

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 快速熱程序設備之系統整合(II)

### System Integration of Rapid Thermal Processors (II)

計畫編號：NSC 87-2218-E-009-002

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：胡竹生教授 國立交通大學電機與控制工程系

#### 一、中文摘要

本報告針對半導體製程之快速熱程序設備，進行系統整合之研究。延續前一年之研究成果，首先精進已建立之泛用型即時模擬器，以作為硬體迴路模擬器的核心部分。藉由一個計算晶圓溫度場分佈的即時動態模擬器架構，建立快速原型化之發展平台。第二部分則針對控制系統整合，發展離散事件系統(DES)之監督器與控制器的合成方法，以協調所有的子系統。本研究在泛用型雙層式控制架構下，提出一模型精鍊方法作為系統規格詮釋方式以降低問題的複雜度，相對於建立規格語言之自動機模式，合格語言是由不合格狀態和事件來定義。此法對DES控制問題提供一更直接的觀點，且更適合於實際應用。更且，基於此可說明，藉由不合格狀態的觀念使得最大可控子語言有更簡單的形式；並提出一有效率且系統化之狀態本位的監督器合成步驟。

關鍵詞：半導體製程設備、快速熱程序、系統整合、離散事件系統、電腦控制

#### Abstract

This report describes the work on system integration for rapid thermal processors in semiconductor manufacturing. To continue the studied results in the last year, a general real-time simulator of rapid thermal process, as the kernel of a hardware-in-the-loop simulator, is enhanced. A rapid prototyping platform is established by the structure of a real-time dynamic

simulator, calculating the distribution of temperature field of rapid thermal processing (RTP). The second part of this work is to study the synthesis method for the supervisor and controller of discrete event system (DES), coordinating the subsystems on the integration of control system. Based on the general-purpose two-tiered control structure, a model-refining method is proposed to alleviate the complexity regarding specification interpretation of DES control problems. The legal constraint language is defined in terms of illegal states and events in contrast with constructing the automaton of the specification language. This method provides a more intuitive view of the DES control problem and is suitable for practical implementation. Further, under this framework, it is shown that the supremal controllable sub-language can take a simpler form by the concept of illegal state set. A state-based supervisor synthesis procedure is presented to synthesize efficiently and systematically.

**Keywords** : Semiconductor manufacturing equipment, rapid thermal processing, system integration, discrete event systems, computer control

#### 二、計劃緣由與目的

半導體製程設備居半導體工業之上游，擔任技術提供與應用支援的角色。綜觀半導體之製程，包含數百道製作程序，其涵蓋之技術領域相當廣泛。其中快速熱程序(rapid thermal processing, RTP)之相關設備，近年來在大面積、高密度及單晶圓

處理(single-wafer processing)的趨勢下日形重要。這一趨勢的形成主要是因應彈性生產的需求而來。除此之外，多項 IC 製程如生長非常薄的氧化絕緣層或形成淺接合點(shallow junction)等，需要在低熱預算(thermal budget)的機台內方能完成，傳統之高溫爐(furnace)由於熱質量大(thermal mass)，已不適合使用。因此近年來 RTP 之核心技術被大量應用在快速氧化(RTO)，快速退火(RTA)或快速熱化學氣相沉積(RTCVD)等製程上。

本計劃為一整合型計劃的第三個子計劃，預計以三年的時間執行下列工作：(1) 設計及製作快速熱程序設備之 hardware-in-the-loop 模擬器；(2) 整合、設計及製作應用其它子計劃發展之技術時所需界面；(3) 針對生產環境設計並撰寫一開放結構之控制軟體，並具有研發擴充的能力；(4) 整合 RTP 原型機台(prototype)。而本論文則為第二年之執行成果。

### 三、結果與討論

#### 快速熱程序之即時模擬器

根據前年度之研究成果，整個 RTP 模擬架構(圖 1)可分為三大部份：系統動態模擬、週邊控制電腦與中央控制電腦(運作方式可參考前年度報告)。本年度針對系統動態模擬中之熱源模擬、晶圓溫度場模擬、爐腔特性模擬與感測器模擬各項精進其軟體模擬技術。

系統即時動態模擬和硬體迴路的功能更是本計畫的重點。本年度在一般個人電腦系統上建立晶圓溫度動態的即時模擬器，並詳細考慮各種爐腔情形，少作假設，使得模擬器得以應用至各系統。

對於 RTP 的非線性三維熱傳動態求解，考量精密度與計算時間之取捨，以物件導向之概念建立數值運算模組。其中熱輻射動態採用蒙地卡羅模擬法[6]求取晶圓吸收的總熱輻射通量。而在熱對流與熱傳導之有限差分方程式求解上精進不同矩陣結構下的計算效能。

#### 改良式 DES 規格詮釋方式

複雜系統的控制問題，除了系統元件的動態控制外，整個系統的離散事件控制亦是很重要的一部份。離散事件控制器的目的，就是藉由動態的禁制或觸發部分系統事件，來修正開迴路系統行為，使得受控後系統的行為(閉迴路系統行為)符合使用者的需求。以半導體製程設備為例，在未受控的情形下，可能發生使用者同時開啟氣體閥與機台門的情形而造成有毒氣體外洩，離散事件控制器的目的之一就是要避免這種動作發生的可能性，也就是說其必須符合適當的規格。

在此之前，所有相關論文[1~5][7~9]，對於系統規格描述皆採用正規語言(formal language)或自動機(automata)模型，其優點是規格可以彈性組合，但是每增加一個規格就增加一個對應語言模型，規格一多就造成所謂的狀態空間爆炸(state-space explosion)的現象；再者，此語言模型一般並不容易獲得。因此本報告提出一個改良式規格詮釋方式，參考[3]所提方式進行改良，若系統規格有"公平使用(fair usage)"需求如"先來先用(FCFS)"或"後來先用(LCFS)"時，則首先須針對原 DES 模型進行精鍊，再依據規格需求對精鍊模型中不合格狀態與事件禁制之，可在很自然方式下詮釋系統規格；以下舉一簡單例子(採用自[2~4])說明其運作原理。考慮一系統有一資源(source)和兩使用者，使用者 DES 模型如圖 2，其各有三狀態(意義如圖示)和三事件(依序表對資源之需求，使用和釋放)；而開迴路整合(shuffle product)系統如圖 3 所示。系統必須滿足兩項限制規格，即禁止同時使用資源(互斥原則)和先來先用(公平使用原則)。首先精鍊系統模型如圖 4，再依規格對精鍊模型禁制不合格狀態與事件，直覺而簡單的獲得結果如圖 5，也就是滿足規格的監督器模型(有必要時可參考[7]方式進行模型簡化)。

本報告提出一通用且簡單而直覺之改良式 DES 規格詮釋方法，除了適合 RTP 使用外，更可廣泛應用於目前可見的 DES 之規格詮釋。其中針對"公平使用"需求可重複精鍊模型，增加用來記憶事件次序的狀

態遠比[2][3]方式為少，反之對其他種類的規格，系統內的狀態和事件則只會減少，因此空間爆炸問題相對減輕許多。

#### 改良式監督器合成與控制器設計方法

有了合格語言後，接下來便是設法尋找其最大可控子語言和合成監督器。植基於前述之改良式規格詮釋方法，我們可獲得一形式更簡單的最大可控子語言；和一有效率且系統化之狀態本位的監督器合成步驟。借由一不合格狀態集合之定義可使原”語言本位”式的監督器合成變成”狀態本位”式，詳細內容請參考附件(投稿中)。

就實用性而言，S. Balemi, et al. [1] 提出之通用雙層式控制架構(見圖 6)較為可行。其可適用於自動控制系統中之兩種操作模式：「自動模式」與「手動模式」。在自動模式中，控制器主動的決定命令事件為何，不需操作員下達命令；手動模式則可以在機器發生問題或測試時由操作員進行手動的問題排除與處理。本架構控制系統分為二層，即被動禁制事件的「監督器」(Supervisor)與主動產生事件的「控制器」(Controller)，關於兩者之特性，運作原理和合成步驟請參考前年度報告和[1][4][8][9]。

基於上述之方法，本研究實際撰寫一監督器合成與控制器設計之互動式軟體。針對半導體機台 RTP 之運作方式和實際模擬結果，請參考前年報告。

#### 四、計畫成果自評

項目	完成情況
與原計畫相符程度	100%
達成預期目標	80%
研究成果學術價值	提供相關理論修正
研究成果應用價值	很有實用性
學術期刊發表合適否	投稿中
申請專利合適否	目前尚不適合
主要發現 或 其他價值	1. RTP 即時模擬器 2. 改良式 DES 規格詮釋方式 3. 改良式 DES 監督器合成與控制器設計方法 4. 適合類似系統使用

#### 五、參考文獻

- [1] S. Balemi, et al., "Supervisory control of a rapid thermal multiprocessor," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.38, no.7, pp.1040-1059, Jul. 1993.
- [2] Y. Du and S. H. Wang, "Translation of output constraint into event constraint in the control of discrete event systems," in *Proc. 27th IEEE Conf. Decision and Control* (Austin, TX), pp.1119-1124 Dec. 1988.
- [3] F. Lin, A. F. Vaz, and W. M. Wonham, "Supervisory specification and synthesis for discrete event systems," *Int. J. Control*, 48(1), pp.321-332, Jan., 1988.
- [4] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete-event processes," *SIAM J. Contr. and Optimization*, vol.25, no.1, pp.206-230, Jan. 1987.
- [5] P. J. Ramadge, and W. M. Wonham, "Modular feedback logic for discrete event systems," *SIAM J. Contr. and Optimization*, 25(5), pp.1202-1218, May, 1987
- [6] R. Seigel, J.R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer," Hemisphere Publishing Corp.
- [7] A. F. Vaz, and W. M. Wonham, "On Supervisor reduction in discrete event systems," *Int. J. Control*, vol. 44, no. 2, pp.475-491, 1986.
- [8] W. M. Wonham, and P. J. Ramadge, "Modular supervisor control of discrete event systems," *Math. Contr., Signals, and Syst.*, vol.1, no.1, pp.13-30, Jan. 1988
- [9] W. M. Wonham and P. J. Ramadge, "On the supremal controllable sublanguage of a given language," *SIAM J. Contr. and Optimization*, vol.25, no.3, pp.637-659, May. 1987.

#### 六、圖表

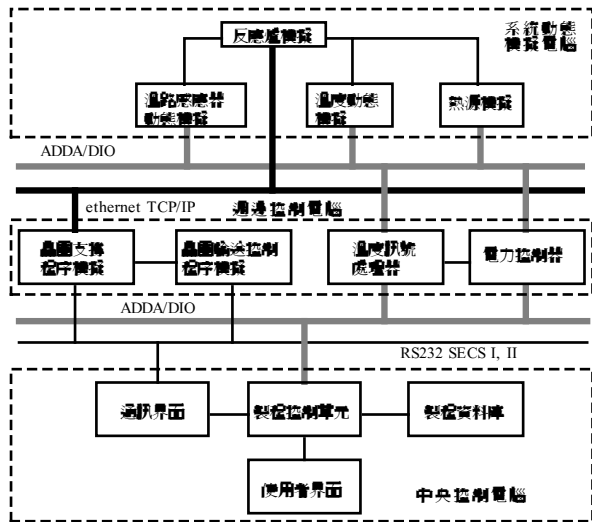


圖 1 RTP 模擬系統之整體架構

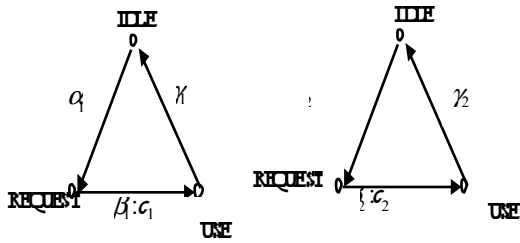


圖 2 兩使用者 DES 模型

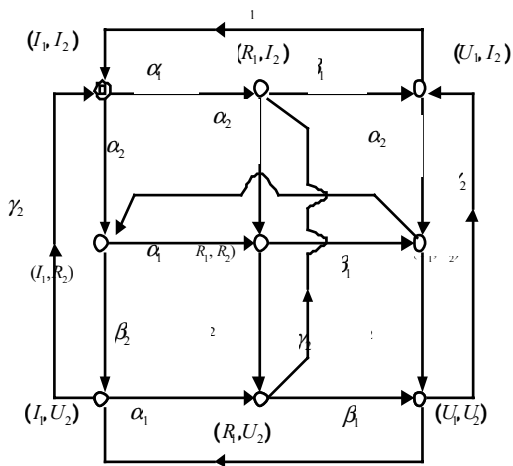


圖 3 兩 DES 模型之 shuffle 系統

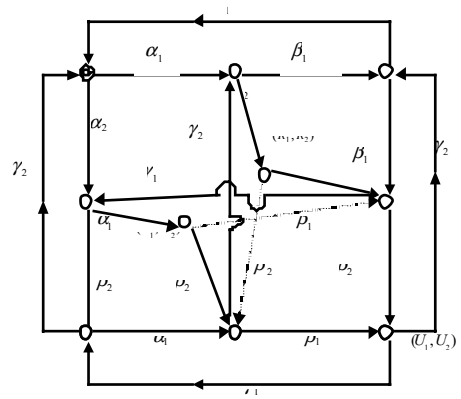


圖 4 分裂狀態( $R_1, R_2$ )後之系統精鍊模型

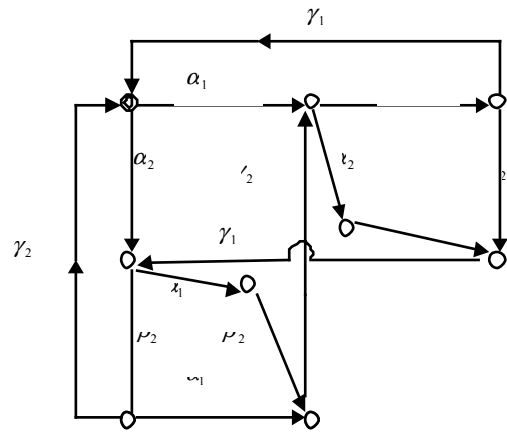


圖 5 滿足 FCFS 和互斥兩規格之監控器

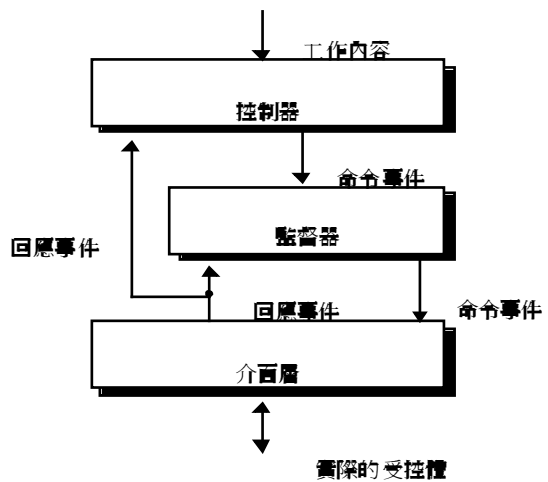


圖 6 雙層式 DES 系統控制架構