

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

熱程序動態模式建立參數判別及溫度控制(II)

Thermal Process Modelling Parameter Identification and Temperature Control in Rapid Thermal Processing Equipments

計畫編號：NSC 87-2218-E-009-003

執行期限：86 年 8 月 1 日 至 87 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

Email: calin@cc.nctu.edu.tw

一、中文摘要(關鍵詞：快速熱程序設備、溫度控制、多變數系統控制)

本研究針對一個具有 4 個燈組的快速熱程序系統探討溫度控制系統設計的問題。控制系統包括最小平方前饋控制與比例積分(PI)的回授控制。控制的目的是在於使晶圓表面溫度均勻並準確地跟蹤預定的溫度軌跡。研究發現，溫度的穩態誤差只和溫度量測的位置有關，與 PI 控制器的增益無關。我們提出一個方法來決定好的量測位置。PI 控制器增益矩陣是根據線性化及簡化後的模式來設計。利用 LQR 加權矩陣的選擇我們有效地將系統的暫態響應與強健性同時考慮。模擬的結果顯示，所設計的溫度控制系統能在很大的操作溫度範圍內提供穩定、均勻且準確的溫度控制。後續的研究將嘗試進行實際 RTP 系統的硬體製作，實現前所提出的構想及設計。本研究的另一個重點是以一個舊的快速熱程序設備 HEATPULSE 210T 進行系統參數判別及 PID 溫度控制實驗。

英文摘要(Keyword: Rapid Thermal Processing Equipment, Temperature Control, Multivariable System Control)

We study temperature control system design for a rapid thermal processing (RTP) system which has 4 concentric independent lamp zones. The control system includes a feedforward controller designed based on least square method and a feedback PI controller. The goal is to achieve precise temperature tracking while

maintaining temperature uniformity on the wafer surface. It is found that steady-state temperature performance is closely related to the temperature sensor location, but is independent of the PI controller gain matrices. We proposed a method to choose "good" measurement locations. The PI controller gain matrices are designed by using the LQR method with the weighting chosen to reflect the tradeoff between transient response and robustness. Simulation results show the control system designed is able to maintain good temperature tracking and uniformity for a wide temperature range. Subsequent research will focus on implementation of an RTP system based on the idea and design developed so far. In this research we also conduct experiments with an old RTP equipment HEATPULSE 210T. We developed a simple model for the system and use it to design simple PID controllers.

二、計畫緣由與目的

在半導體的加熱製程中，製程的均勻度 (Uniformity) 與晶圓表面溫度的均勻度有很密切的關係。例如在離子植入退火中，溫度的均勻度直接影響晶圓薄膜電阻(sheet resistance)的均勻度；在絕緣氧化層的製程中，氧化層的製程中，氧化層的厚度與溫度成線性(linear)或拋物線(parabolic)的關係(假設壓力不變)等。製程的均勻度直接影響產品的良率(yield)，因此製程溫度的均勻度的控制相當重要。當晶圓越來越大，溫度均勻度控制的問題明顯地越來越

有挑戰性。另一方面，當半導體元件的密度越來越高，設計(feature size, $\leq 0.35\mu\text{m}$)越來越小時，加熱製程的溫度必須要很精確的控制，同時淺接面(shallow junction)的要求，使得熱預算必須越小越好。

溫度控制的優劣(準確度、均勻度及強韌性)，取決於許多因素。在回授控制的架構下，這些因素包括溫度量測的準確度，熱源(致動器)設計的優劣及溫度控制系統的設計與合成。簡單的說，溫度的量測如果不準，則溫度的控制也不準，(不管用什麼樣的控制系統)；如果熱源本身沒有能力提供溫度均勻需要的熱分佈量，則在好的控制系統也無法達到溫度均勻的控制；而控制系統的設計需要有系統數學模式，數學模式愈準，控制系統愈能可靠地(強韌地)維持好的性能。

本研究之目的即在設計快速熱程序系統之溫度控制系統，藉由溫度量測點的選擇與控制器增益值的設計，使晶圓在快速加熱過程中能夠準確地追隨所給定的溫度軌跡並維持整片晶圓溫度的均勻。

三、結果與討論

本研究所考慮的快速熱程序系統的燈源配置如圖一所示。燈源配置的設計考慮如何達到晶圓表面溫度的均勻，燈源配置的理論根據以及配合的開路最小平方控制器均詳細整理於參考文獻[1]。

完整的溫度控制系統包括前饋開路及回授閉路控制器，如圖二所示。回授控制需要量測，由於這個系統有四個燈組，我們決定做四點的溫度量測。我們發現穩態的溫度誤差與溫度量測的位置有密切的關係。根據這個關係，我們提出一個決定溫度量測點的方法[10]。

典型 RTP 系統溫度的需求軌跡是加溫然後維持等溫。而熱動態方程式所描述的從燈源至晶圓溫度的關係大致是一個消耗性(dissipative)的系統，因此比例積分(PI)控制器似可滿足控制的需求。我們因此考慮一個4個輸入4個輸出的PI控制器。設計的過程大致如下：我們利

用線性化的方法得到系統在某一固定均勻溫度的線性模式。這個模式大致描述系統在開路控制之下的溫度誤差的動態。然後我們利用平衡實現(balanced realization)的方式，將此101階的系統，簡化為一個4階的系統。我們以此簡化的系統設計LQR最佳的狀態回授。我們選擇LQR的加權矩陣，適度地考慮暫態響應及強韌性。一組模擬的結果示於圖三，其中溫度的軌跡是從 400°C 到 1100°C ，升溫速度是 100°C 每秒；晶圓直徑為20公分。由模擬結果可知，在考慮對流效應之下，溫度誤差逐步增大到升溫結束時約為 0.578°C ，之後即快速地下降進入穩態誤差值(約 0.211°C)。在第7,15與第30秒時的晶圓溫度分佈分別畫於圖三之1至3。圖三之4是溫度誤差隨著時間的變化。至於圖三之5與6則分別是各燈組必須提供的熱通量與功率。詳細的理論及方法均整理於參考文獻[10]。

後續的計畫(已在進行)將嘗試根據上所描述的設計進行硬體的製作，以驗證理論與模擬結果。另外我們利用一個舊的RTP設備HEATPULSE 210T(AG Associates)進行量測實驗，以所得的數據作系統判別及發展簡單的PID控制器。實驗及分析設計的結果，讓我們對實際RTP系統有進一步的了解。有關實驗的描述及結果分析均詳見於參考文獻[9]。

四、計畫成果自評

本研究大致達成預期的目標。除了上述簡單敘述之外，詳細結果發表於[1],[9]及[10]。後續硬體製作及實驗結果如能接近理論及模擬所預期的，則進一步發展為實際製程可用之RTP系統將有可能。研究的過程也讓我們對RTP的基本有較深入之了解，當有助於未來繼續在這方面的研究。

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., Feb. 1998.

[2] H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 1, no. 3, pp. 105-114, Aug. 1988.

[3] P. P. Apte and K.C. Saraswat, "Rapid thermal processing uniformity using multivariable control of a circularly symmetric 3 zone lamp," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 5, no. 3, pp. 180-188, Aug. 1992.

[4] C. D. Schaper, M.M. Moslehi, K.C. Saraswat, and T. Kailath, "Modeling, identification, and control of rapid thermal processing systems," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 141, no. 11, pp. 3200-3209, Nov. 1994.

[5] K. Zbou, F. C. Doyle and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1995.

[6] B. A. Francis, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer-Verlag, 1987.

[7] T. Kailath, *Linear Systems*, Prentice-Hall, 1980.

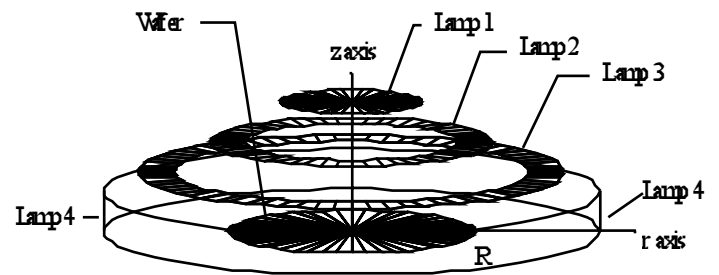
[8] G. H. Golub and C. F. Van-Loan, *Matrix Computations*, Johns Hopkins University Press, 1989.

[9] 康育銘，快速熱程序系統之動態模式建立

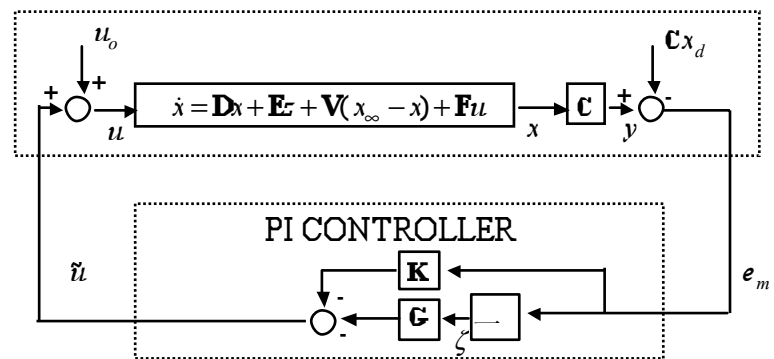
參數判別與溫度控制，國立交通大學電機與控制系，碩士論文，87年6月。

[10] C. A. Lin and Y. K. Jan, "Control System Design for a Rapid Thermal Processing System," 1999 自動控制研討會。

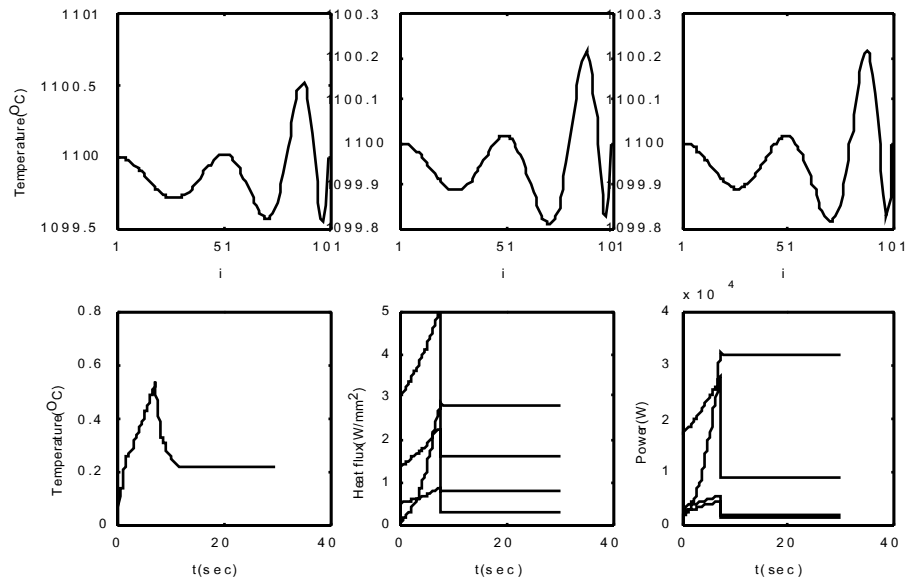
六、圖表



圖一 快速熱程序系統之示意圖



圖二 全系統示意圖



圖三 RTP 系統溫度控制相關模擬結果

(1) $T(r,7)$

(2) $T(r,15)$

(3) $T(r,30)$

(4) $\max_{r \in [0,100]} |T(r,t) - T_d(r,t)|$

(5) $B_j(t) \quad j=1,2,3,4$

(6) 各燈組之功率