



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 水平式快速熱機台內暫態混合熱對流的數量顯影

## Quantitative Flow Visualization of Transient Mixed Convection in a Horizontal Rapid Thermal Processor

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-047

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：翁宗賢 臺灣大學應用力學研究所

計畫參與人員：黃世偉，鄭永群 臺灣大學應用力學研究所

### 一、中文摘要

本計畫探討水平式快速熱處理機台內的暫態混合熱對流現象，以數值計算與流場的數量顯影技術，觀測熱機台內開始快速加熱時的流態建立過程。機台內熱流場的深入瞭解將有助於半導體快速熱製程參數的掌控，以提高晶圓製作品的均勻度。

快速熱機台內的自然熱對流發生於相當低的 Rayleigh 數，混合熱對流則延伸至不同的  $Gr/Re^2$  比值。為設計一適當的流場顯影實驗用模型，本研究先以數值方法計算機台內的暫態熱對流現象，再由計算結果推算類比模型的尺寸與實驗參數範圍。熱流實驗模型正在建置中，本文先報告重要的數值流場顯影結果，流場的實驗觀測將接續進行，並將陸續發表結果。

關鍵詞：流場數量顯影、暫態熱流、混合熱對流、快速熱製程

### Abstract

This project investigated natural and mixed convection in a RPT mode that is filled with seeded liquid for visualization. Transient flow patterns are explored over a range of flow parameters numerically and experimentally. Processing control and parameter setting can be improved with a better knowledge of flow physics in the RTP.

The onset of natural convection occurs at a relatively low Rayleigh number. Mixed convection extended to various  $Gr/Re^2$  ratios. To design a proper thermal model for visualization, numerical computations were carried out to study the starting of convection. A thermal model was constructed and experimental parameters were selected based

on these results. Pertinent flow patterns are presented in this report. Consequent visualizations are still under investigation and results will be appeared soon.

**Keywords:** Quantitative flow visualization, transient flow, mixed convection, rapid thermal processing

### 二、緣由與目的

在半導體的快速熱處理製程中，晶圓上均勻的溫度分佈是提高良品率、達到電特性一致的要件。但是在製程中，由於幾何形狀的限制與熱輻射的特性，使得輻射熱源照射至晶圓的強度無法均一；此外，機台內的氣體受熱或通氣引致的自然熱對流或強制熱對流，均會引致晶圓上的溫度不均勻分佈。本計畫針對一新建置之水平式快速熱台，建構一縮尺之流場顯影實驗用模型，充填液體與顯影介質，定性及定量觀測機台內的暫態熱流行為、對流發展與穩態時的流場型態。在相同的參數流場情況下，可充份地瞭解機台內的氣流的暫態熱流場，將有助於精確操控機台內之熱製程與參數設定。

快速熱處理機台內的熱對流型態，主要受到流場的自然熱對流參數 Grashof 數與強制對流參數 Reynolds 數的控制。當受熱的晶圓在通道下方時，只要相當低的溫差就會產生自然熱對流；雖然一般機台內的強制對流場均設計在層流範圍內，但是氣體入口形狀、熱源配置與暫態加熱速率均影響處理爐內流場型態的發展與轉變。本計畫先以數值計算的方法，探討熱機台內的氣體開始發生自然熱對流的位置與起始參數。自然熱對流場常有多模態形貌，

初始流場型態能左右流場達到穩態後的結構，因此需要深入的探討此暫態流場的變化。熱流場計算包括不同雷諾數(Re)下開始發生混合熱對流時的  $Gr/Re^2$  比值，與流場的形態在不同參數下的變化。這些計算結果就顯示流場的數值顯影，再經由流場的參數類比分析，以推算熱流模型的尺度與相對應的實驗參數範圍，做為模型設計的依據與實驗步驟的調變。

流場顯影包括定性的流場形態變化，並利用彩色質點軌跡測速技術量測對流場的速度，建立高解析度的影像系統，配合二極體雷射光源作同步調變與控制，以量測速度場。全域速度資訊可與數值計算結果驗證，並供數值模式修正的重要參考。

### 三、結果與討論

本報告以國立台灣大學電機系半導體實驗室中的水平式快速熱處理機台來進行模擬，其反應爐室內部構造長度 700mm、寬度 300mm 及高度 50mm，反應壁面材質由不銹鋼構成，外圍包覆水冷式冷卻系統。實際操作時之工作溫度可高達千度，但本計畫是模擬較低溫時晶圓表面溫度及流場的變化，通入的氣體為空氣，設定燈管加熱溫度對時間的變化關係為  $T=298+50*t$ ，其中 T 是燈管溫度，t 為時間，亦即加熱到 6 秒時燈管溫度為 598K。之後再觀察晶圓溫度變化情況。在模擬過程中，我們主要探討強制對流及壓力變化對晶圓表面溫度的影響。

#### (一)、強制對流

在反應過程中為了補充反應氣體的濃度，使氣體可以維持反應時所需的壓力，通常會在反應其間通入氣體，其流場的效應可視為強制對流。為了觀察強制對流對晶圓溫度均勻性的影響，本文的模擬將改變入口速度的大小，分別將入口速度設定為 0.1m/s、0.4m/s、0.8m/s 來進行模擬。圖 1 及圖 2 分別代表這三種不同入口速度下晶圓表面 X 方向及 Y 方向切線的溫度分佈圖。考慮代表流場浮力與慣性力比值的無因次參數  $Gr/Re^2$ 。在入口速度為 0.1m/s、0.4m/s、0.8m/s 時， $Gr/Re^2$  值分別為 11040、690、173，表示當入口速度較小時，浮力的影響較慣性力大，而隨著入口速度的增

加， $Gr/Re^2$  值變小，代表慣性力的增強。由此可知，當入口速度為 0.1 m/s 時，主要影響為浮力所引起的自然對流，強制對流在此例子中對晶圓溫度影響所扮演的角色並不顯著，沒有太大的改變。當入口速度為 0.4 m/s 時，晶圓表面的溫度分佈在迎風面邊緣上略為下降，我們可以由圖 5 來觀察，由於強制對流增強，所以晶圓前方的對流胞變小，有部份冷空氣直接衝到晶圓前方，帶走較多熱量。當入口速度為 0.8 m/s 時，由於入口的氣流量更大了，造成了晶圓整個表面溫度分佈的不均勻性及不對稱性更顯著，但其中在 Y 方向的溫差可以發現明顯減小，主要的原因可以從圖 5 來觀察，當入口速度為 0.8 m/s 時，由於慣性力的效應更強了，強烈的冷氣體大量噴至晶圓前方，帶走了更多的熱量，晶圓上方的上升氣流亦被吹散，所以在反應爐內入口端幾乎沒有對流胞的形成。此外對流影響的範圍不僅只有前端部份，甚至超過了晶圓中心部份，這也是為什麼在 Y 方向切線的溫差比較小的原因。由上可知，隨著入口速度的增加，即強制對流的增大，晶圓前後的溫度分佈越不均勻。此外，在圖 5 的流場比較方面：在入口速度為 0.1m/s 的例子中強制對流的影響很小，與 0.4 m/s 的例子比較可以發現晶圓前方的對流胞較大。而在入口速度為 0.8 m/s 中，我們發現在後方的對流胞較不明顯，主要的原因為大量的冷空氣從晶圓下方流過，使得晶圓下方氣體溫度變低，上升的熱氣流減少，且由於晶圓下方的流速較快，所以後方回流的形成比較不明顯。

#### (二)、改變爐內壓力

考慮爐內壓力的影響，本文將試著改變爐內初始的壓力，分別設定為 1atm，0.6 atm，及 0.02 atm，來觀察前後晶圓表面溫度變化。圖 3 及圖 4 為不同壓力下晶圓表面 X 方向及 Y 方向切線的溫度分佈圖。由圖 3 及圖 4 中可以發現，壓力越小時晶圓表面平均溫度越高，分別為 1 atm 的 363.02K，0.6 atm 的 367.22K，以及 0.02 atm 的 384.29K。為什麼會有如此的差異性呢？首先我們考慮一下晶圓表面所接受入輻射量的變化。在模擬設定時，我們將空氣的吸收係數設為 0.02，所吸收的輻射量雖然

很小，但還是可以看出有些微的影響，隨著氣體分子量的減少，晶圓表面所接受到的入輻射量較高。再由爐內流場隨壓力的變化的情形來看，圖 6 為不同操作壓力下的爐內中心切面速度向量剖面圖，當操作壓力為 1 atm 時，晶圓上方由於溫度梯度所引起的熱對流效應相當旺盛，而在晶圓兩旁所形成的對流胞，速度向量亦較大，將入口補充的冷氣體大量捲入，所以帶走晶圓表面較多的熱量，尤其在晶圓邊緣更為明顯。在 0.6 atm 時，晶圓上方的對流較為緩和，對流胞的速度向量大小也較緩和。而在 0.02 atm 時，由於爐內氣體濃度已相當稀薄，在晶圓上方，氣體分子向上的速度向量明顯減少，兩旁對流胞的速度向量相當小，所以氣體對流能帶走晶圓表面的熱量也較少，晶圓表面平均溫度就變高。

由上述的計算結果分析，並經由類比原則的計算比較，推算出適合的縮尺熱流模型為原型的二分之一，實驗參數亦列舉推算出來。由於熱幅射一般是沒有類比關係的存在，故在流場顯影的實驗設計中，本計畫另行設計適當的裝置，細部設計將在日後的報告中敘述之。

#### 四、計畫成果自評

本研究為求慎重，以善用補助之研究經費，特加強數值顯影計算，藉由計算結果以類比方式推導熱流模型的設計尺寸與實驗參數。數值的摹擬計算結果業已整理成文，並在國內的學術會議中發表[1]。由於計算部份耗時，延誤了實驗模型的構建時程。以本計畫儀器設備經費實無法購置照明強度足夠之脈衝式二極體雷射光源，但最近購置國產之連續光二極體雷射光源，正在進行同步調變與控制電路改裝，並嘗試與高解析度之數位影像系統同步操作。雖然進度落後計畫之預定時程，但本研究將持續進行，預期目標不變，流場的顯影觀測將是主要重點，實驗的數量顯影結果將可於相關的學術期刊發表。

#### 五、參考文獻

1. 黃世偉，鄭永群，翁宗賢：水平式晶圓快速熱機爐脈衝加熱之暫態熱流分析，第七屆全國計算流體力學學術會議論文

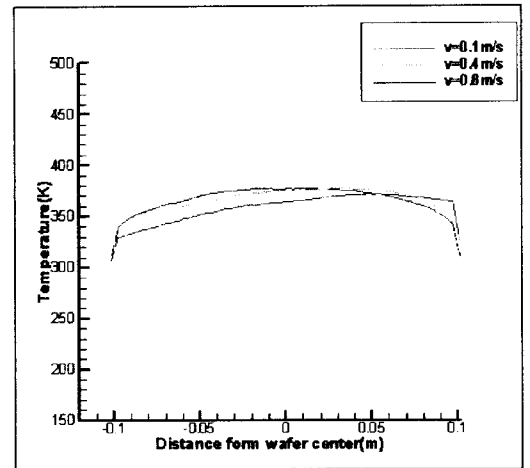


圖 1 不同入口速度時晶圓表面 x 方向切線溫度分佈圖

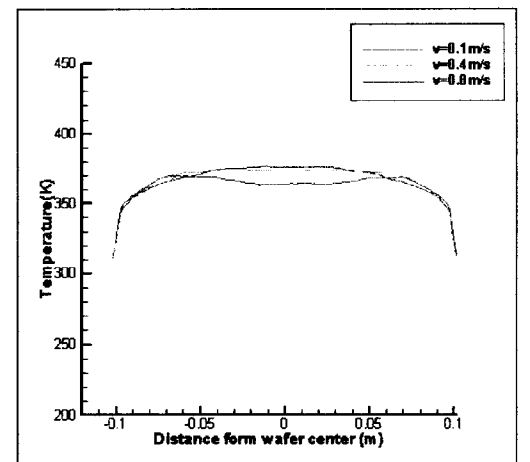


圖 2 不同入口速度時晶圓表面 y 方向切線溫度分佈圖

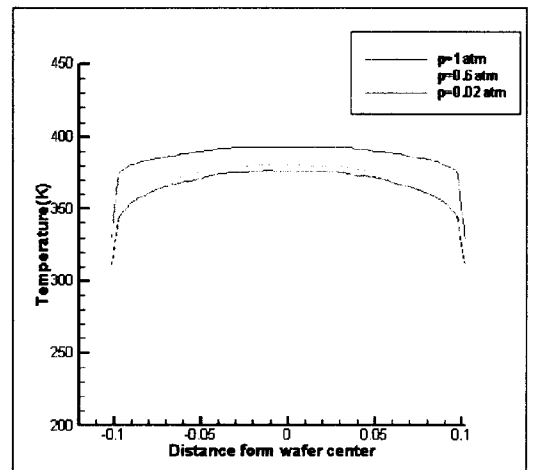


圖 3 不同操作壓力下晶圓表面 x 方向切線溫度分佈圖

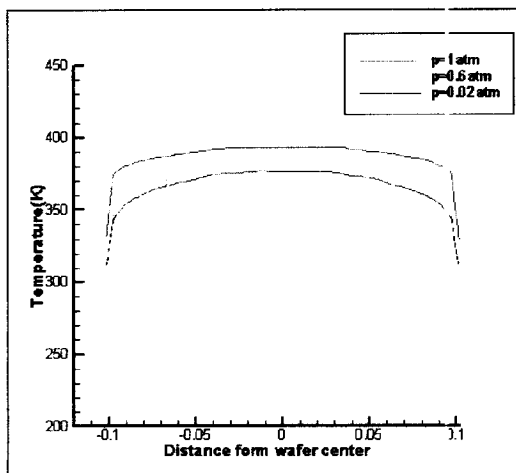


圖 4 不同操作壓力下晶圓表面 y 方向切線溫度分佈圖

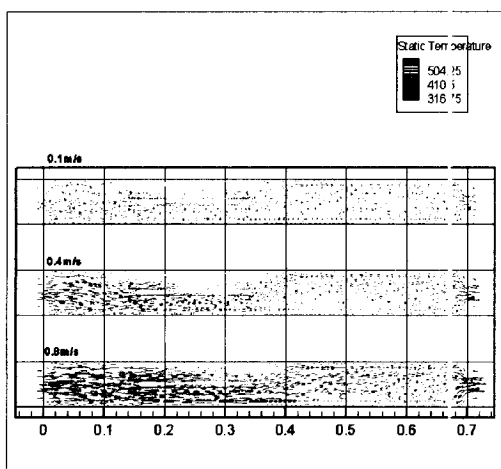


圖 5 不同入口速度爐內流場速度向量剖面圖

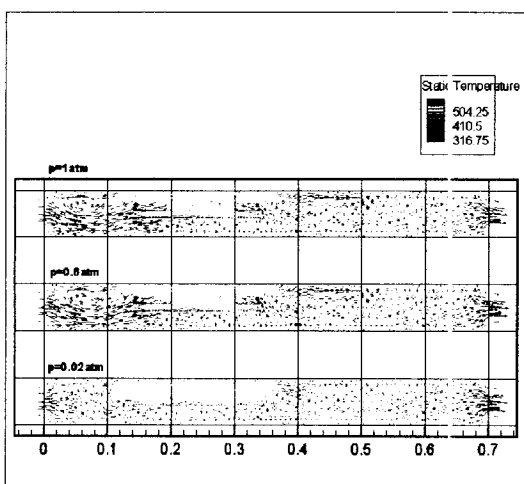


圖 6 不同壓力下爐內流場速度向量剖面圖