

快速熱程序設備動態模式建立參數判別及溫度控制(III)  
Thermal Process Modeling Parameter Identification and Temperature Control  
in Rapid Thermal Processing Equipments

計畫編號：NSC-88-2218-E009-005

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

計畫主持人：林清安 交通大學電機與控制工程系教授

共同主持人：胡竹生 交通大學電機與控制工程系教授

一、中文摘要(關鍵詞：快速熱程序設備、溫度量測、溫度控制)

本研究之主題包括溫度量測點的最佳設計、熱程序動態模式的建立及溫度控制系統設計方法的建立等。這是一個三年計畫的第三年研究，第一年的研究已提出一種配置燈組幾何參數的方法，並搭配開路控制系統來達到快速熱程序中晶圓溫度均勻準確的要求。第二年的研究提出多變數比例積分(PI)控制器的設計以及量測點的最佳設計，模擬結果顯示所提之設計方法具有可行性。第三年的研究重點是實際建造一個的 RTP 系統原型，以實驗來驗證前兩年研究所提出的方法與結果。

英文摘要(Keyword：rapid thermal processing(RTP) equipment, temperature measurement, temperature control)

Topics of this research include: optimal sensor configuration design, thermal process modeling, temperature control system design methods for rapid thermal processing systems. In the first year of the research, we have studied heat source design and related temperature control using a simplified dynamic model with some preliminary results. In the second year we propose an MIMO PI controller design method and a method to determine optimal sensors measurement locations. Simulation results show the feasibility of the proposed methods. In the third year a prototype system is constructed based on the results of the previous years; experiments conducted on this prototype will be used to verify the methods proposed and the

results obtained in the previous two years.

二、計畫緣由與目的

本計畫的整體目標是為 RTP 製程設備建立一個溫度控制的分析與設計方法。第一年的研究已經針對熱源設計進行探討，提出一個以四個環狀燈組為熱源的架構。我們以熱動態方程式為基礎，從溫度均勻的需求討論熱幅射量分布的充分與必要條件。並以這個充分與必要條件為基礎，推導出一個設計燈組幾何參數的方法。之後再以最小平方方法的開路控制來對設計加以驗證。這個結果經整理後已發表於 IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing (Feb. 1998)[1]。

第二年研究與第一年不同的是將重點擺在溫度的閉迴路控制。我們以第一年研究所設計的四個燈組的 RTP 系統為基礎，在考慮熱對流的效果下，建立一個較接近實際應用的熱動態方程式。我們提出的控制系統架構包括兩個部分：(1)以最小平方開路控制器來大致達到所要的溫度，及(2)以四點溫度量測來提供溫度回授，配合比例積分(PI)控制器來減低因對流及其他不確定因素(如石英窗等)所造成的溫度誤差。主要的研究課題包括溫度量測的位置如何選擇及 PI 控制器的參數如何決定。

至於在這(第三)年的研究中，我們的工作重點主要在實際製作一個實驗用的 RTP 系統原型。由於之前研究對系統模型作了一些假設，這些因素在實際製作 RTP 系統時都必須加以考慮並作因應，有關控制器的實現問題、如何以燈泡製造出接近環狀燈組的加熱效果、以

## Project 1

及在實際組裝時做到燈座的冷卻等問題也都必須加以克服。

### 三、工作項目與方法

我們的研究已經發現溫度量測位置的選擇非常重要，位置選擇不好會使控制的問題變得相當困難；而好的選擇則幾乎只用 PI 控制器就可以保證很好的溫度均勻度。在感測器溫度與燈組數目相同的情況下，吾人已經證明晶圓溫度之穩態誤差將由溫度量測位置決定，而與控制器之增益矩陣無關。基於以上觀點，我們所建造的 RTP 系統採用了同樣數目(皆為 4)的感測器與燈組數目，其中量測點的配置方法係以開路控制下之穩態響應為基礎；至於增益矩陣的設計，則係配合模式簡化(Model Reduction)及線性二次穩壓(LQR)理論，藉由調整兩個權值參數以使所得到的控制器增益矩陣能夠獲得良好的動態溫度性能。吾人所提出的控制架構如圖一所示，其中控制信號  $u_0$  與  $u$  係分別由最小平方開路控制器與 PI 控制所提供， $y_d$  為吾人透過控制所希望達成的量測點溫度，而  $y$  則係溫度量測器所量得之四點溫度回授。此部分之研究成果已發表於 1999 自動控制研討會(Mar. 1999)[2]。

由於前兩年所獲得的研究成果顯示所設計的系統具有頗佳的性能(根據吾人的假設與所作的模擬，在昇溫至 1100°C 時最大溫度誤差(如圖二與表一所示)大約僅 0.578°C)，因此第三年研究乃根據第一、二年的研究成果建造一個 RTP 系統來作溫度控制的實驗。這是一個八吋晶圓的系統，反應腔具有四組環狀對稱的燈組。原始設計中的第一個碟型燈組目前是以 7 個緊密結合的燈泡來取代；第二、三個環狀燈組則是分別由 12 與 16 個環狀排列的燈泡來取代；此外在反應腔下層我們則安裝了 20 個燈泡作為第四個燈組。

為了強化反應腔的耐熱性以及獲得更高的熱效率，反應腔係以 316 不銹鋼錠加工製造，內壁並加以鍍鈦處理。在大鋼錠與大型鍍鈦機難尋以及考慮維修的方便性下，反應腔係

由上、中、下三層組合而成，上層為圓盤蓋狀，有 35 個孔可插入 35 個燈座組；中層為圓環狀，並未安裝燈座組；下層為圓筒底座，其周圍有 20 個孔可插入 20 個燈座組。其外觀尺寸分別為直徑 48cm, 高 4.5cm、直徑 48cm, 高 6.5cm、與直徑 50cm, 高 7cm。反應腔採用冷壁設計，在腔壁中藏有旋迴式冷卻管路，以水冷的方式散熱。腔壁內部的冷卻管路共有三條，主要是採用挖空再補皮的方式製作，分別負責三層反應腔的冷卻。我們的 RTP 系統共安裝了 55 個 1kW/120V 的 PHILIPS 燈泡，為避免燈泡腳之接點因高溫而融化，我們另外設計了內含冷卻管路的燈泡插座。這些燈泡插座的冷卻水管路都彼此分開，為了供應多達 55 條的冷卻水管路，我們另外製作一個擁有 55 個冷卻水供應口的中繼供水桶。

整個系統的控制架構如圖三所示，共包括爐腔(Chamber)與加熱燈管模組、變壓器(Transformer)模組、電壓控制模組(使用 AC Power Regulator)、資料擷取模組、控制訊號輸出模組、以及一台作為決策中心的個人電腦(PC)。圖中有四個 Transformer 和四個 AC Power Regulator，分別用來供應四個燈組所需的電源。由 PC 端經由 PLC-726 D/A 卡送出的四組 4-20mA 控制訊號將決定四個 AC Power Regulator 的輸出電壓(AC 0-100V)，以控制四個燈組群燈泡的亮度及晶圓的溫度。溫度感應器對晶圓溫度的量測值則透過 PCL-818HG 傳回 PC 做處理並決定控制訊號，藉以達到閉迴路控制晶圓溫度的目的。

由於整個 RTP 系統需要的功率多達數十 kW(視昇溫速率與最終溫度而定)，因此燈泡的電力來源係採用 AC 220V，再透過變壓器模組將其轉換成燈泡所使用的 110V。在安全考量下，由於所需能量很大，所以在採購變壓器時需格外注意其耐電流量。此外由於四組燈組所包括的燈泡個數並不相同，為了成本的考量，吾人分別針對四組燈組選用不同規格的變壓器與電壓控制模組(Regulator)。

在溫度量測上，雖然超音波感測[3,4]與晶圓擴大技術[5]是目前較新的研究方向，而業界

## Project 1

最常用光學高溫計(optical pyrometers)[6,7]，不過我們還是採用熱電耦(thermocouple)。而為了將溫度感測器所量測的類比資料輸入至控制模組(即 PC)中，我們選用 Adventech 的 PCL-818 資料擷取卡，來將類比訊號轉換成控制模組可接受的數位訊號。

控制訊號輸出模組係用來將控制模組的控制訊號輸出至電壓控制模組，為此我們選用 Adventech 的 PCL-726 卡。這是一個可提供 6 個類比輸出 channel 的 PC-BUS 卡，其輸出範圍可以設定為: 0 to 5V、0 to 10V、+/-5V、+/-10V 或 4 至 20mA 的電流輸出。我們的系統只用到 4 組輸出 channel，並將輸出範圍定為 4 至 20mA 的電流輸出。

## 四、結論與討論

運用前兩年研究所得到的溫度量測點配置方法與輸出回授 PI 控制器，我們實際建造了一個 RTP 系統的原型。在整個建造的過程中，除了讓我們對實際 RTP 製程系統的溫度動態增加了解外，也讓我們藉此建立了一套以 PC 為主的基本資料擷取與處理系統。對於 RTP 系統這類需要高功率的系統而言，如何在考量安全性之下供應所需之電力是整項工作執行中所遇到的主要困難。由於學校建築在供電系統的設計上有其先天限制，我們目前正向中科院熱傳實驗室洽借實驗室與設備，以進行下一步的實驗工作。

此外，在吾人根據理論模型所提出的設計方式與控制理念中，對系統的動態模型需要有精確的掌握，然而由於實際建造的 RTP 系統已經在理想燈組無法取得下作了一些修改，因此其數學模型有必要先執行適當的系統鑑別(System Identification)，如此才能確實驗證我們所提出的方法，這也是今後值得我們繼續努力並設法執行的研究工作項目。

## 五、參考文獻

[1] Y. K. Jan and C. A. Lin, "Lamp Configuration Design for Rapid Thermal Processing Systems," IEEE Trans.

Semicond. Manufact., vol. 11, no. 1, pp. 75-84, Feb. 1998.

[2] C. A. Lin and Y. K. Jan, "Control System Design for Rapid Thermal Processing System," 1999 Automatic Control Conference, pp. 320-325, Mar. 1999.

[3] F. L. Degertekin, J. Pei, B. T. Khuri-Yakub, and K. C. Saraswat, "In situ acoustic temperature tomography of semiconductor wafers," Appl. Phys. Lett., Vol. 64, No. 11, pp. 1338-1340, Mar. 1994.

[4] Y. J. Lee, B. T. Khuri-Yakub, and K. Saraswat, "Temperature measurement in rapid thermal processing using the acoustic temperature sensor," IEEE Trans. Semicond. Manufact., vol. 9, no. 1, pp. 115-121, Feb. 1996.

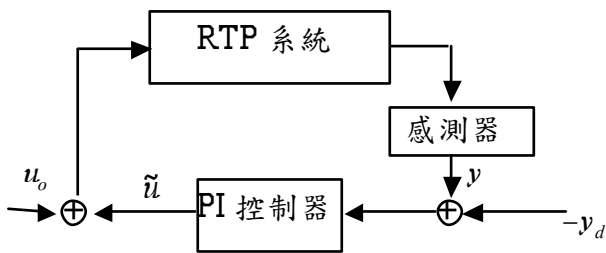
[5] V. M. Donnelly and J. A. McCaulley, "Infrared-laser interferometric thermometry: a nonintrusive technique for measuring semiconductor wafer temperatures," J. Vac. Sci. Technol., Vol. A8, No. 1, pp. 84-92, Jan./Feb. 1990.

[6] F. Roozeboom and N. Parekh, "Rapid thermal processing systems: A review with emphasis on temperature control," J. Vac. Sci. Technol., Vol. B8, No. 6, pp. 1249-1259, Nov./Dec. 1990.

[7] F. Y. Sorrell, S. Yu, and W. J. Kiether, "Applied RTP optical modeling: An argument for model-based control," IEEE Trans. Semicond. Manufact., vol. 7, no. 4, pp. 454-459, Nov. 1994.

# Project 1

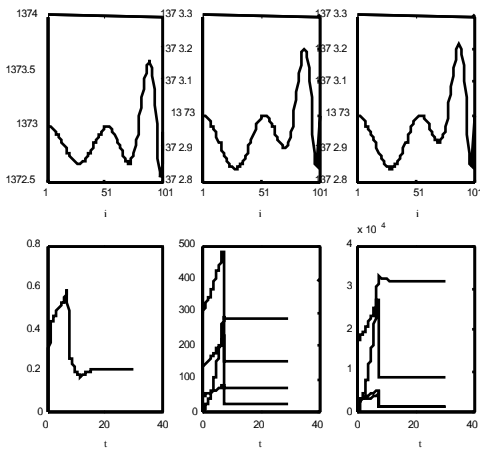
## 六、圖表



圖一 快速熱程序控制系統示意圖

表一 不同最終穩態溫度下之模擬結果

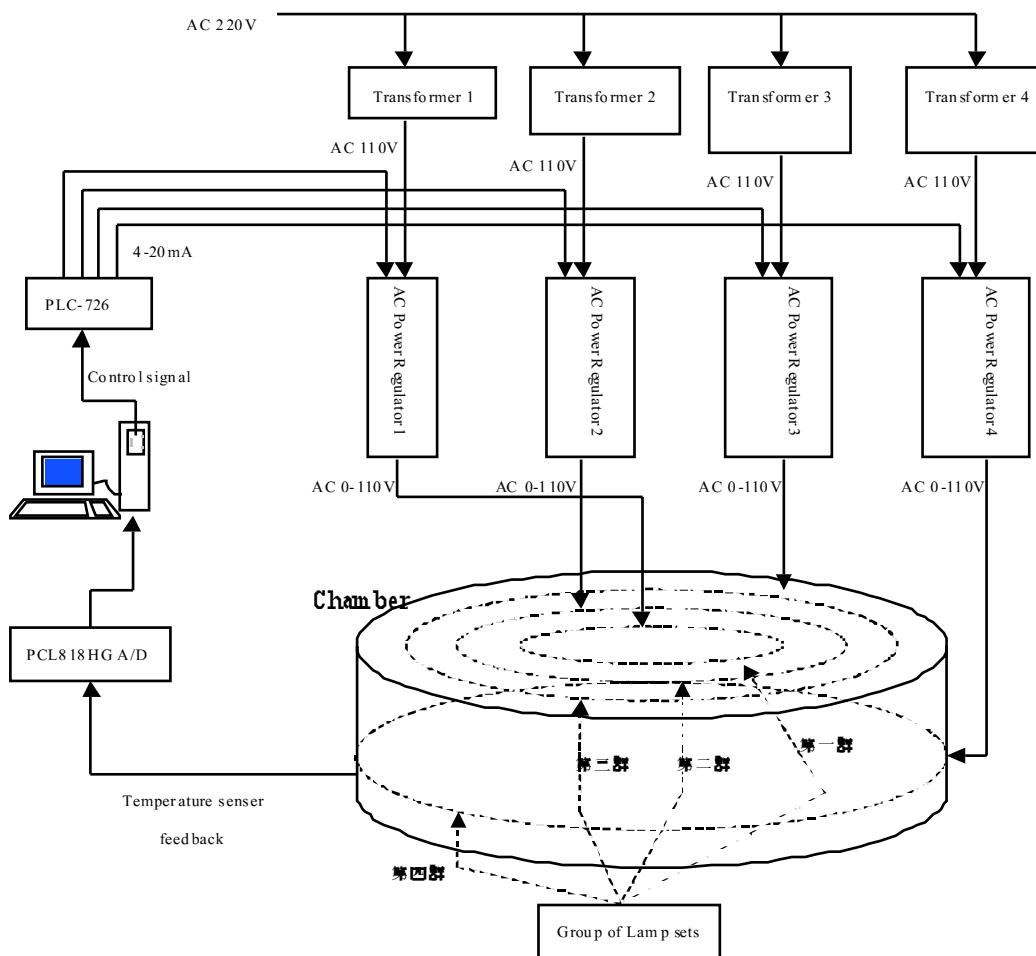
最終穩態溫度	最大溫度誤差	穩態溫度誤差
1100°C	0.578	0.211
1000°C	0.467	0.152
1200°C	0.692	0.284



圖二 模擬結果

(最終穩態溫度 1100°C，最大誤差 0.578°C)

# Project 1



圖三 快速熱程序系統硬體架構圖