

LPCVD 製程設備中加熱系統之熱輻射量測及晶圓熱應力分析 (II)

計畫編號：NSC 87-2218-E-009-007

執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

整合型計畫主持人：

總計畫主持人：林清發 交通大學機械所 教授

子計畫主持人：曲新生 交通大學機械所 教授

一、摘要

本計畫為三年計畫，其主要目的在探討 LPCVD 製程中加熱系統之熱輻射量測及晶熱應力分析。研發的主題有：(1)量測加熱燈源的輻射頻譜(2)晶圓輻射特性之量測及分析(3)分析晶圓在加熱過程中之溫度分佈(4)晶圓的熱應力分析(5)製程參數對晶圓溫度分佈與熱應力之影響分析。本年度的計畫是量測加熱燈源的輻射頻譜和在不同輻射加熱曲線對晶圓溫度與應力分佈的分析。

二、計畫緣由與目的

在國內製造業走向技術密集和資本密集的潮流下，半導體產業是近年來高科技及高附加價值的代表產業。它佔我國製造業的比重正逐年上升，也是我國目前外銷產業的主力。為了增進產業的競爭力，因此國內的半導體大廠如台積電，聯電，華邦等等和政府的研究單位都全力研究如何改善半導體製程的效率和良率。近幾年來，半導體工業雖已發展了許久，但仍存在不少問題急需加以改善。其中快速加熱製程 (Rapid Thermal Processing, 簡稱為 RTP) 就是為了不影響元件的摻質分佈所發展出來的熱製程技術。

熱爐管在半導體製程上的應用很廣，但由於其操作溫度幾乎都超過八、九百度以上，所以極易影響元件的摻質分佈。為了解決這個問題，發展出了 RTP 製程。RTP 與熱爐管最大的差別在於 RTP 每次只處理一片晶片，而熱爐管每次則處理上百片，但這並不表示 RTP 的產能會比較慢，因為 RTP 能夠在十數秒內將溫度加至製程所需要的程度且在數秒內又可降回原來的溫度。亦正因為如此，所以可以將元件的摻質分佈的影響降至最低 (因為摻質的擴散除了與溫度有關之外，時間亦是另一重要影響參數)。RTP 還有一項優點，那就是其所需的热量預算 (Thermal Budgets) 較低。

然而 RTP 所需解決最大的問題乃是怎麼讓晶圓的溫度在急遽上升過程中保持均勻。因為若在晶圓上的

溫度分佈不均勻，則一些沈積的厚度亦會不均勻。例如在化學氣相沈積 (Chemical Vapor Deposition, 簡稱 CVD) 中，其反應機制決定於反應溫度，若溫度分佈不均勻則會引起反應速率不一，因而造成不同厚度的薄膜沈積，進而為製程帶來極大困擾。另一方面，若溫度不均勻則亦會產生熱應力的問題，如此不僅會造成晶格滑動的現象，甚至晶圓可能會因此變形扭曲而毀損晶圓。在 RTP 中燈源的擺設位置非常重要，因為加熱燈源的擺設會影響進入晶圓的熱通量均勻性，進而影響溫度的均勻與否。

本篇文章的另一目的是設計在 LPCVD 製程的輻射加熱系統的改進。首先我們設計一套實驗來量測 LPCVD 製程的加熱燈源它的放射頻譜。然後我們利用光線追蹤法計算晶圓的輻射熱性質，得到它的吸收頻譜。接下來將鹵素燈泡的輻射頻譜乘以每個波長的吸收率，將所得到的結果積分起來便是晶圓的吸收總能量。如果我們能把每個溫度下晶圓的吸收能量都求出來，對於晶圓升溫的情況便能更了解而適當地加以控制。

三、研究方法

在數值模擬部份，乃是利用熱傳導理論以及有限差分的數值方法來將晶圓受熱的情形將其分析出來。詳細說明即是利用 line by line 的方式將熱傳導的統御方程式配合輻射邊界理論而將晶圓的溫度場求解出來。並將求解出來的溫度場代入應力方程式將應力場求解出來，其中應力場的模式本文根據晶圓的幾何形狀而採用平面應力的假設。

在實驗部份，關於 LPCVD 製程中加熱燈源放射頻譜的量測原理是加熱燈源的光經過單光儀後將各個波長的光強度辨別出來，然後經由偵測器量出它的強度。不過偵測器量測到的數值並不是它的放射率，而是加熱燈源放出的光經由分光柵分光後，再經由偵測器將光的信號轉變成電壓信號的結果。因此，這個偵測器量到的信號對波長的頻譜是加熱燈源的放射頻譜和分光柵的效率頻譜及偵測器的響應頻譜加成的

的結果。所以，我們要求得加熱燈源的放射頻譜，必需由偵測器量到的信號對波長的頻譜一步步反推回去。

四、結果與討論

一般在半導體製程中，晶片的厚度與半徑比大約是 1:100 相當地薄，所以當只要晶片一受到燈泡的加熱效果時，便會很快的傳入晶片底部。故基本上晶片在任一瞬間於軸向方向(z 方向)的溫度變化不大。

由於晶圓在 RTP 中會被加熱至極高的溫度，所以晶圓會以溫度的四次方曲線將熱量由表面放出，在如此高溫之下單位面積所放射出的能量相當大。再加上一般 RTP 爐原始設計乃是由晶圓上下加熱，而加熱在圓週側面處的表面之量自然相當地少，所以雖然晶片相當薄，但其所造成在徑向方向的溫差亦不小。這些溫差量便足以造成沈積厚度的不均勻和熱應力的產生。基於這個原因，所以本文探討了邊緣散熱對晶圓溫度分佈的影響。為了突顯邊緣效應的影響，本文先從均勻輻射的加熱曲線討論起。在晶圓開始受熱不久，如圖 1 所示，邊緣效應的影響尚未出現且整個晶圓幾乎處於等溫的狀況下。隨著加熱時間拉長，邊緣效應增大，使愈靠近圓週處的溫差愈大。圖 1 為 8 吋晶圓上下表面受均勻輻射加熱 $Q=700$ 之邊緣與中心的暫態溫差分佈圖。從圖中可以看到邊緣效應隨著時間溫度的增加而有愈來愈明顯的趨勢且甚至影響至 $r=7$ cm 處，而邊緣與晶圓中心溫差則達到 15 K 左右。所以若只讓燈源的輻射曲線均勻的話並不能使晶圓溫度分佈均勻，而由圖中可以輕易的判斷若欲將圓週處的溫度提昇，最好就是能在晶圓四周增添輻射量或減少晶圓週處的熱損失。

當得知溫度分佈之後即可求得徑向應力與環向應力。而後便可求得晶圓在每個暫態過程中的最大剪應力值，再得知晶圓於各溫度下的剪切屈服應力，則可利用 Tresca 屈服法則將晶圓塑性變形的情形求出。由圖 2 可知 8 吋晶圓在均勻輻射加熱之情況下，最大剪應力與剪切屈服應力的比值。在晶圓已達塑性變形的區域，即使將溫度不均勻性消弭，亦會留下殘餘應力，亦即在此處晶圓已不可利用了。如此晶圓的可用面積便減少了，對產能有相當的影響。由圖形亦可發現不管在任何半徑處，此比值皆隨時間之增長而加大，且知晶圓必定先從邊緣處開始塑性變形。而圖 3 即是顯示 8 吋晶圓在 $T=1170$ K 左右的溫度下開始由邊緣產生塑性變形。

由前中可知即使均勻輻射加熱亦無法使得晶圓在各暫態溫度下有較佳的溫度均勻性。所以本文為達均勻溫度分佈之目的，便希望求得較佳的輻射加熱曲線，以供 RTP 爐管設計者之參考。由圖 1 的暫態溫差分佈圖可大致瞭解，若欲消弭邊緣效應，則需在靠近晶圓邊緣處加強熱通量，且此一較佳的熱通量必須隨時間的增長而更加重其份量，因為溫差乃是隨時間增加而逐漸加大。需再注意的一點是，在相同的時差下，在剛開始加熱時的溫差變化速度較慢，經過一小段時間後，溫差變化速度便提升，而快達穩態時，溫差變化速度又降了下來。所以若欲消除邊緣效應，則近邊緣處的熱輻射量需依此一現象作調整。亦即在剛開始加熱時邊緣熱通量所加的量要小且需緩緩加重其份量，過一段時間後進而漸

漸增快。而在快達穩態時所加的份量較重且在短時間內加重的速度需減緩。依上所述的原則，所以本文在邊緣處以熱脈衝為加重熱通量的形式，且此熱脈衝份量因時間而作調整。再配合上本文希望在暫態過程溫差不超出 2 度，且為求函數簡化起見，所以本文在晶圓邊緣與中心溫差達 1.9 度時才開始將熱脈衝通量加入。此時可發現若將 1.9 度以下的曲線切除的話，曲線大致成二次曲線形式。而在強度方面，採取的強度比重大致為邊緣比中心約加強 1.01 倍至 1.34 倍左右。所以本文所建立的均溫輻射熱通量如下式所示，以下就此一均溫模式加熱型態來做晶圓之溫度與應力行為的分析。

$$Q = Q_0 \quad 0 \leq r < 9.7$$
$$Q = Q_0 \left[1 - \frac{0.008}{t_s^2} (t - t_s)^2 + 0.008 \right], 9.7 \leq r < 9.95$$
$$Q = Q_0 \left[1 - \frac{0.34}{t_s^2} (t - t_s)^2 + 0.34 \right], 9.95 \leq r \leq 10$$

圖 4 為均溫模式熱通量加熱的暫態溫差分佈圖。圖中亦可看出溫差震盪處乃在邊緣處，且整個晶圓溫差大小已由均勻輻射加熱時的 16 度降為不到 2 度。所以不僅此一均溫模式熱通量加熱可達到製程上溫差不超出 2 度的要求且由圖亦知其亦達到每單位徑向長度之溫差不可大於 10 度的要求，因為若每單位徑向長度之溫差大於 10 度將會產生晶格滑動。由於最後的穩態溫度即為製程所需的溫度，所以最好在穩態溫度時整體晶圓的溫差不超過要求，通常在 2 至數度之間，而以此種均溫模式加熱而言，在穩態時之溫度震盪不超出 0.5 度，可說相當符合製程所需之要求。既然在溫度方面均溫性相當不錯，則引起的熱應力必定會小許多，以下就來看看因溫差是否會造成塑性變形。

圖 5 便是在此均溫模式加熱下的最大剪應力與剪切屈服應力之比值。由圖中可明顯看出，由於溫差不大所以最大剪應力與剪切屈服應力之比值最大亦不過於 0.1，所以在全程加熱過程晶圓並不會產生塑性變形的狀況。

所以本文所提供之均溫模式輻射加熱無論在溫度的均勻性方面、單位徑向長度溫差或在應力的要求方面皆可在不使晶圓受到損傷的前提下符合製程的要求。若設計者可依據本文所提供的均溫模式曲線設計出一套燈源系統或以其他方式使至晶圓上方的熱輻射通量可為此一曲線，則想必在晶圓溫度的均勻性方面應該可得到良好的結果。

經由這套儀器量測到的加熱燈源的放射頻譜的正確與否，必須要做驗證的工作。目前已知黑體在某固定溫度下有其一定的放射頻譜。由這個方程式得到的放射頻譜圖，與拿實際的黑體去量測所得到的結果做比較。如果兩者結果是相同的則可驗證出這套設備是正確的，既而推知我們量測的加熱燈源放射頻譜也是正確的。圖 6 是本實驗用 InfraRed 公司所出產的黑體量測了溫度在 800K, 900K, 和 1000K 時的黑體輻射頻譜與由蒲朗克定律所求得的不同溫度下黑體輻射頻譜圖做比較，所得到的趨勢是相同的。隨著溫度的增高皆會有曲線變得陡峭與強度的最大值往低波長方向移動的現象。至於在 2700nm 及 4300nm 所出現的陡降是由於空氣中的水汽及二氧化碳吸收在這個波段下的紅外光。

圖 7 是本實驗所量測的在三個不同電壓時鹵素鎢絲燈泡的輻射頻譜圖，可以發現三者是極為類似的。他們的不同點是在他們放射強度的大小隨電壓的增強而變大。但是他們的相對輻射頻譜並沒有改變的現象。吾人得到的推理是鎢絲放光的溫度是固定的，並不會隨著電壓的增強而改變。它的輻射強度的最大值大約在 2000nm 左右。至於鹵素燈泡輻射頻譜為何沒有如量測黑體時所出現的明顯的二氧化碳及水汽的吸收紅外光的情形，這是因為本實驗所量測的鹵素燈泡功率相當高，約為 1000W，所以水汽及二氧化碳所吸收的紅外光相較之下就微不足道了。因此在輻射頻譜上沒有明顯表現出來。

圖 8 是假設晶圓的厚度為 0.725mm，利用光線追蹤法所求得的晶圓的吸收頻譜圖。在這個波段下，吸收率是自由載子的函數，這個結果導致輻射波長在這個範圍下有可能穿透晶圓。換言之，在晶圓低溫時(小於 700°C)，對於 1.2 μm 到 6 μm 之輻射波段都是部份透明的。至於大於 700°C 時，其放射率不隨波長而改變，可視為灰體。

接下來將鹵素燈泡的輻射頻譜乘以每個波長的吸收率，將所得的結果積分起來便是晶圓的吸收總能量。如果我們能把每個溫度下晶圓的吸收能量都求出來，對於晶圓升溫的情況便能更了解而適當地加以控制。

五、參考文獻

1. F. Y. Sorrell, M. J. Fordham, M. C. Ozturk, and J. J. Wortman, "Temperature uniformity in RTP furnaces," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.39, No.1, 1992.
2. N. Akiyama, Y. Inoue and T. Suzuki, "Critical radial temperature gradient inducing slip dislocations in silicon epitaxy using dual heating of the two surfaces of a wafer," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol.25, No.11, pp.1619-1622., 1986.
3. R. B. Fair, *Rapid Thermal Processing*, Academic Press, New York, 1993.
4. H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, Vol.1, No.3, pp.105-114, 1988.
5. R. Henda, E. Scheid and D. Bielle-Daspert, "A 3-dimensional temperature uniformity model for a rapid thermal processing furnace," *MRS Proc.*, Vol.342, pp.419-424, 1994.
6. R. Deaton and H. Z. Massoud, "Effect of thermally induced stresses on the rapid-thermal oxidation of silicon," *J. Appl. Phys.*, Vol.70, No.7, 1991.
7. R. Kakoschke, E. Bubmann and H. Foll, "Modelling of wafer heating during rapid thermal processing," *Appl. Phys. A*, Vol.50, pp.141-150, 1990.
8. R. Kakoschke and E. Bubmann, "Simulation of temperature effects during rapid thermal processing," *MRS Proc.*, Vol.146, pp.473-482, 1989.
9. R. H. Perkins, T. J. Riley, and R. S. Gyurcsik, "Thermal uniformity and stress minimization during rapid thermal processes," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, Vol.8, No.3, 1995.
10. K. Morizane and P. S. Gleim, "Thermal stress and plastic deformation of thin silicon slices," *J. Appl. Phys.*, pp.4104-4107, 1969.
11. V. E. Borisenko and P. J. Hesketh, *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*, Plenum Press, New York, 1997.
12. G. Bentini, L. Corraera, and C. Donolato, "Defects introduced in silicon wafers during rapid isothermal annealing: Thermoelastic and thermoplastic effects," *J. Appl. Phys.*, Vol.56, No.10, pp. 2922-2929, 1984.
13. R. S. Gyurcsik, T. J. Riley and F. Y. Sorrell, "A Model for Rapid Thermal Processing: Achieving Uniformity Through Lamp Control," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.4, No.1, pp.9-13, 1991..
14. T. Sato, "Spectral Emissivity of Silicon," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.6, pp. 339-347, 1967.
15. P. Y. Wong and I. N. Miaoulis, "Thermal Radiation Absorption Characteristics of Patterened Wafer During Rapid Thermal Processing," *MRS Proc.*, Vol. 342, pp.395-400, 1994.
16. N. M. Ravindra and F. M. Tong, "Temperature Dependence Emissivity Measurement of Si, SiO₂/Si and HgCdTe," *MRS Proc.*, Vol. 342, pp. 431-436, 1994.
17. H. Xu and J. C. Sturm, "Emissivity of Rough Silicon Surfaces: Measurement and Calculations," *MRS Proc.*, Vol. 387, pp. 29-34, 1995.
18. P. Y. Wong, I. N. Miaoulis and C. G. Madras, "Transient and Spatial Radiative Properties of Patterened Wafer During Rapid Thermal Processing," *MRS Proc.*, Vol. 387, pp.15-20, 1995.
19. P. J. Timans, "The Role of Thermal Radiative Properties of Semiconductor Wafer in Rapid Thermal Processing," *MRS Proc.*, Vol. 429, pp.3-14, 1996.
20. P. Y. Wong, C. K. Hess and I. N. Miaoulis, "Thermal Radiative Modeling in Multilayer Thin Film Structures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No 12, pp. 3313-3321, 1992.
21. M. F. Modest, "Radiative Heat Transfer," New York:Mc Graw-Hill, 1993.
22. 林育才和黃新員, "熱輻射在高速熱處理中對晶圓溫度之影響," 機械工程學會第 14 屆全國學術研討會論文集, 1997.
23. 莊達人, "VLSI 製造技術," 高立出版社, 台北, 1996.

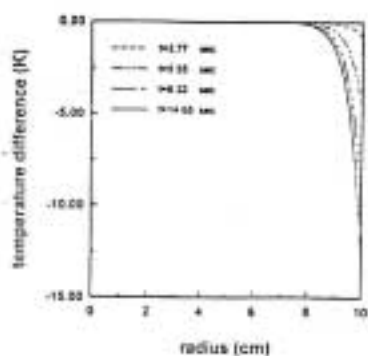


圖 1 不同頻率之不同極化模式 Q=190 之溫度差分布情形

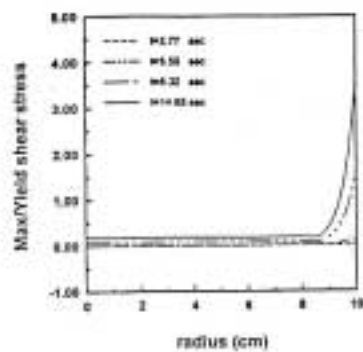


圖 2 不同頻率之不同極化模式 Q=190 之最大應力與屈服應力之分布情形

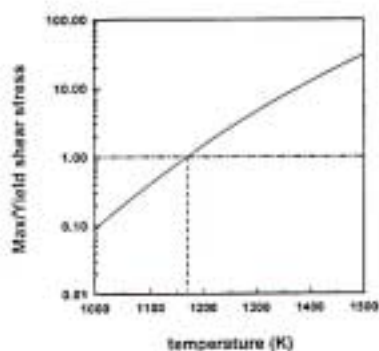


圖 3 不同溫度之最大應力與屈服應力之比之溫度分布情形

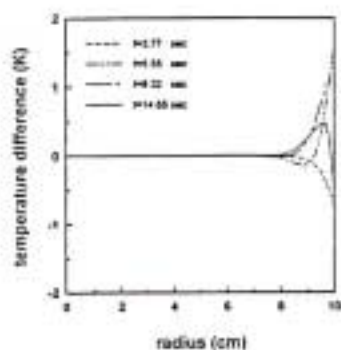


圖 4 不同溫度之不同極化模式之溫度差分布情形

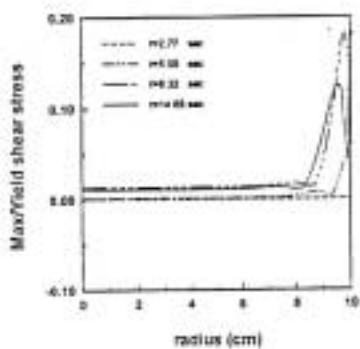


圖 5 不同溫度之不同極化模式之最大應力與屈服應力之分布情形

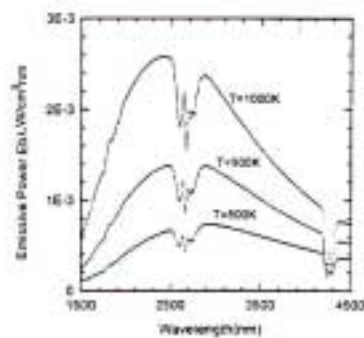


圖 6 溫度為 800K、900K、1000K 時之輻射功率之輻射情形

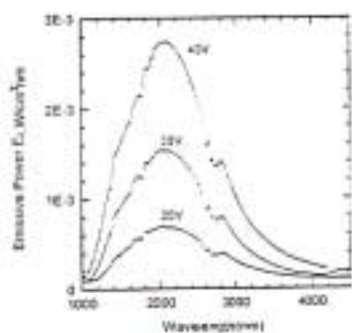


圖 7 電壓分別為 20V、30V、40V 時之輻射情形

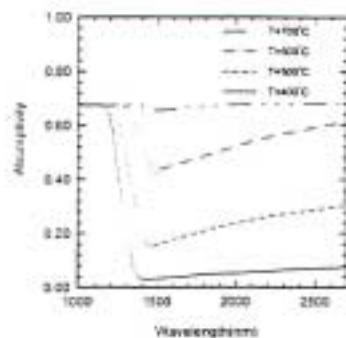


圖 8 溫度為 1000C、1100C、1200C、1300C 時之吸收率情形

