成本、利潤因素外，還強調作業對消費者的價值，認為獲利性的提昇，不能再是由控制成本而來，乃是必須創造價值並且將之傳送給顧客，而此價值必須大於企業為傳送該價值所投入的成本，如此方能於當今市場上獲利，並認為以作業基礎成本制所建立的績效指標，可以同時擁有重視產品之品質及成本等競爭因素的能力。

本研究主要目的擬利用限制理論對瓶頸和系統資源的看法，估計晶圓在製品成本和價值，同時作為在製品獲利能力估計的依據。建立以系統獲利為目標

的限制理論基礎派工法則 (Dispatching by Theory of Constraints — DTC)，並實作於模擬半導體晶圓製造系統中，評估在製品獲利能力對系統獲利的影響以及資料上的需求，並建立不同獲利能力差異下的多產品混合—加工週期和產能消耗等模式，供操作人員選擇和建立派工法則時的參考，以期達到系統獲利最大化的目標。

2. DTC 晶圓製造系統派工法則之研析

生產系統的收益來自於系統的產出，而成本是系統在投料和產出之間所投注的資源。由於獲利是收益和成本相減的結果，所以提高獲利的方法不外乎提高收益或是降低成本。提高收益的方法可能有：提高高收益產品的產量、提昇高收益產品的生產反應速率；而降低成本，則可以從減少在製品和提昇良率著手。由於晶圓製造系統內產品的投料比例和產出比例完全相同，在市場決定了產品的產出比例後，系統獲利率提昇就只能夠來自於高獲利的產品的加工週期壓縮。但是事實上高獲利的產品加工週期的壓縮，並不只是能提昇產品的反應速率，還能夠減少囤積成本和提昇良率。

2.1 DTC 派工法則的建立

DTC 派工法則以高獲利速率為派工目標的優先權派工判準。建立 DTC 派工法則步驟如下：(1) 建立瓶頸機台機率分配，(2) 晶圓在製品現階段系統資源的消耗，(3) 晶圓在製品現階段加工成本估算，(4) 晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間成本的估算方法，(5) 晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間價值的估算方法，(6) 晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間獲利能力估算方法，(7) 晶圓在製品現階段獲利能力估算方法，(8) 建立優先判準權的法則。

(1) 建立瓶頸機台機率分配

限制理論強調瓶頸和系統之間的關聯，認為瓶頸是系統產能的唯一關鍵。本研究從這個觀念出發，進行晶圓生產系統瓶頸發生現象的相關研究。表 1 為某一特定的產品與產能下，利用 MBS 和 FIFO 法則進行派工的模擬晶圓生產系統的執行 360 天模擬，前五名設備成為瓶頸的機率分配統計資料。

透過模擬結果，可以發現瓶頸飄移的現象出現在系統中的每一種機台群上（見圖 1），其中以灰色所標示者為批量機台。根據限制理論，本研究認為這些機台群均可稱為限制產能資源。批量機台成為瓶頸，除了 FLOW 機台群有自 50.9% 至 12.2% 的變化外，其他批量機台所佔的時間比例並不高；NITRIDE、PHOTO

表 1 瓶頸發生位置與機率

Rank	Type	Time of Bottleneck (Hr.)	Ratio (%)
1	FLOW	3419.673889	39.69916314
2	NITRIDE	1804.036389	20.94314741
3	PHOTO	762.4602778	8.851438942
4	DRY_MET	566.7911111	6.579908086
5	DRY_OX	507.5255556	5.89188908
	Total	295 (days)	81.97 (%)

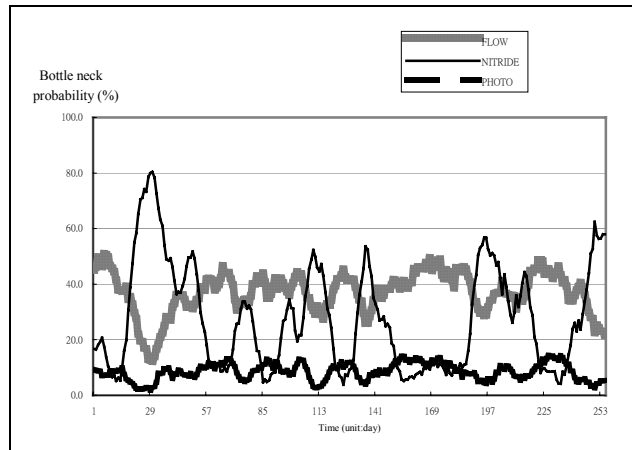


圖 1 晶圓瓶頸機率機台群之瓶頸機率時間變化圖

則可能是再加工回流，以及加工時間較長的緣故，瓶頸機率持續居高。但由圖 1 也可發現，雖然 FLOW 平均瓶頸機率較高，但某些時刻 NITRIDE 的瓶頸機率也有超過 FLOW 甚多的狀況出現。

(2) 晶圓在製品現階段系統資源的消耗

在系統中，同樣消耗 PHOTO 機台或 MARKED 機台一單位時間，所消耗的系統資源其實有很大的差異。由於限制產能資源對系統產能的影響力，取決於該限制產能資源成為瓶頸的機率，所以我們假設間接成本與瓶頸時間完全相關，令某次加工的系統資源消耗量 S_{ij} ，為該加工機台群的瓶頸機率 f_k 和加工時間 t_{ij} 的乘積。利用這個方法，便可由在製品消耗限制產能資源的歷史資料，估計出晶圓在製品的瓶頸資源消耗量，並計算出該在製品所消耗的系統資源。

$$S_{ij} = f_k \times t_{ij} \quad (1)$$

$$f_k = T_{k \text{ machine bottle neck}} / T_{\text{time period}}$$

其中：

S_{ij} ：i 產品進行工序 j 的加工所應負擔的系統資源消耗量

f_k ：第 k 機台瓶頸機率

t_{ij} ：i 產品進行工序 j 的加工時間

$T_{\text{time period}}$ ：統計時幅

$T_{k \text{ machine bottleneck}}$ ：時幅內本機台群成為瓶頸的總時間

i ：產品別

j ：製程工序

在製品甲自投料到產出，共計花費了 E 機台 10 分鐘、J 機台 50 分鐘，在製品乙則花費了 E 機台 50 分鐘、J 機台 10 分鐘，其他製程花費之加工時間兩者均相同。總的來看，甲、乙自投料到產出的時間大致相同，因此生產週期的表現並無差異，但甲、乙消耗的系統資源量分別為 42 分鐘與 18 分鐘為 7:3 之比，消耗的系統資源並不相同。

(3) 晶圓在製品現階段加工成本估算

由於晶圓製造直接成本佔總成本的比例較少，對獲利能力的影響較低，故將忽略不予討論，但同時間接成本的計算和分攤方式就變得更加重要了。舉例來說，某一個進行至工序 s 的在製品，其該階段的單位製造成本為：

$$C_{\text{total } i, s} = \sum_{j=1}^s (C_{\text{dir } ij} + C_{\text{indir } ij}) / n_{ij} \approx \sum_{j=1}^s C_{\text{indir } ij} / n_{ij} \quad (2)$$

其中：

s ：已進行之製程工序數

$C_{\text{total } i, s}$ ：一單位 i 產品進行至工序 s 時的製造成本

$C_{\text{dir } ij}$ ： i 產品進行一批次工序 j 的加工所應負擔的直接成本

$C_{\text{indir } ij}$ ： i 產品進行一批次工序 j 的加工所應負擔的間接成本

n_{ij} ： i 產品進行工序 j 時的加工批量

i ：產品別

j ：製程工序別

(4) 晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間成本的估算方法

依照作業基礎成本制的精神，將間接成本依照加工時間分派至產品之上，令間接成本與系統資源消耗量完全相關，便可以得到：

$$C_{\text{total } i, s} \approx \sum_{j=1}^s C_{\text{indir } ij} / n_{ij} = \sum_{j=1}^s C_{ps} \times S_{ij} = C_{ps} \sum_{j=1}^s S_{ij} \quad (3)$$

其中：

C_{ps} ：單位時間系統資源消耗量的成本 (\$/sec)

S_{ij} ： i 產品進行工序 j 的加工時，所消耗的系統資源量

(5) 晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間價值的估算方法

本研究考慮在製品價值應隨工序變化的差異，以便考量同一產品在不同工序下對系統資源消耗的差異。但是不同產品間即便是佔用相同的資源，由於售價、功能、市場、行銷策略等產品間的差異，理所當然地我們也應該給予它們不同的價值。同一種產品的在製品，佔用瓶頸資源較多者可以視為價值較高。但不同產品別間的價值可以以市價為依據。因此，我們可以以產品的售價與系統資源消耗量估計某特定產品在製品單位時間價值的估算方法。故在此建立晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間價值函數 P_{is} 。

$$P_{is} = P_i / \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (4)$$

其中：

P_i ： i 產品每單位的平均售價

P_{is} ：晶圓在製品每單位系統資源加工時間增加的價值

n ： i 產品總製程工序數

類似前一節中的所舉的例子，若系統瓶頸僅飄移於兩個機台群 K、L 間，且瓶頸機率分別為 K:20% 和 L:80%。某時刻在製品 A 共計花費了 K 機台 10 分鐘、L 機台 50 分鐘；同一時刻，另一在製品 B 則花費了 K 機台 50 分鐘、L 機台 10 分鐘。A 產品單位售價為 5,000 元、B 產品單位售價為 50,000 元，則根據式(4)，兩在製品 A、B 的單位時間價值函數約為 1:23。也就是說，雖然 A 產品消耗較多的系統資源，但是考慮生產 B 產品可獲致的收益後，對系統來說加工 B 產品應有更高的價值。

$$P_{As} : P_{Bs} = 5000 / (10 \times 20\% + 50 \times 80\%) : 50000 / (50 \times 20\% + 10 \times 80\%) \approx 1 : 23$$

(6) 晶圓在製品單位時間獲利強度估算方法

將前述的晶圓在製品成本系統資源消耗量的單位時間成本和價值估計函數相減，就可以得到該晶圓在製品系統資源消耗量的單位時間獲利能力，或稱之為系統獲利的強度。

$$\rho_i \approx P_{is} - C_{ps} \quad (5)$$

(7) 晶圓在製品現階段獲利能力估算方法

以限制理論的觀點來看，任何晶圓在製品目前的獲利能力，將取決於它的產品獲利能力以及目前所累計消耗的系統資源，為達到系統獲利最大化的目的，

便必須尋求系統資源消耗量 S 和產品效益綜合考量下產出的最大化。以該產品在製品在 j 階段時所增加的獲利能力估計式和 s 階段時總獲利能力估計式如下：

$$prf_{ijs} = \rho_i S_{ij} \quad (6)$$

$$Prf_{is} = \rho_i \sum_{j=1}^s S_{ij} = \sum_{j=1}^s prf_{ij} \quad (7)$$

其中：

prf_{ijs} ： i 產品在製品在 j 階段時所增加的獲利能力

Prf_{is} ： i 產品進行完畢 s 項工序後，在製品的獲利能力

(8) 建立優先判準權的法則

根據在製品獲利能力估計方法的建立，本研究可以簡單地判別每一個在製品晶圓批現階段的獲利能力，並計算出可於各批次加工的晶圓批的總獲利。經由製程獲知加工所需要花費的時間，則可以得到單位時間內加工不同批次的獲利率。加工獲利率較大的晶圓批，表示單位時間內可以使得較高價值的產品通過，由限制理論則可以推知本次加工，在單位時間內對系統獲利的貢獻亦較大，而優先權 k 計算如下。

$$k = (n \times Prf_{is}) / t_{is} \quad (8)$$

其中：

k ：優先權

n ：該批次數量

因為加工價值較高、加工時間較短的高 k 值晶圓批，對系統獲利速率的貢獻較大，所以利用 k 值的計算，便可建立以系統獲利為基礎的派工法則判準。

2.2 藉由檢視 DTC 派工法則的指標

由於晶圓尚未出售，並無實質獲利，因此本研究擬以 1. 平均加工週期，2. 總囤積成本，3. 平均系統資源消耗量，4. 平均單位系統資源獲利能利比，和 5. 前半製程與總製程時間比作為 DTC 派工法則的檢測指標。說明如下：

- (1) 由於加工週期會影響系統的獲利速率，是績效評估中十分重要的指標，所以檢驗以物流量為準的派工法則與本研究提出的獲利為準的 DTC 派工法則，對獲利強度不同的產品加工週期是否有所影響，以探討 DTC 派工法則的對系統整體的獲利影響。

- (2) 囤積成本會因派工的選擇而有大量的改變，則派工時必須另外將囤積成本的因素考慮在內。既已獲知晶圓批現階段對系統獲利的影響，則將晶圓批的總獲利能力乘上等待時間和利率，即可計算系統因等待而發生的囤積成本。檢視囤積成本亦為選擇派工法則的重要依據。
- (3) 令高價產品面對瓶頸機台時可以有優先加工權，導致較多的系統資源使用在高價產品上。相較於低獲利能力產品必須等待較多數量成批同時加工，每單位的高獲利能力產品就必須分攤較多的資源消耗，但也因為系統投注的額外資源，高獲利能力的產品才得以縮短加工週期。因此檢視不同產品別的每單位產品平均系統資源消耗情形有其必要性。
- (4) 本研究已經將此物流的製造系統，轉換成以獲利為產出的金流系統，在金流考量的製造系統下，平均單位系統資源獲利能利比是合理的指標。
- (5) 晶圓良率與晶圓批的停滯時間長短有關，因此價值越高的半成品應該快速完工，後半製程的半成品應優先加工，如此導致在製品於前半製程花費的時間應該較後半製程所花費的時間長。觀察在製品於前半製程和後半製程所花費的時間的比有其必要性，因此前半製程與總製程時間比唯一合理的檢視指標。

3. DTC 派工法則模擬平台

3.1 模擬實驗平台構建

本研究以 eM_Plant 軟體建構模擬平台，利用物件的關聯結果編寫，將機台群物件依系統設計，給定機台數量、加工旗標等屬性後，加入系統平台中。本研究虛擬一 61 加工工序之半導體晶圓製程和設備資料進行研究，設備資料及製程如附件表 1 和 2 所示。機台數量為機台群內機台的數量，由於機台的功能相同，所以在任一時刻，機台群內的任一可用機台均可選派用來加工；最大容量是指單一機台同一時刻所能容納的最大晶舟數量。數量為 1 者為非批量機台，大於 1 者，則可同時加工同一產品別、同一工序、不大於其容量的任意數量晶舟。有些機台不易發生故障，所以機台資料表中 MTBF 和 MTTR 二項沒有數據。所有虛擬的製程在只有第 16 和 17 機台需要設定。加工時間為定值，在該加工時間內，一個機台可以加工完畢機台內的所有晶圓，若該機台群的再加工旗標為 1，則加工完畢後的產品應通過檢驗站受檢，若為良品即可通過而進入下一製程，不良品則應依再加工製程進行重製。

為了利用限制產能資源資訊，進行在製品現階段獲利能力研究，並建立獲利基礎的批量機台派工法則，以驗證在製品獲利能力對系統獲利績效的影響，因此建立了以下的假設：

1. 可忽略直接成本對獲利估計的影響。
2. 搬運系統和人工均非系統瓶頸之所在，且隨時均可滿足生產系統所需。
3. 不考慮搬運系統所花費的時間。
4. 以晶舟為最小模擬單位，一晶舟承載固定數量之晶圓。
5. 每一製程之加工時間為加工一個晶舟數量的晶圓所花費的時間，且均為已知之定值，與該批次所包含之晶圓數量無關。
6. 不考慮良率的問題。
7. 投料策略將只採取固定時間投料法。
8. 投料將依實驗設計之比例，亂數選取產品類別投料。
9. 任一暫存區或佇列的容量均為無限大。

3.2 檢視 DTC 派工法則對系統獲利的影響

本研究針對製程相同、獲利強度 ρ_i 不同的兩種晶圓產品，進行產品組合的系統獲利研究，經由模擬實驗的進行，觀察本研究提出的 DTC 派工法則，對系統獲利的影響。

(1) 檢視加工週期的變化

首先檢驗 DTC 派工法則與 Glassey 和 Weng 的最小批量 MBS (Minimum Batch Size) 和 Weng 和 Leachman 的最小成本率 MCR (Minimum Cost Ratio) 派工法則在不同的獲利強度與產品組合比例下加工週期的變化。MBS 及 MCR 工法則是以物流最大化為目的，因此我們選擇該兩者為本實驗的對照法則，與本研究所提出的 DTC 派工法則比較。產品組合比率自 A 為 100%、B 為 0%，直到 A 為 0%、B 為 100%；A、B 兩產品的獲利強度 ρ_A/ρ_B 分別為 1:1、1:2、1:4。實驗共進行 2 年 (730 日) 的模擬，將重複進行 5 次後的數據進行平均。實驗結果如圖 2 至圖 4 所示。

從圖 2 至圖 4 中可以發現，很明顯，DTC 法則平均加工週期最短，MCR 優於 MBS 法則實驗。但無論是 MCR 或是 MBS 法則實驗，A、B 兩產品的平均加工週期變化只與產品混合比例有關。隨著產品混合比例漸增，平均加工週期會逐漸下降，原因可能是批量機台成批派工時，每一批次所含的晶圓數量較多所致，也就是說產品獲利能力的高低對平均加工週期並

無影響。至於 DTC 法則，產品獲利能力差異較大時，無論在哪一種產品混合比例之下，高獲利產品 B 的加工週期始終低於 A 產品。在 ρ_B 與 ρ_A 相同倍的實驗中，A 與 B 產品的加工週期在量少 (50% 以下) 時，都呈現漸高的趨勢。反之，A 與 B 產品的加工週期在量多 (50% 以上) 時，都呈現漸低的趨勢。加工週期走勢圖呈現與 MCR 或是 MBS 法則實驗相似。在 ρ_B 為 ρ_A 2 倍的實驗中，B 產品的加工週期在極少量 (4% 以下) 與 A 產品的極多量的加工週期量 (96% 以上) 時接近，隨著 B 產品的比例提高，B 產品的加工週期呈現相對越來越低的趨勢。在 ρ_B 為 ρ_A 4 倍的實驗中，B 產品的加工週期無論在少量 (20% 以下) 以及較多量 (80% 以上) 時，都呈現漸低的趨勢。這可能是因為 A、B 產品的價格差異懸殊，所以在產品 B 數量較少時，幾乎所有的產品 B 都可以得到優先權，故加工週期表現極佳；而在產品 B 投料率較高時，也因為不易受低獲利產品影響而延誤成批動作，故加工週期亦有漸短的趨勢。

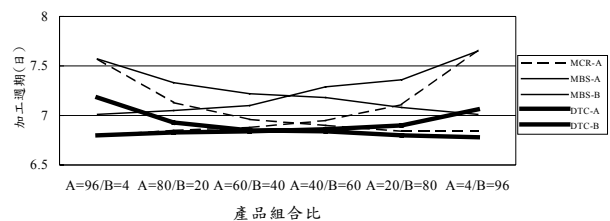


圖 2 在獲利強度為 1:1 下加工週期變化

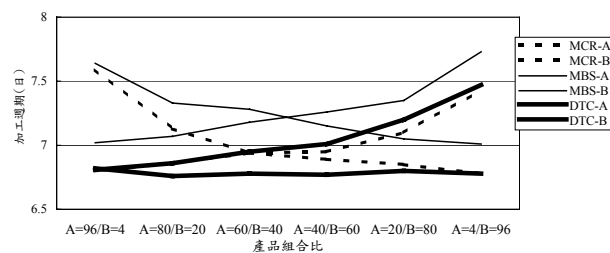


圖 3 在獲利強度為 1:2 下加工週期變化

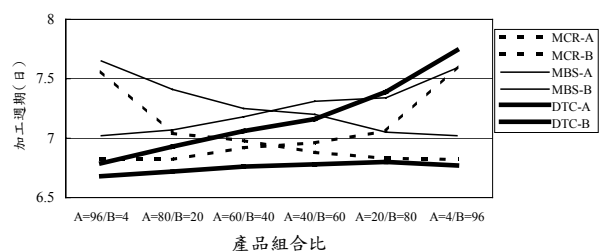


圖 4 在獲利強度為 1:4 下加工週期變化

由實驗得知非獲利基礎的派工方法，對於不同產品混合生產時，無法判斷何者獲利能力較高，也無法得知生產何者對系統較為有利。所以以 MBS、MCR 為控制手段的管理方法在系統獲利上仍存在盲點，無法判別產品獲利能力的不同，也將無法提昇系統巨觀的獲利績效。

(2) 檢視 MCR 與 DTC 囤積成本的差異

基本上而言，MCR 較 MBS 加工週期短，因此在 MCR 與 DTC 平均囤積成本差異將被做比較。此從圖 5 可以發現，對高獲利的產品來說，DTC 法則總是可以比 MCR 法則節省較多的囤積成本，雖然 DTC 對較低獲利的產品，會產生比 MCR 更高的囤積成本，但是幅度遠比節省的囤積成本少，所以對系統來說仍為有利。所以我們可以說，DTC 法則可有效減少囤積成本的發生，對系統整體的獲利有較佳的表現。

(3) 檢視 DTC 平均系統資源消耗

本研究檢視不同產品別的每單位產品 DTC 平均系統資源消耗情形。圖 6 和圖 7 分別為獲利強度為 1:1 與 1:4 在不同產品混合比例下 DTC 平均系統資源消耗情形。經模擬實驗發覺在 A、B 產品獲利強度相同時，每個單位產出的資源消耗量均與產品混合比率有關，投料越多則同一產品為了生產同樣的數量所消耗的資源則越少；但是在 A、B 獲利強度相差較大時，則可以發現 A、B 曲線相交的位置朝向右方移動，該交接點代表 A、B 兩產品消耗相同資源時的投料比例。也就是說，高獲利強度產品每一單位的產出，將逐漸隨著獲利強度的提高而消耗較多的系統資源。

(4) 檢視 DTC 平均單位系統資源獲利比

圖 8 和圖 9 是假設 A、B 產品的獲利強度比為 1:1 與 1:4 時平均單位系統資源獲利比。將圖 8 和圖 9 與圖 6 和圖 7 對照，可以發現平均系統資源消耗量與平均單位系統資源獲利強度完全相關。

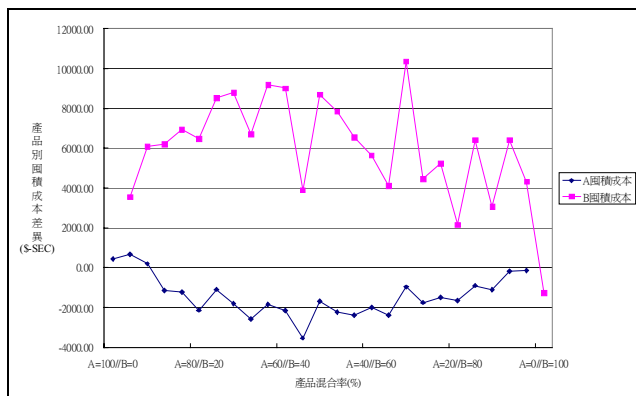


圖 5 當獲利強度比 1:2 時 MCR 與 DTC 平均囤積成本差異

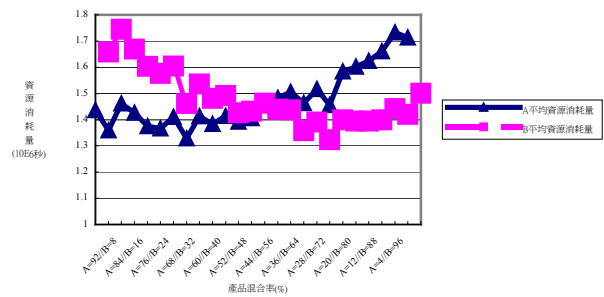


圖 6 獲利強度比 1:1 在不同產品混合比例下 DTC 平均系統資源消耗量

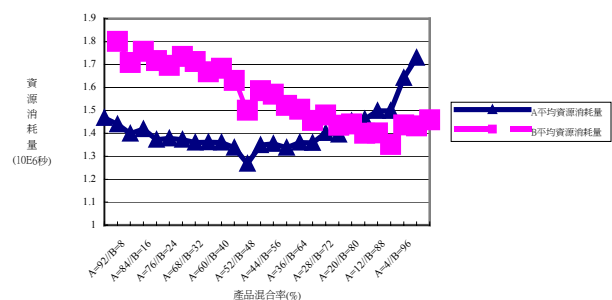


圖 7 獲利強度比 1:4 在不同產品混合比例下 DTC 平均系統資源消耗量

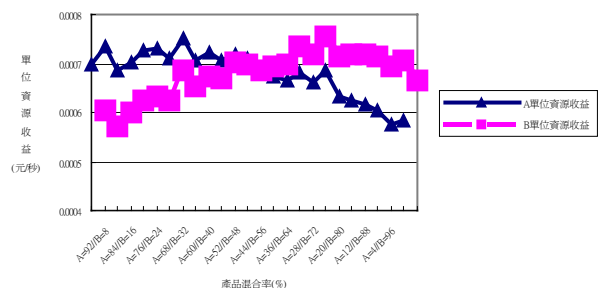


圖 8 當 A、B 產品的獲利強度比為 1:1 時 DTC 平均單位系統資源獲利比

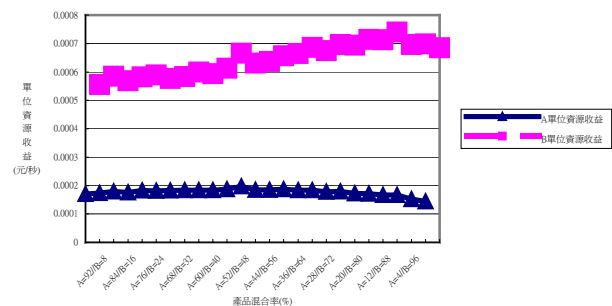


圖 9 是假設 A、B 產品的獲利強度比為 1:4 時 DTC 平均單位系統資源獲利比

(5) 檢視 DTC 平均前半製程時間比

本研究製程共有 61 個工序，故以第 31 個工序為界，加工至第 31 個工序之後稱之為後半製程，否則稱之為前半製程。若某件產出，在前半製程花費時間為 tf ，總加工週期為 T ，則稱該產出的前半製程時間比例為 $tf / T \times 100 (\%)$ 。

圖 10 和圖 11 分別為獲利強度為 1:1 與 1:4 在不同產品混合比例下 DTC 平均前半製程時間比例。由於 DTC 有傾向將消耗較多系統資源的在製品儘速產出的趨勢，所以 DTC 系統中前半製程所消耗的 A 與 B 加工週期時間比例與獲利強度的關係，隨著獲利強度比例增加，由 50% 左右，A 提昇至 50% 以下，而 B 提昇至 50% 以上。對高獲利強度產品來說，產品獲利能力以及產品組合，影響前半製程時間比例的變化不大。但是對於低價品來說，則由於派工優先的問題，使得獲利強度差異較大時，A 產品在製品的前半製程時間比例有漸低而趨向 50% 的趨勢，但隨著 A 的價格比逐漸增高，其前半製程時間比例也逐漸增高的趨勢。表現雖仍較 B 為差，但可達 53% 以上。因此獲利基礎的派工法則，對降低系統囤積系統資源的作用，將同時有效地發揮在 A、B 兩不同產品上。

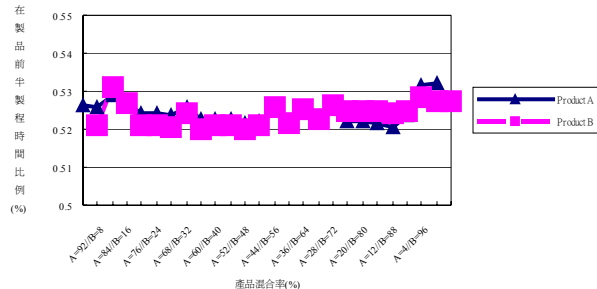


圖 10 獲利強度為 1:1 下不同產品混合比例下 DTC 平均前半製程時間比

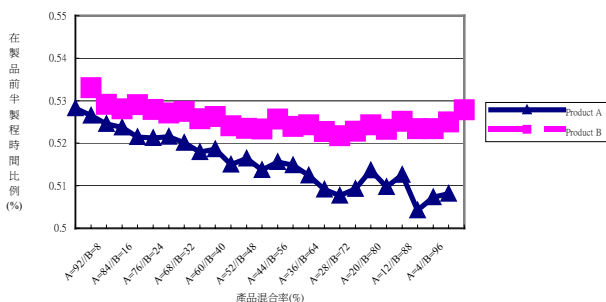


圖 11 獲利強度為 1:4 下不同產品混合比例下 DTC 平均前半製程時間比例

從模擬實驗的結果可以發現，DTC 系統能夠依照產品的不同，調整系統資源的使用和分配，使得高獲利強度的產品反應時間縮短，所以 DTC 系統可以令較大商機的新產品或高獲利的產品，較 MCR 和 MBS 系統更早產出，對更新迅速的半導體產業來說，搶先商機便是獲利的來源。此外，同樣數量的在製品，但是囤積在系統內的系統資源較低，所以因為良率所損失的產能和產品也就較少，成本降低、獲利自然提昇。

4. 結論和未來研究方向

本研究提出的 DTC 派工法則，藉著限制理論提出的系統瓶頸觀點，提出了系統資源消耗量計算法、晶圓在製品的成本估計法、晶圓在製品現階段價值估計法以及晶圓在製品獲利強度估計的方法。並提出了 DTC 派工法則的優先權判準，使不同獲利強度的產品，經由不同獲利強度的給定，得以控制其加工週期等的表現。從實驗中也可以發現，產品獲利強度的給定，對系統的表現影響甚大。以半導體產業來說，此等觀念的應用將可適當決定系統資源對不同產品的使用分配。

本研究以 MCR、MBS 法則為對照組，進行 DTC 法則在加工週期、囤積成本、系統資源消耗上的研究，並藉著模擬實驗結果建構產品混合比率、獲利強度的加工週期模型、囤積成本模型和系統資源消耗模型。DTC 法則在以上的績效表現均較 MCR、MBS 法則為佳，充分顯示以 DTC 法則和限制理論進行的生產控制，可以提供較佳的獲利表現。

目前派工系統的範圍侷限在生產系統之內，事實上外部的限制也是必須要加以考量的，例如上游供應商的送貨時機、下游客戶的訂單需求，都有可能成為系統的限制。延伸 DTC 至供應鏈的管理和控制，並利用整體獲利最大化的觀點，作為行銷、生產、採購等決策的依據，應是未來可行的研究方向。

參考文獻

- [1] Eliyahu M. Goldratt, *The Goal*, New York: North River Press, 1984.
- [2] Michel Baudin, *Manufacturing Systems Analysis with Application to Production Scheduling*, Prentice Hall Inc., 1990.
- [3] J. G. Dai, D. H. Yeh and C. Zhou, "The QNET method for re-entrant queuing networks with priority disciplines," *Operations Research*, Vol. 45, 1997, pp. 610-623.

- [4] C. R. Glassey and M. G. C. Resende, "Closed-loop job release control for VLSI circuit manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 1, No. 1, February, 1988, pp. 36–46.
- [5] Neal G. Pierce, "Value-Based dispatching for semiconductor wafer fabrication — VBD," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, 2000.
- [6] C. R. Glassey and W. W. Weng, "Dynamic batching heuristic for simultaneous processing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, May, 1991, pp. 77–82.
- [7] G. R. Bitran and D. Tirupati, "Approximation for product departures from a single-server station with batch processing in multi-product queues," *Mgmt. Sci.*, Vol. 35, 1989, pp. 851–878.
- [8] Debra J. Hoiomt and Peter B. Luh, "Scheduling a batch processing facility," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, May, 1992.
- [9] R. Uzsoy, C. Y. Lee and L. A. Martin-Vega, "A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry, part I: system characteristics, performances evaluation and production planning," *IIE Transactions*, Vol. 24, No. 4, 1992, pp. 47–58.
- [10] J. W. Fowler, G. L. Hogg and D. T. Phillips, "Control of multi-product bulk service diffusion/oxidation process," *IIE Transaction*, Vol. 24, No. 4, 1992, pp. 84–96.
- [11] W. W. Weng and R. C. Leachman, "An improved methodology for real-time production decisions at batch-process workstation," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacture*, Vol. 6, No. 3, 1993, pp. 219–225.
- [12] J. K. Robinson, J. W. Fowler and J. F. Bard, "The use of upstream and downstream information in scheduling semiconductor batch operation," *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 8, 1995, pp. 1849–1869.
- [13] D. J. Van Der Zee, A. Van Harten and P. C. Schuur, "Dynamic job assignment heuristic for multi-server batch operations — a cost based approach," *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 11, 1997, pp. 3063–3093.
- [14] Alexander K. Schömig and Matthias Kahnt, "Performance modelling of pull manufacturing systems with batch servers," *Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA. INRIA/IEEE Symposium*, Vol. 3, 1995, pp. 175–183.
- [15] Jr. J. H. Blackstone, "Theory of constraints — a status report," *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 6, 2001, pp. 1053–1080.
- [16] A Lockamy III and M. S Spencer, "Performance measurement in a theory of constraints environment," *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 8, 1998, pp. 2045–2060.
- [17] L. D. Fredendall and B. R. Lea, "Improving the product mix heuristic in the theory of constraints," *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 6, 1997, pp. 1535–1544.
- [18] Ronald J. Lewis, *Activity-Based Models for Cost Management Systems*, Westport, Conn.: Quorum Books, ISBN:0899309658, 1995.
- [19] R Kee and C. Schmidt, "A comparative analysis of utilizing activity-based costing and the theory of constraints for making product-mix decisions," *International Journal of Production Economics*, 63, 2000, pp. 1–17.
- [20] A. Gunasekaran and M Sarhadi, "Implementation of activity-based costing in manufacturing," *International Journal of Production Economics*, 1998, pp. 56–57, 231–242.
- [21] Arnick N. A. M. Boons, "Product costing for complex manufacturing systems," *International Journal of Production Economics*, 55, 1998, pp. 241–255.

附 件

附表 1 機台資料表 (MTBF 以及 MTTR 分別代表平均當機時間和平均修復時間)

機台編號	機台種類	機台數量	最大容量 (lot)	MTBF (hrs)	MTTR (mins)	設定時間 (mins)
1	ALLOY	3	6	4	24	
2	BK_PO	1	1			
3	BPSG	2	1			
4	CAP_OX	1	1			
5	DRY_MET	3	1			
6	DRY_OX	2	1			
7	DRY_PA	2	1			
8	DRY_PO	3	1			
9	DRY_SI	1	1			
10	DRY_SN	2	1	0.8	8	
11	DRY_SW	1	1			
12	FLOW	2	6	4	24	
13	GATE_OX	1	1			
14	GRIND	1	1			
15	HP_4062U	1	1			
16	IMD	2	1	2		30
17	IMP_HI	1	1	2		30
18	IMP_MED	1	1			
19	INTER_OX	1	1			
20	MARKED	1	6	4	24	
21	NITRIDE	1	1			
22	OX_FLD	3	6	4	24	
23	OX_GATE	3	6	4	24	
24	OX_SD	4	6	4	24	
25	OX_STRT	15	6	4	24	
26	PESN	2	1	0.75		
27	PHOTO	9	1	0.75	5.5	
28	POCL	3	6	4	24	
29	POLY	3	6	4	24	
30	QA_SCOPE	1	1			
31	SD_OX	1	1			
32	SCUBBER	2	6	4	24	
33	SOG	1	1			
34	SPUTTER	8	1			
35	TEOS	3	6	4	24	
36	UV_ERASE	1	1			
37	WCVD	1	1			
38	WELL_DRV	3	6	4	24	
39	WET_SN	1	1			

附表 2 產品製程資料表

工序	機台編號	加工時間	可再加工	工序	機種編號	加工時間	可再加工
1	32	2:52:08.4000	0	33	24	45:16.0000	0
2	25	7:07:12.0000	0	34	27	48:02.4000	1
3	21	47:21.0000	0	35	17	45:16.2000	0
4	27	48:02.4000	1	36	27	48:02.4000	1
5	10	57:43.2000	0	37	17	45:16.2000	0
6	18	15:54.0000	0	38	3	2:37:15.0000	0
7	22	4:16:42.0000	0	39	12	4:16:42.0000	0
8	39	34:33.6000	0	40	27	1:00:28.8000	1
9	18	15:54.0000	0	41	6	1:26:24.0000	0
10	38	4:16:42.0000	0	42	12	47:21.0000	0
11	25	7:07:12.0000	0	43	34	5:45:36.0000	0
12	21	47:21.0000	0	44	27	49:46.2000	1
13	27	1:00:28.8000	1	45	5	2:09:57.0000	0
14	10	57:43.2000	0	46	16	1:10:30.0000	0
15	27	48:02.4000	1	47	33	1:02:12.6000	0
16	18	15:54.0000	0	48	16	1:10:30.0000	0
17	8	1:44:43.2000	0	49	27	1:00:28.2000	1
18	39	34:33.6000	0	50	6	1:26:24.0000	0
19	25	7:07:12.0000	0	51	34	5:45:36.0000	0
20	27	48:02.4000	1	52	27	48:02.4000	1
21	18	15:54.0000	0	53	5	2:24:07.2000	0
22	23	4:16:42.0000	0	54	26	1:10:30.0000	0
23	29	4:16:42.0000	0	55	26	1:09:48.6000	0
24	2	1:06:00.6000	0	56	27	48:02.4000	1
25	28	4:16:42.0000	0	57	7	2:01:18.6000	0
26	27	1:00:28.8000	1	58	1	4:16:42.0000	0
27	8	1:44:43.0000	0	59	15	1:16:43.2000	0
28	24	4:16:42.0000	0	60	14	56:40.8000	0
29	27	48:24.0000	1	61	30	1:26:24.0000	0
30	18	15:54.0000	0				
31	35	4:16:42.0000	0				
32	11	1:09:07.2000	0				



缺照片請補
充

謝淑華 (Suhua Hsieh) 國立台灣大學機械工程學系教授，生於民國 44 年，民國 74 年獲得美國 Wisconsin-Madison 大學機械博士。專長於自動化與生產系統規劃、實驗設計等。



缺照片請補
充

侯凱中 (Kai-Chung Hou) 民國 63 年生，民國 90 年獲得台大機械研究所碩士，目前就職於明碁電通股份有限公司。

收稿日期 92 年 2 月 15 日、修訂日期 92 年 2 月 25 日、接受日期 92 年 3 月 2 日
Manuscript received February 15, 2003, revised February 25, 2003, accepted March 2, 2003