

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

快速熱機台設備及製程研發

子計畫三：快速熱機台內流場重整與暫態熱傳研究

Investigation of Flow Relaminarization and
Transient Heat Transfer in a Rapid Thermal Processor

計畫編號: NSC 90-2212-E-002-227

執行期限: 90 / 8 / 1 ~ 91 / 7 / 31

主持人：翁宗賢 臺灣大學應用力學研究所副教授

中文摘要

本計畫探討水平式快速熱處理機台內的暫態熱流現象，建構熱模擬機台，能以鹵素燈管快速加熱八吋晶圓，由晶圓背面觀測紅外線影像，推測溫度分佈。本計畫並建立數值模式，經由計算以瞭解半導體快速熱製程中的參數效應，期以提高晶圓製程中的溫度均勻性。由數值計算探討發現在晶圓上方加裝鍍金的反射環，能最有效地補償熱輻射損失；若在反射環選擇區域鍍金時，則晶圓表面的溫差可控制在攝氏數度之內。

關鍵詞：快速熱製程、暫態熱流、熱輻射、混合熱對流

Abstract

This project investigated transient heat transfer in a RPT. A thermal model was built which can simulate rapid thermal processing up to 8-inch wafer. Temperature distribution of the wafer can be deduced from infrared images acquired through a backside window. Numerical computations also carried out to explore parametric influences. Results show that a gold plated ring reflector can effectively compensate radiation heat losses. A ring reflector with properly regional plated can reduce temperature variation down to a few degrees.

Keywords: rapid thermal processing, transient flow, thermal radiation, mixed convection

二、緣由與目的

在半導體的快速熱製程中，高溫熱輻

射促使晶圓表面氧化，氧化層的厚度及均勻性決定於受熱晶圓的溫度分佈，若能縮小製程中的晶圓表面溫差，可使氧化層平整且均勻，是提高製品良率、達到電特性一致的要件。但由於處理爐的幾何形狀與熱輻射特性，使得輻射熱源照射至晶圓的強度無法均一。Dilhac 等人[1] 尋求對晶圓最佳的溫度補償效果；Lee 等人[2]在晶圓與承載台間放置不同矽環，改善氧化層厚度及均勻性。Rao 等人[3]探討升溫速率對晶圓表面的熱應力及氧化層的影響。Hong 等人[4] 在晶圓上方放置石英圓板，以抑制中心上升氣流，改善超薄氧化層之均勻度。

為瞭解並改善晶圓溫度均勻性，本計畫以台大電機系半導體實驗室中的水平式八吋晶圓快速熱處理爐為模擬對象，設計並建造適合熱流實驗的模型機台，以觀測晶圓的溫度分佈，並藉由實驗方法來尋求達到溫度均勻的最佳方法。本計畫同時以數值計算方法探討在快速熱程中，處理爐內的暫態熱流場與晶圓的溫度變化，以補足實驗量測的不足，提供完整的熱流場變化資訊。再者，數值計算時的參數調整範圍非常大，很適合控制參數的尋優，並預測超出實驗範圍的系統性能。

三、結果與討論

本計畫所建熱流模擬機台如圖 1 所示，反應爐內部長 300 mm，較實體短 400 mm，寬度及高度分別為 300 mm 及 60 mm，壁面由不銹鋼構成，壁內有冷卻水通道，加熱燈管組合在石英窗的上方，如圖 2 所示。本機台與實體機台最大的不同是在晶圓的下方另設一觀測用的石英窗，用來

攝取晶圓的近紅外線影像，經由影像處理與比對，可據以推算出晶圓的相對溫度變化。真實的晶圓溫度需要高價位的紅外線溫度影像儀量測，並經精確的晶圓表面放射率校準，雖然無法在本計畫核定的經費內建置，但可經由單點測溫與相對溫度資訊，加上數值計算的熱流場，因而可推知晶圓的溫度變化歷程。本實驗機台亦具備加熱燈管功率控制與爐內壓力控制，故可摹擬相當接近於實際的快熱製程；不過為了操作安全與建造成本考慮，本機台設計的操作溫度為 600°C，也不需在無塵室作業，因此尚無法應用於晶圓的氧化層生長。

由於紅外線 CCD 攝影機價位超出本計畫設備經費，但一般以矽晶製作的 CCD 攝影機對波長 1 μ m 以內的近紅外線仍有感應，故本計畫配合紅外線特殊鏡頭，以攝取晶圓影像。整套數位影像系統與溫度校準在組裝測試中，晶圓動態溫度擷取與分析將持續進行之。

為探尋晶圓在快速熱處理爐內的合宜操作條件，以改善溫度均勻性，本計畫同時以三維數值模擬計算晶圓溫度及爐內流場，在處理爐內晶圓與加熱石英窗之間放置石英擋板，以及在晶圓上方放置環型反射鏡，並改變擋板大小與直徑，變化反射環之控制參數，決定最佳操作狀況。

數值摹擬結果的比較是以處理爐內壓力為 1atm，等高温 1100K 加熱 9 秒時的製程。首先將與晶圓相同直徑 20.32cm、厚度 0.2cm 之石英擋板安置於晶圓上方，石英擋板與晶圓間之距離分別設定為 2cm、1.75 cm、1.5cm、1.25cm 及 1cm。由圖 3 的晶圓表面溫度分佈可知，石英擋板與晶圓之間距縮小時，儘管晶圓邊緣之溫差逐漸增大，但在固定溫差內的區域增大，晶圓中心區域溫度均勻也愈高。表一統計晶圓溫差在 ΔT 範圍內之面積比：在 $\pm 5K$ 及 $\pm 10K$ 溫差範圍內，石英擋板置於晶圓上方 1cm 處，晶圓面積使用率比沒有放置石英擋板時分別增加了 11% 及 3.3%。

圖 4 為石英擋板與晶圓在不同間距下反應過程中第 9 秒時爐內流場速度向量剖面圖，及其 X 方向及 Z 方向的速度分量等位圖。當晶圓與石英擋板的間距為 1cm，

此時的 Rayleigh 數為 520，兩平板之間無對流胞之形成，X 方向及 Z 方向速度分量都很小，這與理論上 Ra 值小於 1700 時兩平板間無對流胞組織之情況是吻合的。在晶圓之兩旁氣體，受到熱源燈管的加熱與晶圓表面的加溫，形成向上流動氣流；當上升氣流碰到爐頂及爐壁時，氣體溫度降低，密度變大而往下沉，因而在晶圓兩旁形成兩個對稱之對流胞。

兩平板之間距為 1.25cm 時，其 Ra 數為 1014，由於擋板與晶圓之間距小，使得對流胞受到擠壓，並受到晶圓兩旁大型對流胞的牽引，此時石英擋板與晶圓之間則有數個微弱之對流胞。隨著石英擋板與晶圓之間距逐漸加大，對流胞組織強度增大，且數目逐漸減少，而在 Ra 數為 4140 (間距 2cm) 時，石英擋板與晶圓之間形成 7 個旺盛之對流胞。當 Ra 數值介於 1700 及 47000 時，兩平板間會形成對流胞，可以驗證數值模擬已可適當計算出擋板與晶圓間形成 Bernard 熱對流胞。

接著在晶圓上方固定間距 1cm 處，分別放置直徑 20.32cm、23.32cm、26.32cm、28.32cm (厚度仍為 0.2cm) 石英擋板，比較擋板直徑對晶圓溫度均勻性之影響。由圖 5 顯示：石英擋板直徑的增大能提升晶圓整體之溫度，又由於進入晶圓邊緣之輻射熱通量較多，所以晶圓邊緣溫度的提高，使得中心與邊緣之溫差逐漸減小。

以數量化計算晶圓在溫差 ΔT 範圍內之面積比率顯示，放置直徑 23.32cm、26.32 cm 及 28.32cm 之石英擋板，在 $\pm 10K$ 溫差範圍內，面積比率較直徑 20.32cm 之石英擋板分別增加了 19%、30.6% 及 31.8%。直徑 28.32cm 之擋板，在 $\pm 16K$ 溫差範圍內面積使用率即可達 100%，而直徑 20.32cm 之擋板須在 $\pm 26K$ 範圍內才能達到。

因此，放置直徑愈大之石英擋板，在晶圓溫度均勻性有明顯的提升，主要原因為直徑愈長之擋板其表面積愈大，吸收燈管大部分之輻射能量後，放射出均勻之輻射能量也就愈多，晶圓表面輻射均勻度及溫度均勻性也就提高。

應用石英擋板來改善晶圓的溫度均勻

性效果仍有限，為增加晶圓邊緣的入射熱輻射量，本計畫經嘗試多種改進方案後，採用比晶圓直徑大 2 cm 的柱狀環，環高 1.8cm，內面鍍金，可將燈管輻射照至晶圓上。衡量加熱燈管為直管狀，故反射環內緣的並非全部鍍金，而是在與燈管垂直的 X 方向的區域全部鍍金，亦即鍍金面積比為 100%，在與燈管平行的 Y 方向則有不同面積比之鍍金層，面積比分別為 25%、50%、75%、100%，如圖 6 所示。經由數值計算來探討反射環在 Y 方向鍍上不同面積比之鍍金層，對晶圓溫度分佈之影響。

觀察圖 7 可發覺，鍍金面積比 25% 與 100% 之反射環在 Y 方向晶圓邊緣溫度分別過低及過高，鍍金面積比 50%、75% 之反射環的晶圓中心與邊緣溫差較小。比較四組晶圓面積之使用率，如表二所示，在 $\pm 3K$ 溫差範圍內，在 Y 方向鍍金面積比為 50% 之反射環，面積使用率可達 100%，鍍金面積比 50% 比均勻性次佳之，鍍金面積比 75%，在面積使用率上提高了 14.8%。

由以上結果可知：鍍金面積比 50% 之反射環可將晶圓面積使用率在 100% 時，將晶圓的溫差可控制在 $\pm 3K$ 溫差範圍內，遠較於其他面積比之反射環在 $\pm 6K$ 、 $\pm 8K$ 溫差範圍內還來的好。

選擇 Y 方向鍍金面積比 50% 之反射環作為設計參考，然後在 Y 方向方面分別在底部、中間、頂部三種不同之區域鍍上面積比 50%、62.5% 之鍍金層，如圖 8 所示，以比較對晶圓溫度均勻性之影響。由圖 9 發現，中間區域鍍上面積比 50% 及 62.5% 之鍍金層可使晶圓整體之溫度較為均勻。由表三中晶圓面積使用率來看，在 $\pm 3K$ 溫差範圍內，底部區域面積比 50%、中間區域面積比 50%、62.5% 之鍍金層，在面積使用率上皆可達 100%。在 $\pm 2K$ 溫差範圍內，在中間區域面積比 62.5% 比 50% 之鍍金層在面積使用率上提高 4.6%。因此中間區域面積比 50% 之鍍金層在下方再鍍上 12.5% 之金，可補償晶圓邊緣較低之溫度分佈。

由以上計算結果可知：晶圓表面溫度不均勻的主要因素是受到熱輻射的影響，晶圓之輻射熱量損失主要為燈管部分之輻射熱量與晶圓邊緣與底部之能量為爐壁所

吸收，少部分由自然對流所引起之損失。在晶圓上方放置石英擋板及鍍金環形反射面，並調整擋板與反射環參數，對晶圓表面溫度均勻性及邊緣溫度有明顯的補償效果。由數值模擬結果顯示，石英擋板能使晶圓中心區域的溫差縮小，但對晶圓邊緣的熱輻射補償效果有限，而環狀鍍金反射環能增加燈管入射至晶圓邊緣的輻射量，可有效地縮小晶圓表面溫差至數度之內。

四、計畫成果自評

本研究計畫旨在探討快速熱處理爐內的熱流現象，瞭解晶圓在快速熱製程中的溫度歷程，據以改善晶圓溫度分佈的均勻性。經由熱流分析可知：輻射熱傳掌控高溫製程的溫度分佈，對流與傳導的影響較小。因此，在晶圓與加熱石英窗間加一石英擋板，雖可抑制對流熱傳量，但無法有效改善晶圓邊緣的輻射熱損失。熱流場經過眾多變數組合計算比較，最後以適當設計的環形部份鍍金反射環能最有效率改善晶圓的溫度，可將溫差縮小至數度之內。此部份之數值模擬結果業已整理成文，並將在國內的學術會議中發表[6]。本計畫摹擬實體機台所建構的熱流實驗機台，雖然工作溫度設計至 $600^{\circ}C$ ，但在晶圓下方另開設觀測用的石英窗，並嘗試組合紅外線數位影像系統，攝取晶圓的近紅外線影像，再經校準後，推測晶圓的溫度歷程。本項研究將持續進行，並與數值計算結果驗證，以確定鍍金反射環的功效。若能達成預期目標，則本研究將極其實用價值。

五、參考文獻

1. J. M. Dilhac, N. Nolhier, and C. Ganibal, "Thermal Modeling of a Wafer in a Rapid Thermal Processor," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, 8(4), 432-439, Nov 1995.
2. K. C. Lee, H. Y. Chang, J. G. Hwu, and T. S. Wung, "The Effect of Patterned Susceptor on the Thickness Uniformity of Rapid Thermal Oxides," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, 12 (3), 340-344, Aug 1999.
3. V. S. Rao, T. J. R. Hughes, and K. Garikipati, "On Modeling Oxidation of Silicon II: Numerical Aspects," *Int. J. Numer. Meth.*

Engng., **47**, 359-377, 2000.

- C.-C. Hong, Y.-R. Yen, J.-L. Su, and J.-G. Hwu, "Improvement in Ultrathin Rapid Thermal Oxide Uniformity by the Control of Gas Flow," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, **15** (1) 102-107, Feb 2002.

- FLUENT 5 User's "Guide, Fluent Inc. July 1998.

- 李志鵬、林志恂、翁宗賢, "水平式晶圓快速熱處理爐晶圓溫度均勻性之改良與補償分析", 投稿至第二十六屆全國力學會議。

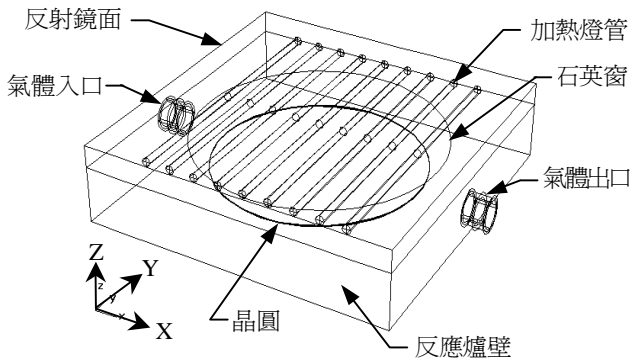


圖 1 水平式快速熱處理爐構造圖

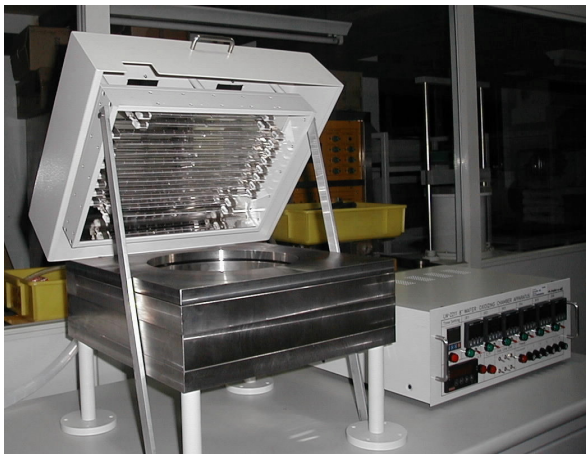


圖 2 水平式快速熱處理爐熱流模型

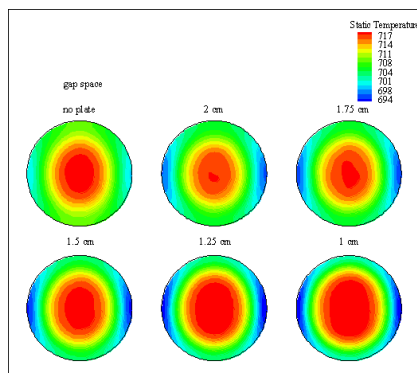


圖 3 石英擋板與晶圓在不同間距下晶圓表面溫度分佈等位圖

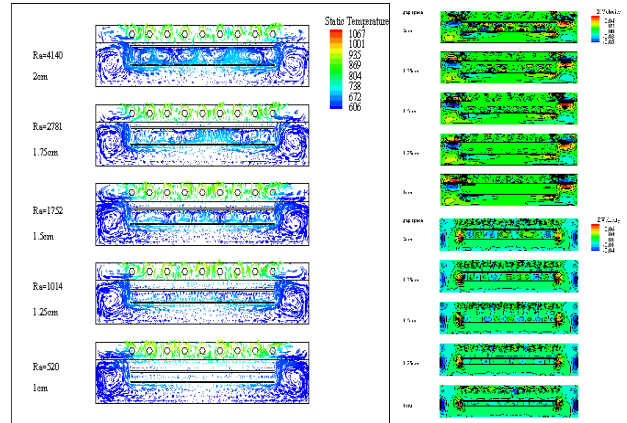


圖 4 擋板與晶圓在不同間距下第 9 秒爐內流場速度向量剖面圖

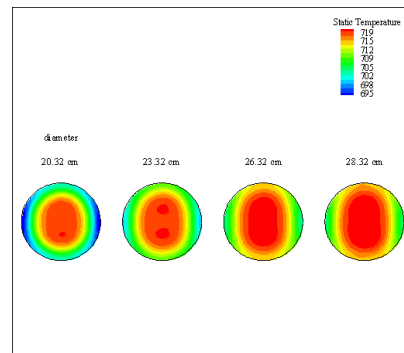


圖 5 放置不同直徑之擋板時晶圓表面溫度分佈等位圖

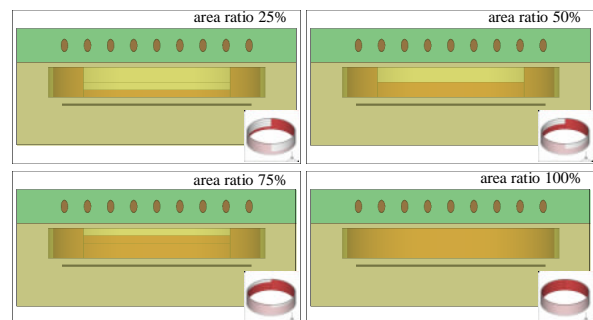


圖 6 在反射環 Y 方向不同鍍金面積比處理爐與反射環之橫剖面圖

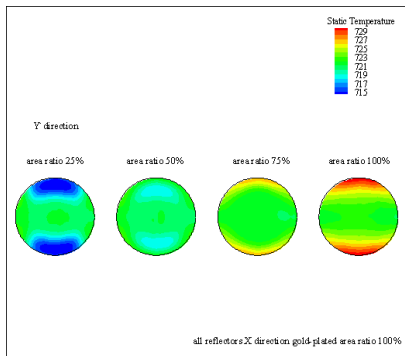


圖 7 在反射環 Y 方向不同鍍金面積比晶圓表面溫度分佈等位圖

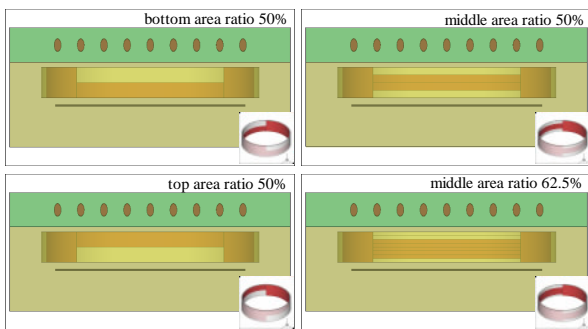


圖 8 在反射環 Y 方向不同位置鍍上面積比為 50% 及 62.5% 之反射面

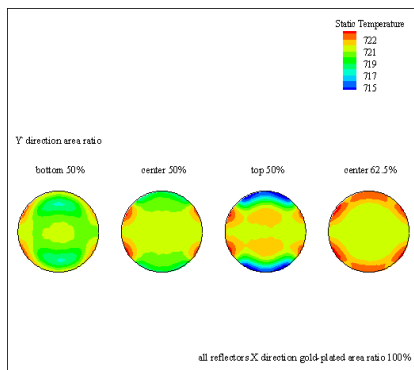


圖 9 在反射環 Y 方向不同位置鍍上反射面時之晶圓表面溫度分佈等位圖

表一 晶圓表面溫差在 ΔT 範圍內之面積使用率(擋板與晶圓間距不同時)

距離	晶圓	無擋板	2.00 cm	1.75 cm	1.50 cm	1.25 cm	擋板
ΔT (K)							
1		8.6	9.5	8.7	13.3	17.3	21.0
2		14.8	15.1	15.3	19.6	23.9	27.6
3		20.1	19.8	20.7	24.8	28.8	32.6
4		25.1	24.2	25.4	29.0	32.9	36.9
5		29.6	28.3	29.6	33.1	36.6	40.5
6		34.3	32.2	33.5	36.9	40.2	44.0
7		39.0	36.0	37.3	40.5	43.4	47.1
8		44.0	39.9	41.0	43.9	46.6	50.3
9		49.3	44.1	44.9	47.4	49.8	53.3
10		55.8	48.4	48.8	50.8	53.0	57.1

表二 晶圓表面溫差在 ΔT 範圍內之面積使用率(反射環 Y 方向不同鍍金面積比)

Y 方向	鍍金面積比	鍍金面積比	鍍金面積比	鍍金面積比
ΔT ($\pm K$)	25%	50%	75%	100%
1	47.3	67.3	64.9	42.3
2	59.4	88.2	76.4	58.4
3	66.6	100.0	85.2	70.4
4	72.8		92.4	79.2
5	78.8		98.1	86.1
6	86.7		100.0	92.0
7	99.5			96.8
8	100.0			100.0

表三 晶圓表面溫差在 ΔT 範圍內之面積使用率(反射環 Y 方向鍍金層面積比為 50% 及 62.5% 在不同區域時)

位置與比率	底部區域鍍金面積比	中間區域鍍金面積比	頂部區域鍍金面積比	中間區域鍍金面積比
ΔT ($\pm K$)	50%	50%	50%	62.5%
1	67.3	76.8	68.8	73.4
2	88.2	92.8	78.6	97.4
3	100.0	100.0	83.5	100.0
4			87.4	
5			91.4	
6			96.6	
7			100.0	

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告



※※

快速熱機台設備及製程研發

※※

子計畫三：快速熱機台內流場重整與暫態熱傳研究

※※



計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-227

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：翁宗賢

共同主持人：

計畫參與人員：李志鵬，陳富義

本進度報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

中 華 民 國 九 十 一 年 八 月 二 十 二 日