

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

虛擬之自化半導體廠—子計劃三—供晶元交期預測之虛擬半導體廠排程及派班(2/3)

計畫編號：NSC 89-2218-E-002-007

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主持人：傅立成教授 E-mail: lichen@ccms.ntu.edu.tw

執行單位：台灣大學資訊工程學系暨研究所

一、中文摘要

本子計劃階段的目標在於：第一、變動不確定狀態下的交期預測的理論開發及所謂的排隊-斐氏網路模型的建造和分析工具的探討。第二、排程及派班的理論開發。以第一個目標而言，在此我們提出一個可以在變動環境下針對每個晶圓單元的交期預測引擎，並可以同時選擇出較佳的排序排程。而在第二個目標上，我們在所謂的排隊-斐氏網路模型上，結合了以基因為基礎的排程派班理論。

二、緣由與目的

半導體廠是一個複雜的製造系統，同時處理的晶元製程種類繁多，而每一製程均要經過數百道製程步驟才能完成。面對如此複雜的生產流程，若想要得到一較佳生產管理方法，相當的困難。又加上半導體廠內的不確定因素，像是機台故障之類的因素，使排程工作變成相當複雜，也使廠商難以提供客戶精確的交期預測。廠商本身也難以根據現有資源的利用情形來評估可能訂單的執行及交貨情形。

「虛擬之半導體廠」可將晶元的生產虛擬建構於電腦中，本計畫利用電腦大量且快速的計算能力和精確的計算結果，

開發一交期預測引擎，在客戶下單時或廠商進行實際生產之前，可預先協助廠商本身作出最有效之決策並且可以配合在排隊-斐氏網路模型上，利用電腦做基因演算法的排程方法搜尋，以提供廠商較佳的排程法則；對於客戶來說，也可以明瞭自己所下的訂單何時可以完成。

三、研究方法

交期預測引擎的理論開發中，在變動不確定狀態下的交期預測方法的研究中，我們焦點放在求出每個晶圓單元(Lot)在每個時間上的交期預測並且決定出所謂的排序排程(Permutation Schedule)。在其中對每一個晶圓處理步驟我們安排工作(job)到機台上執行，我們的目標在於使每晶圓單元的完工時間的總和為最小並且能符合先前所承諾某些晶圓單元的完工時間。在這前提下我們使用我們前一年所開發的一般化不確定斐式網路模型為基礎內嵌入所謂的馬可夫鍊(Markov Chain)和分支-約束(Branch-and-Bound) 排序排程演算法。分支-約束排序排程演算法可以動態的對一每機台或機台群組搜尋一個較合適的排程派班法則。穩定狀態下的交期預測問題可以看成在某段有效範圍時間內 \tilde{T} ，

\tilde{T} 可能界於時間點 τ_s 以後或時間點 τ_s 以

後，對晶圓單元 i^c 對應到一個交期限制 ψ_{i^c} 。假如晶圓單元 i^c 在時間點 τ_k 進入 g_{L_c} 節點，也就是說它剛進入到工廠裡面或者晶圓單元 i^c 在時間點 τ_s 進入 g_{L_c} 節點。我們的目標就是要預測晶圓單元 i^c 離開最後一個節點 g_{L_c} 節點的時間的期望值

$E[D_{i^c}, g_{L_c}]$ 並且以剛剛我們所觀察到的系統可看成一連串的樣本路線(sample path) $S_1, e_1, \tau_1, \Phi_1, S_2, e_2, \tau_2, \Phi_2, \dots, S_n, e_n, \tau_n, \Phi_n, \dots$ 因此我們定義了 Φ_{τ_n} 代表在樣本時間點 τ_n 上所採取的動態排程中所謂的最小交期變動的處罰(minimum penalty of due-date variation)在某段有效範圍時間內 \tilde{T} 利用線性規劃的方法在先前所承諾的交期變動範圍 $E[D_{i^c}, g_{L_c}] - \psi_{i^c}$

變動不確定狀態下和穩定狀態下的交期預測方法需要進一步的實驗和模擬來加以修正和驗證。這也就是我們下個年度的目標之一。最後的年度的目標除了理論和證明外。我們將實作並運用資料庫做線上(on-line)交期預測。

在本計畫的研究中，我們所應用到的queueing機台模型可以分為兩大類。對於一般的機台種類，我們應用M/M/c/Priority queue、M/G/c/Priority queue以及G/G/c/Priority queue三種queueing機台模型；至於批貨處理機台，我們則利用M/M^[K]/c/FCFS queue和G/G^[K]/c/FCFS queue兩種queueing模型。根據一些先前的研究，我們可以採用其中提出的一些對於queueing模型的效

能分析方法(或數學公式)。在這裡必須要聲明的一點是，對於本研究中Queueing的使用，我們並不打算針對任何特定的queue研究或推導出新的解法或不同的近似值。因此，對於Queueing的使用，我們傾向於將它當成是一種工具。

在本計畫的研究中，我們讓我們的Queueing Petri Net (Q-PN) 計算模型可以支援所提出的搜尋演算法；換句話說，就是在我們的Q-PN模型上，排程法的搜尋可以同時沿著生產資源以及時間區段兩個方向作改變。在這裡，我們提出一種新的方法用來表示晶圓廠中的生產製造排程問題。如同前面曾經提過的，這種方法是用來配合建構在Q-PN模型的之上的GA搜尋法共同作用，以產生出一套排程搜尋器。

四、結論與成果

研究理論報告可以分成以下二大部份：

(一) 交期預測引擎的理論開發

我們在交期預測引擎的理論中研究出兩個不同的方法，一個適用於變動不確定狀態下的交期預測，另一個適用於穩定狀態下的交期預測。

在變動不確定狀態下的交期預測方法的研究中，我們焦點放在求出每個晶圓單元(Lot)在每個時間上的交期預測並且決定出所謂的排序排程(Permutation Schedule)。在其中對每一個晶圓處理步驟我們安排工作(job)到機台上執行，我們的目標在於使每晶圓單元的完工時間的總和為最小並且能符合先前所承諾某些晶圓單元的完工時間。在這前提下我們使用我們

前一年所開發的一般化不確定斐式網路模型為基礎內嵌入所謂的馬可夫鍊(Markov Chain)和分支-約束(Branch-and-Bound)排序排程演算法。分支-約束排序排程演算法可以動態的對一每機台或機台群組搜尋一個較合適的排程派班法則。

交期預測問題描述

假設我們一開始給定 n 種不同的晶圓單元，對晶圓單元種類 i 而言我們假設它有 S_i 個晶圓處理步驟(wafer processing step)，每個晶圓處理步驟分屬於某一類晶圓處理(wafer processing operation)。每個晶圓處理都會在具有處理該類晶圓處理工作能力的機台上執行。我們假定工作 J_{ik} 為晶圓單元種類 i 中第 k 個進入晶圓工廠。我們也假設工作 J_{ik} 的第 l 個晶圓處理步驟的晶圓處理 $op(l)$ 在機台 m 處理需要的處理的時間率(wafer processing rate) 為 $u_{op(l),m}(J_{ik})$ 。假設處理的時間率的標準差(standard deviation)相當的小。除此之外，我們假設對晶圓單元種類 i 而言其到達晶圓工廠的時間間隔率(mean arrival rate)為 λ_i 。 $F^l(J_{ik})$ 為工作 J_{ik} 完成第 l 個晶圓處理步驟的時間。 K_i 為所有顧客下單晶圓單元種類 i 的總數。那麼總完成時間(sum finishing time) f 被定義為所有工作 J_{ik} 完成最後晶圓處理步驟的時間：

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} F^{S_i}(J_{ik})$$

並且交期預測問題(delivery prediction problem, DPP)被定義成在任何時刻都可以決定每個進入工廠的晶圓單元的完成時間 $F^{S_i}(J_{ik})$ 並且決定出每個機台工作的處理

順序，使得總完成時間 f 為最小並且可以符合先前所承諾的交期，即先前所承諾某些工作 J_{ik} 的完成時間 $F^{S_i}(J_{ik})$ 不會被改變。

狀態機率 $\pi_m^l(J_{ik})$ 可以被規劃成馬可夫鍊(Markov Chain)的模型。現在我們假設對晶圓單元種類 i 已經有 r 個晶圓單元工作 $J_{i1} \cdots J_{ir}$ 被釋入到工廠中，那麼下一個要進入工廠的晶圓單元種類 i 為 J_{ir+1} 。那麼我們假設狀態機率 $\pi_0^l(J_{ik})$ 為晶圓單元工作 J_{ik} 在第 l 個進入過程(arrival satge)。這意味著晶圓單元工作 J_{ik} 將在晶圓單元工作 $J_{ir+1}, J_{ir+2}, \dots, J_{ik-1}$ 之後到達。並且 $l = k - r$ 。另一方面，機率 $p_{s,t}^l(J_{ik})$ 為晶圓單元工作 J_{ik} 完成在機台 s 第 l 晶圓處理步驟後從機台 s 路由到機台 t 準備下一個晶圓處理步驟的機率。平均反應時間率 $U_{op(l),s}(J_{ik})$ 為晶圓單元工作 J_{ik} 完成在機台 s 第 l 晶圓處理步驟的反應時間率。反應時間包括了實際機台的處理時間再加上等待在機台中的時間。現在假如在工廠中我們有 M 個機台，那麼狀態機率 $\pi_m^l(J_{ik})$ 的總和將為 1。

$$\sum_{m=0}^M \sum_{l=-(k-r-1)}^{S_i} \pi_m^l(J_{ik}) = 1$$

馬可夫鍊的模型中，因為狀態機率 $\pi_0^l(J_{ik})$ 沒辦法從其它的狀態機率到達，所以晶圓單元工作 J_{ik} 的馬可夫鍊並不是可縮減形(irreducible)。因此，穩定狀態的分析可能不存在，而不確定狀態的分

析會比較有意義。所以我們將專注在解決馬可夫鍊的模型中狀態機率 $\pi_m^i(J_{ik})$ 。由於在這馬可夫鍊的模型中有著有特別且固定樣式，因此，我們有可能得到封閉的不確定狀態(closed-form transient solution) 機率值。

在我們計算並得到了狀態機率的值 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 後，我可以求出期望的完成時間 (expected finishing time) $F^{S_i}(J_{ik})(t)$ 。但是這還是不夠的，這畢竟是期望的完成時間。因為，我們知道狀態機率的值 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 是時間的函數，它會時間而改變的。接著，在考慮交期時我們不得不考慮當時所用的排程。為了求出期望的完成時間 (expected finishing time) $F^{S_i}(J_{ik})(t)$ ，我們要進一步利用 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 的資訊來做我們排程時的輔助。因為 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 的資訊透露出我們在針對每機台做排序排程時到底排序的元素或成員有多那些。我們可以初估 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 的資訊透露出我們在針對每機台做排序排程時到底排序的元素或成員有多那些。即有那些晶圓會出現在機台上，和即有那些晶圓會何時出現在機台上。在我們初步的構想是取區線的交點也就是把交點當做分隔點。也就是我們把連續的 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 的曲線轉換成離散的方式承現。離散的狀態機率的值 $\pi_s^i(J_{ik})(t)$ 被量化(quantized)成為 0/1 數位的方式。

(二)排程及派班的理論開發

在晶圓製造中，最常被用到的派單控制法則應該是 uniform rule 配合開放式循環策略(open loop strategy);換句話說，將晶圓依照固定且相等於晶圓產出率的速率派入廠中，而不考慮目前的廠內存貨量及機台狀態。但是，一般來說，晶圓製造廠中的生產環境通常太過於複雜以致於無法訂出一個「最好的」派單法則。因此，在本計畫的研究中，我們選定了幾項法則作為變數，並且利用基因演算法 (GA) 依據當時廠中的狀況，找出相對上較好的派單控制。UNIF, POISS, CONWIP, WR 和 SA 是我們所選出列入排程器考量的候選者。

晶圓製造系統模型

在本研究計畫中，我們利用自行提出來的一種叫做 Queueing - Petri Net (Q-PN) 的工具，來對整個晶圓製造系統包括沈積 (deposition)、微影 (photolithography)、蝕刻 (etching) 和離子植入 (diffusion) 等區域作模型。在以下的數節，我們將敘述在我們的 Q-PN 模型中所用到的各模組，包含製造流程模組 (Routing Module)，製程能力模組 (Capability Module)，以及機台模組 (Equipment Module)。

晶圓製造中的效能分析

我們可以將排程方法的研究再細分為兩個子問題。第一個問題是，在我們的研究當中，用什麼樣的搜尋方法去最佳化我們的排程結果？另一個問題是，對於我們所選出的每一組排程方法，我們要如何評

估它們的效能好壞？對於第一個問題，就像我們先前曾經提過的，我們所應用的最佳化搜尋方法是基因演算法 (Genetic Algorithm, GA)。至於第二個問題，在本計劃的研究中，我們採用根據我們的 Q-PN 系統模型所導出的數學分析。應用基因演算法的晶圓製造排程

生產排程總結

我們在這裡為我們研究的晶圓製造排程做個總結。在本計畫的研究中，我們利用 Queueing-Petri Net 為工具建構了晶圓製造廠的生產模型，並在其上應用基因演算法配合 Queueing Theory 的數學分析來完成最佳排程的搜尋。由於染色體所代表的其實是一連串排程法則的集合，可以說是一套排程策略，因此，我們需要建構一個排程產生器依據所選定的染色體，來產生一套生產排程。如此一來，我們便可以經由 Q-PN 模型的運作，計算我們排程的效能。由於經由 Q-PN 模型的模擬，我們可以追蹤記錄所有可能的系統運作，換句話說，我們可以將不同排程策略經由 gene place 的對應，產生出所有的系統生產流程；因此，我們便可以經由這樣而建構出我們的排程產生器。