

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

增強照射均勻度的快熱製程機台反射體之製作與可靠度測  
試

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2622-E-002-023-CC3

執行期間：92年06月01日至93年05月31日

執行單位：國立臺灣大學電子工程學研究所

計畫主持人：劉致為

計畫參與人員：余承曄(博士生)，廖洺漢(碩士生)

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 22 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

增強照射均勻度的快熱製程機台反射體之製作與可靠度測試

**Fabrication and Reliability test of Uniformity-Enhanced Reflector in Rapid Thermal Process**

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2622-E-002-023-CC3

執行期間：92 年 6 月 1 日至 93 年 5 月 31 日

計畫主持人：劉致為 教授

計畫參與人員：余承擘(博士生)，廖洺漢(碩士生)

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學電子工程學研究所

中 華 民 國 93 年 8 月 30 日

## 一、中文摘要：

傳統半導體製程使用之加熱爐由於升溫及降溫速度慢，所以製程時間長。快速熱製程機台升溫及降溫速度快，可以大幅縮短製程時間。快速熱製程機台內的反射體對於溫度均勻度有相當大的影響，反射體為消耗品，有其使用壽命。我們自行計算模擬並進行製程測試實驗，製作出 SD 標準差較佳之快速熱製程新型多平面反射體，受限於反射體內部需預留水路，僅可製作出約 1.5cm 之平面差距，使得補償差別未能有效顯示出來。

**關鍵字：**快速熱製程、反射體、均勻度

## 英文摘要：

Traditional furnace has long processing time, because of slow rate in rising or lowering temperature. RTP (Rapid thermal Process) can shorten much processing time, due to fast temperature-rising or temperature-lowering rate. The reflector in RTP has a lot of influence on temperature uniformity. Reflector is expendable and has some lifetime. We ourselves have simulated and experimented. We can make reflector which quality is as good as made by Jet.

**Keywords:** RTP (Rapid thermal Process), reflector, uniformity

## 二、前言

傳統半導體製程設備為加熱爐，由於是使用電阻式加熱方式，所以升溫以及冷卻速度慢，每秒鐘僅上升或下降 1°C 以下，而快速熱製程機台由於是使用燈管以輻射加熱方式加熱，可以快速升溫以及冷卻，每秒鐘可以上升或下降高達 10~200°C。也因此傳統電阻式加熱爐所需要的製程時間比較長，每一個製程步驟通常為 30 分鐘~2 小時，而快速熱製程機台每一個製程步驟快則僅需要 10 秒鐘~2 分鐘。傳統電阻式加熱爐為多片晶圓同時進行製程，加熱爐管長，內部環境不易控制，當進行完一階段制程步驟後，如成長氧化層，接著進行退火前，必須先把加熱爐管內的氧氣排出，需要較長的時間來進行清除。因此，完全未加工的晶圓到製成元件需要非常長的週期時間。

在快速熱製程機台中，利用燈管照射晶圓，快速升高晶圓溫度，為了要節省燈管的功率，在燈管一側都有反射體的設計，可經由反射體再反射到晶圓，為了增加輻射的均勻度，有六角形點燈源陣列與環型燈管陣列的設計，但是至今大多數廠商於由專利與成本關係，皆使用直線型燈管，再加上分區控制來達成輻射均勻度的增加。

快速熱製程機台為單片晶圓製程，加熱腔體內部環境容易控制，而且快速熱製程機台可以與其他機台，如低壓化學氣象沉積 (LPCVD, low pressure chemical vapor deposition)，共同結合成集結式系統，在製程加工過程中不離開真空環境，利用機械手臂搬運至各個製程機台內進行製程加工，晶圓加工至元件完成的時間已大幅縮短。

### 三、研究目的

因我國半導體產業蓬勃發展，對於其設備又多仰賴美、日等他國進口，有鑑於此，政府正致力推展半導體上游產業，而我國於設備方面的專利亦是相當稀少，故若本計劃能完成，且在專利的保護下，將可增加國內半導體工業的競爭力。對於此反射體製作，與肯昇公司合作，嘗試將此專利技術具體的將商品製作出來，學生可受此訓練，將來為我國半導體設備技術將有所助益。

以前半導體晶圓較小，面積也較小，所以製程過程中，晶圓的溫度均勻度較易控制。現在半導體晶圓越來越大，已經至 12 吋，製程過程中，晶圓溫度均勻度控制不易，往往只能維持中央面積部分的溫度均勻度，而晶圓圓周面積部分，溫度均勻度較難維持，溫度易偏低。研究僅改變反射體，而能增加整片晶圓的溫度均勻度。

大多數快熱製程設備的廠商均在美、日，其輻射均勻之設計多為利用多區控制，而本計劃是利用平面反射體增加線性燈管的輻射均勻度。而 80% 以上之美、日廠商多用線性燈管，此反射體結構，成本低，製作容易，與現有多數商用機台相容，在與廠商將其具體化後，必迫使國外大廠要求授權或加強合作，增加國內半導體製程設備的自製能力。

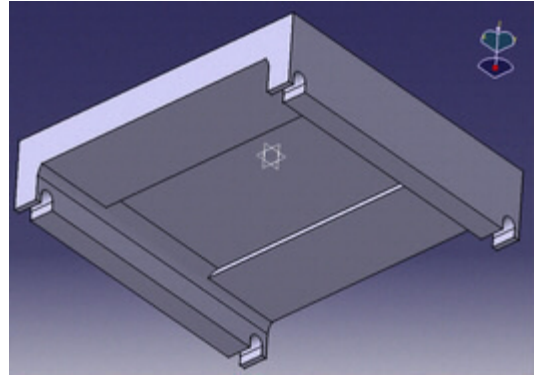
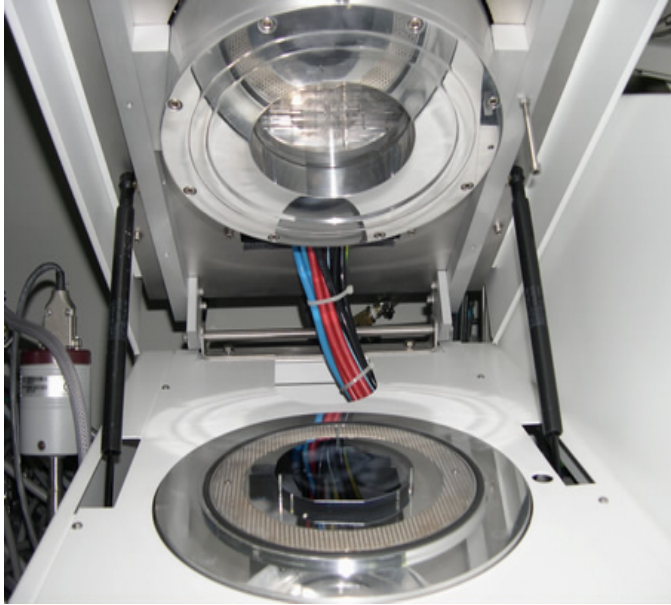
### 四、文獻探討

1. 快熱製程中，利用高功率燈管照射晶圓，使晶圓溫度快速升高。為使燈管在晶圓上的輻射均勻，有用多環圓形燈管（CVC product, 美國）或是利用六角形點燈源（Applied Materials, 美國）加熱，加上多區（multi-zone）控制以達到均勻溫度的目的。但大多廠商如 ASM, A.G. associate ... 多用線性燈管陣列，以降低成本及專利授權問題。
2. 如 ASM 的 Epsilon RTP 機台，因使用上下二組的線性燈管，只好用熱耦極測量溫度；而 Applied Materials 的 centura RTP 機台，則是使用六角形點單面燈源加熱，使輻射均勻，又不影響在晶圓另一面 pyrometer（波長為  $0.93\mu\text{m}$ ）之溫測，使得溫測精確度大幅提高（誤差約為  $2^{\circ}\text{C}$ ）。

### 五、研究方法

#### 反射體

在反射體反射面上加以鍍金以增加反射率，再將我們現有的快熱處理機台加以改裝，並測試之，將以成長快熱氧化層，用橢圓測厚儀量測其氧化層厚度，將其厚度繪圖，分析其氧化層均勻度，並與原廠反射體作比較。燈管平行排列，位於晶圓正上方 2 公分處。反射體位於平行燈管上方 2 公分處，即位於晶圓正上方 4 公分處。



圖一 (a) 快熱製程機台。(b) 新型多平面反射體。

模擬：

假設  $I$  為點光源能量強度 ( $W$ )，對於距離  $r$  ( $cm$ ) 的輻射強度為  $\phi = \frac{I}{4\pi r^2} \left( \frac{W}{cm^2} \right)$

光源為線性燈管， $I$  可以改寫為  $I = I_1 \cdot dx$ ， $I_1$  為每單位長度之強度 ( $\frac{W}{cm}$ )

由圖二-1(a)及(b)，點  $P_w$  的強度  $\phi \left( \frac{W}{cm^2} \right)$  可由三角函數關係式  $\cos \alpha = \frac{d}{r}$  及  $\cos \theta_w = \frac{h}{d}$  推導出

$$\begin{aligned} d\phi &= \frac{I_1 \cdot dx}{4\pi r^2} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \theta_w \\ &= \frac{I_1 \cdot dx}{4\pi r^2} \cdot \frac{d}{r} \cdot \frac{h}{d} \end{aligned} \quad (2-1)$$

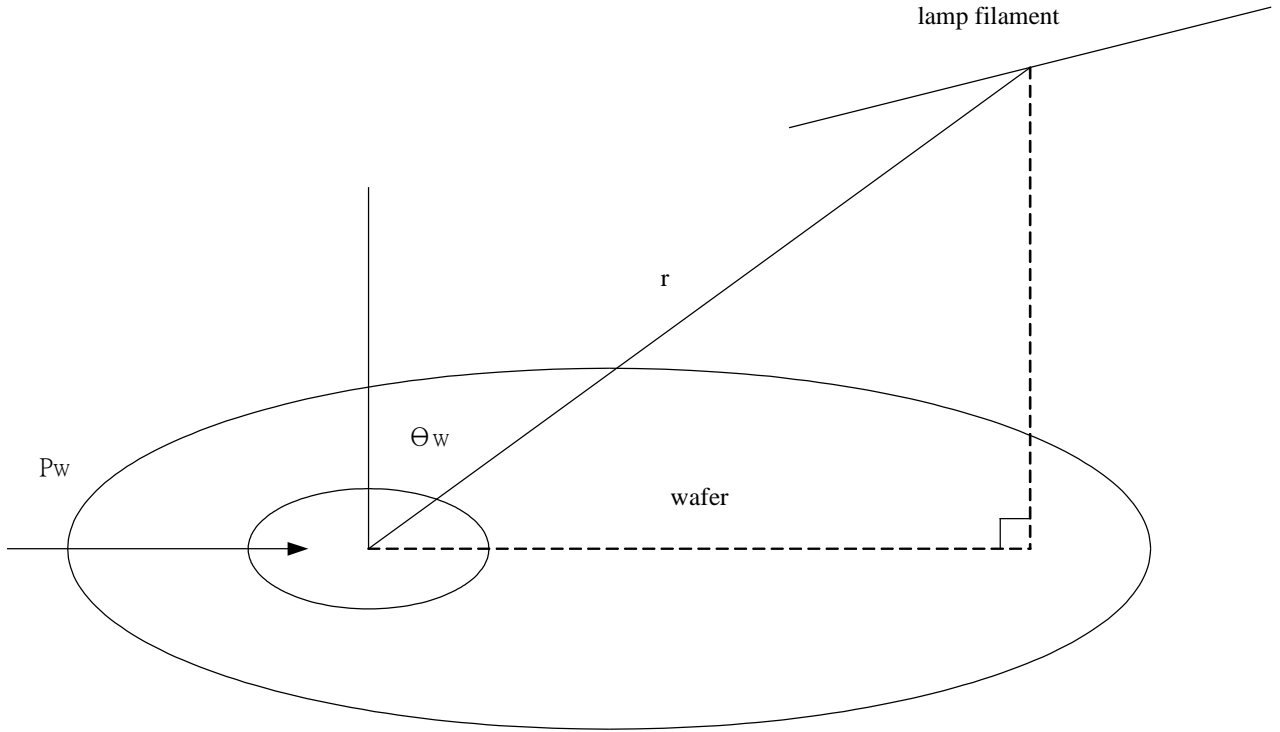
圖二-1(a)及(b)， $\theta_w$  為垂直方向與直線交於晶圓上點  $P_w$  之間的角度， $d$  及  $h$  為  $P_w$  與燈管的距離。由圖二-1(b)可知， $r \cdot \cos \alpha = d$  及  $x = d \cdot \tan \alpha$ ，可以推導出  $dx = d \cdot \sec^2 \alpha d\alpha$ 。方程式 2-1 可改寫為：

$$\begin{aligned} d\phi &= \frac{I_1 \cdot h \cdot d \sec^2 \alpha \cdot \cos^3 \alpha}{4\pi \cdot d^3} d\alpha \\ &= \frac{I_1 \cdot h}{4\pi \cdot d^2} \cos \alpha d\alpha \end{aligned} \quad (2-2)$$

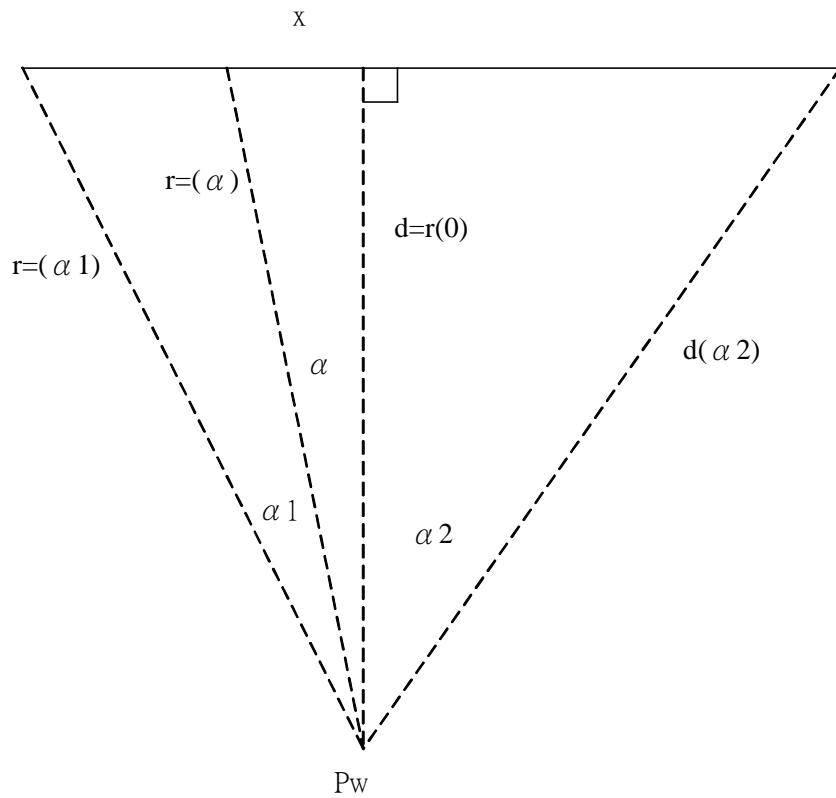
因此，由整個燈管所貢獻的輻射能量  $\phi$  可以經由積分得到：

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{I_1 \cdot h}{4\pi \cdot d^2} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_2} \cos \alpha d\alpha \\ &= \frac{I_1 \cdot h}{4\pi \cdot d^2} [\sin(\alpha_2) - \sin(-\alpha_1)] \end{aligned}$$

此處， $\alpha_1$  及  $\alpha_2$  於圖二-1(b)有定義。

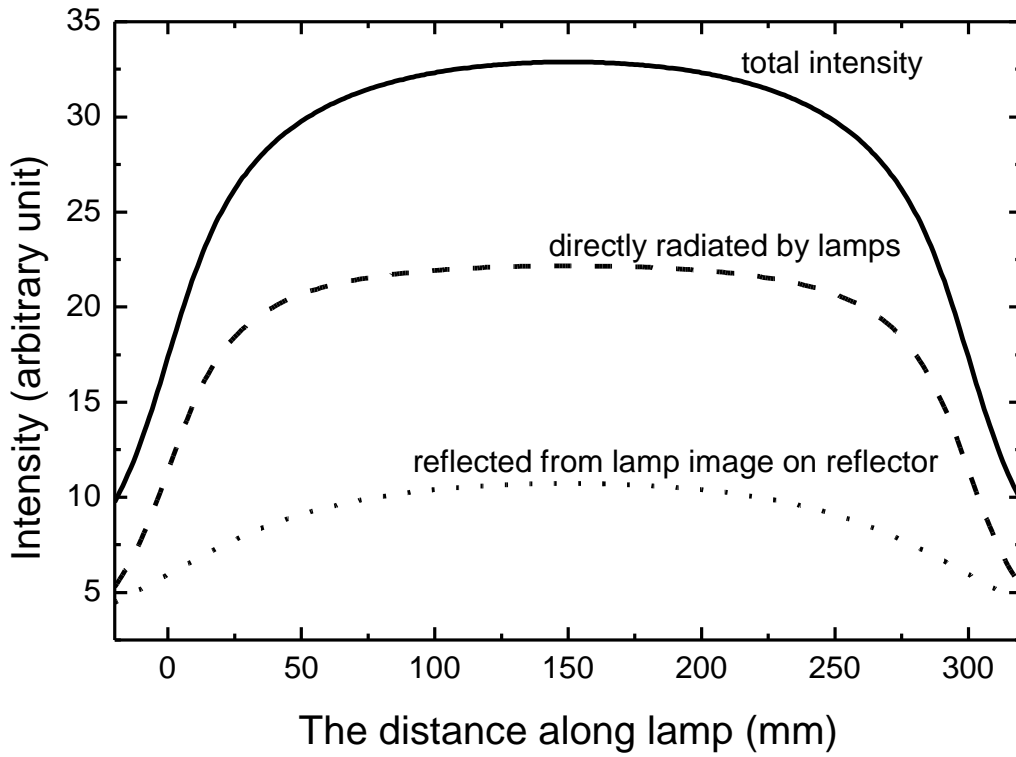


圖二-1(a) 顯示燈管及晶圓的配置示意圖



圖二-1(b) 顯示燈管及點Pw所構成平面的示意圖

由於 RTP 系統中的燈管陣列，藉由重疊原理，輻射能量可寫為下式：



$$\phi = \sum_{n=1}^{\text{numberoflamps}} \frac{I_1 \cdot h}{4\pi \cdot r(n)^2} [\sin(\alpha_2(n)) - \sin(-\alpha_1(n))] \quad (2-3)$$

圖三為模擬結果，圖中虛線為燈管直接輻射照射晶圓即為方程式 2-3 之模擬。燈管未直接照射晶圓那一端有反射體，會於反射體上方形成燈管虛像，燈管能量經由反射體反射後照射於晶圓上，即為圖中點線。圖中實線為全部能量總合，即燈管直接照射晶圓能量加上經由反射體反射後照射晶圓能量。

## 六、結果與討論

實驗依照業界認定之標準程序。材料為使用 P-100 的 4 吋矽晶圓，先用以去離子水稀釋至濃度 1% 以下之氫氟酸 (HF) 浸泡 100 秒，再用以去離子水沖洗 5 分鐘，高純氮氣槍吹乾。氫氟酸為中強酸，易解離出氫離子，晶圓浸泡於氫氟酸中，不僅可以去除晶圓表面的本生氧化層，得到一個清潔的晶圓表面。經氫氟酸浸泡過後的晶圓，氫離子會與晶圓表面的矽產生鍵結，於晶圓表面形成一層氫離子保護層，當晶圓暴露在空氣中時，可以保護晶圓表面避免氧化，使得晶圓表面的氧濃度每平方公分面積僅有  $1E13$  個氧原子，有相當高的抗氧化力。在一般大氣中，此氫離子保護層可以維持約 10 分鐘，如果在高等級的無塵室中，則可以維持更久。

經過氫氟酸浸泡後的晶圓，接著在無塵室環境中置入快速熱製程機台 (RTP) 的加熱腔中。根據論文以及研究報告，晶圓的溫度與氧化層的成長速度有極大的正相關，因此，選擇以在晶圓表面成長氧化層，測量氧化層成長速度的均勻度，作為晶圓溫度控制是否均勻的依據，也是測試反射體效能的一項重要指標。

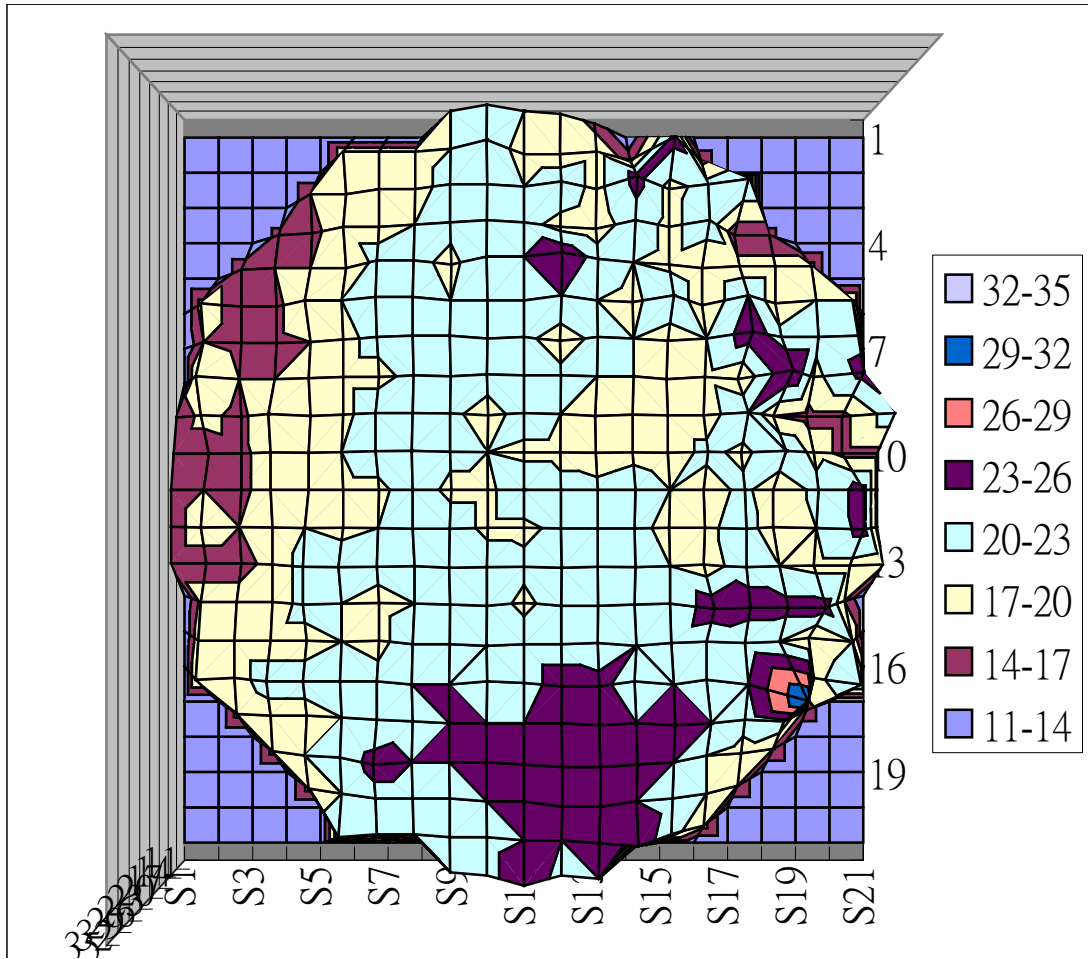
氧化層成長程序為先氧化再退火。晶圓置入快速熱製程機台後，快速升溫至  $700^{\circ}\text{C}$ ，通入氧氣成長氧化層 10 分鐘，氧氣體積流量為每分鐘 1000 標準立方公分 (sccm, standard cubic centimeters / minute)，接著再於  $700^{\circ}\text{C}$  通入氮氣退火 2 分鐘，氮氣氧氣體積流量為每分鐘 1000 標準立方公分。此退火效應稱為氧化後退火 (P.O.A, post-oxidation anneal)，氧化生長完後，於同溫度下，在氮氣或惰性氣體中進行退火，經氧化後退火的過程後，可以減少氧化層中的固定缺陷電荷。

晶圓氧化層成長並退火後，以橢圓測厚儀量測其氧化層厚度及均勻度。橢圓測厚儀原理為利用氧化層與矽之介電常數不同，照射紅外線後反射率不同，以及氧化層厚度不同，造成的偏極化大小不同等原理，計算推測出氧化層厚度。接著，僅拆下快速熱製程機台內部的原廠反射體，更換上 KH 製作的反射體，重複實驗。晶圓浸泡氫氟酸以清潔晶圓表面並形成清離子保護層，置入快速熱製程機台通入氧氣成長氧化層以及通入氮氣退火，再以橢圓測厚儀量測其氧化層厚度及均勻度。

下圖分別為 KH 新型多平面反射體之橢圓測厚儀量測結果以及 Jet 反射體之橢圓測厚儀量測結果。Ave 為平均值，Max 為最大值，Min 為最小值， $\sigma$  為標準差 (standard deviation, SD)。新型多平面反射體 SD 標準差為 2%，原廠單一平面反射體離均差為 3%。雖然新型多平面反射體 SD 標準差僅較單一平面反射體略為改善，這是由於新型多平面反射體為能符合該快熱製程機台，受限於反射體內部需預留水路，僅可製作出約 1.5cm 之平面差距，使得補償差別未能有效顯示出來。

若配合反射體內部水路改裝，能加大新型多平面反射體之平面落差，相信能大幅提升照射均勻度。

# NEW reflector

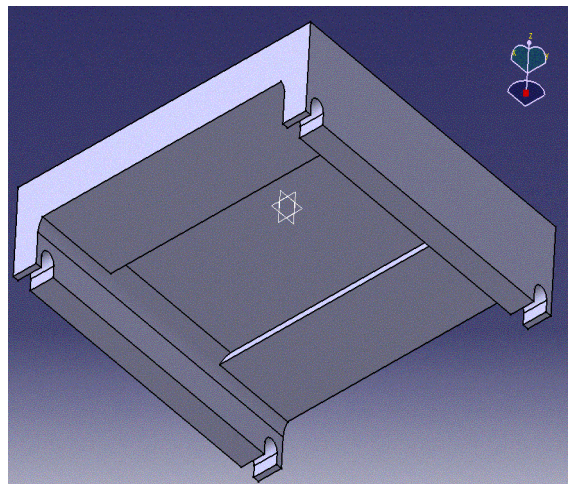


Ave: **20 Å**

Max: **32 Å**

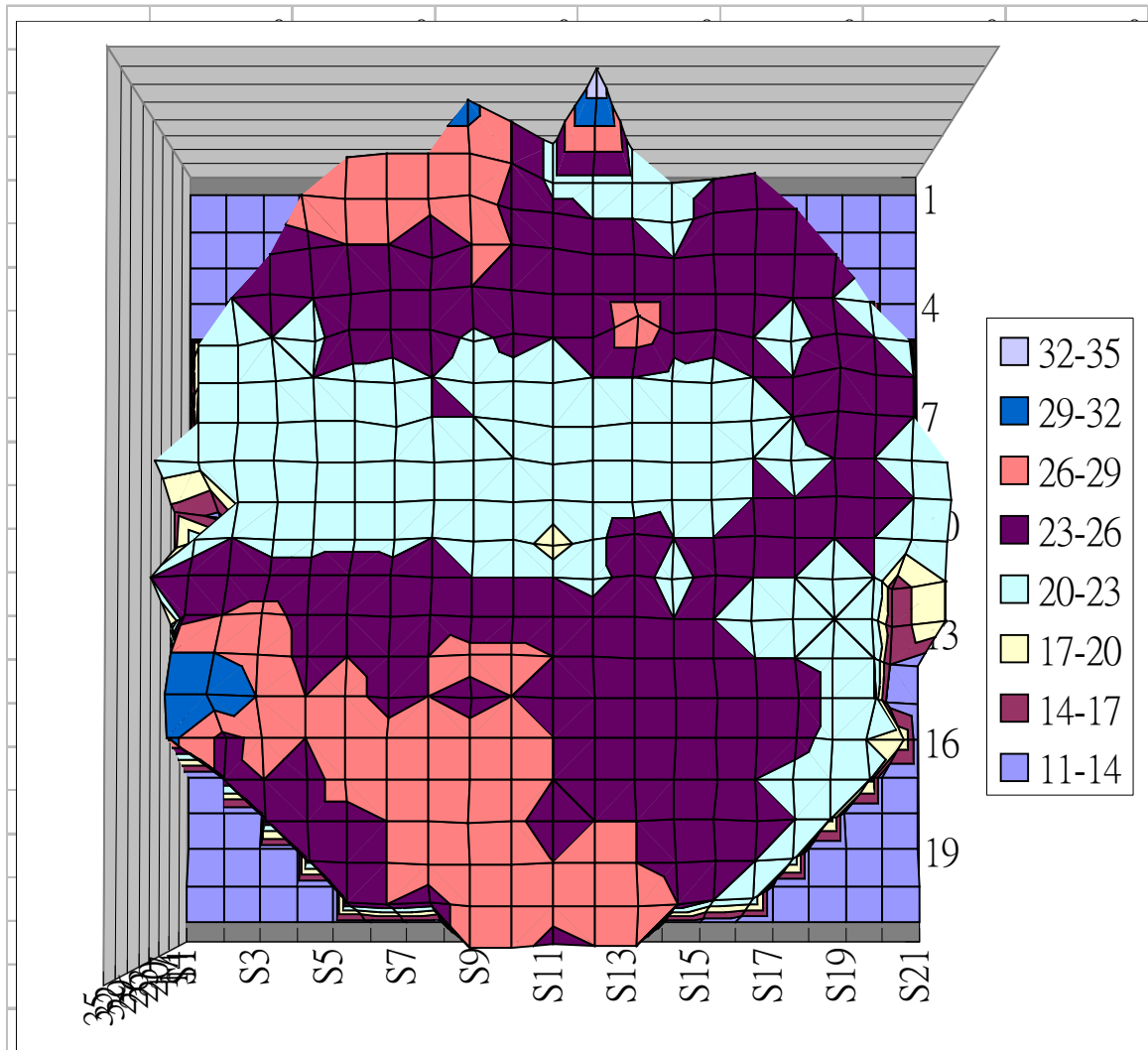
Min: **14 Å**

$\sigma$  : **2%**



圖四 KH 反射體之橢圓測厚儀量測結果

# Jet reflector

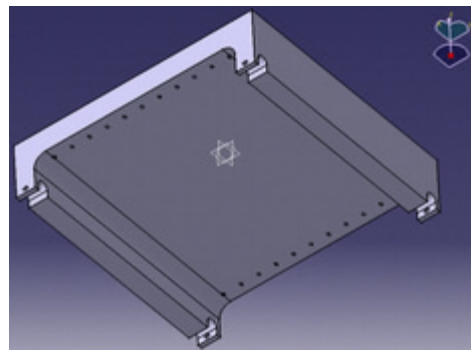


Ave: 23 Å

Max: 37 Å

Min: 13 Å

$\sigma$  : 3 %



圖五 Jet 反射體之橢圓測厚儀量測結果

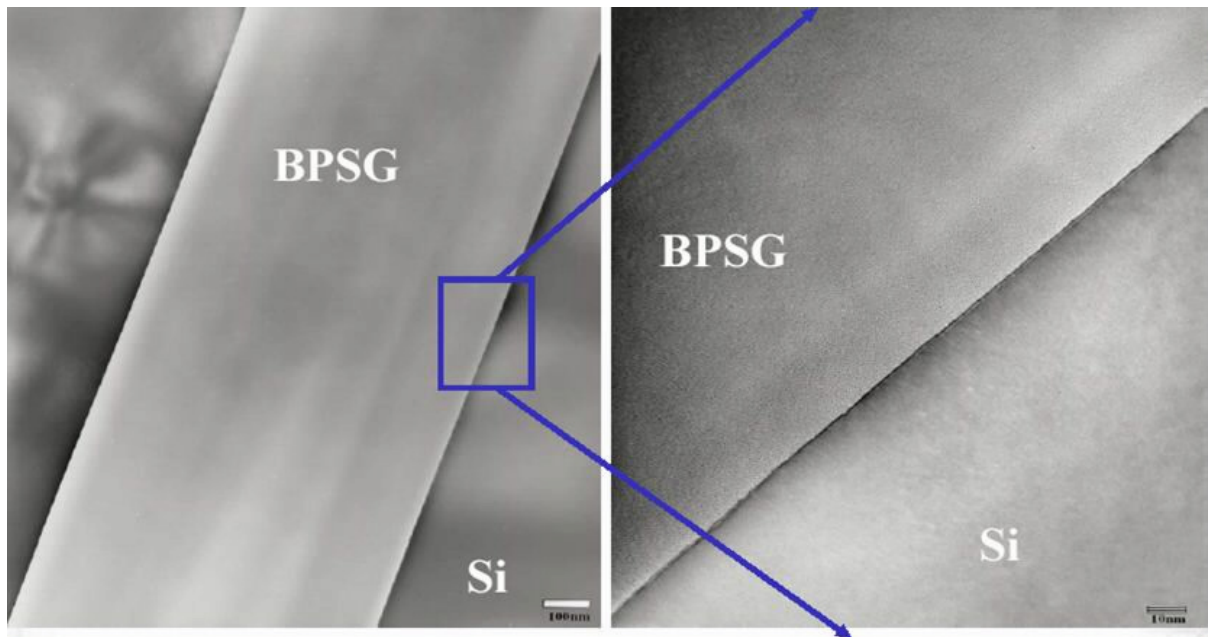
原廠反射體材質為鋁，KH 製作的反射體材質為不鏽鋼，可以更耐高溫，更不易損壞，使用壽命更長。對於 III-V 族晶圓，如砷化鎵 (GaAs) 而言，製程溫度約為 500~600°C，故快速熱製程機台的加熱腔以及反射體溫度為約 600°C 以上。對於矽晶圓而言，製程溫度需求往往高達 1000°C，甚至高至 1200°C。所以為了冷卻反射體，反射體內部有留空腔，製作成水流通道，可以通入冷卻循環水流，用以冷卻反射體。

最近我們利用快熱製程機台，改裝為燈管型晶圓鍵結機台，並由於反射體有效增加照射均勻度，使得晶圓鍵結成功率提升。隨著半導體製程逐步往 90 奈米世代前進，半導體廠商發現，過去一直進行製程微縮，藉由增加電晶體集積度，來提昇半導體效能與降低成本的方法，已受到嚴重的考驗。這是因為，高度積集的電晶體數量所帶來的漏電流(Leakage Current)造成功率消耗與熱量，將會抵銷由於製程微縮所帶來的效能提昇，而且有時並不見得符合經濟效益。晶圓直接鍵結製程技術由於可以在電晶體尺度微縮進度減緩，甚至遇到瓶頸的同時，提供功能性之擴張與效能之提升，因此在半導體產業應用上愈顯重要。如絕緣矽晶(SOI)技術。

利用快熱製程進行晶圓直接鍵結製程 (direct wafer bonding, or fusion bonding)，成功將矽晶圓與矽晶圓或矽晶圓與另一片原已覆蓋 BPSG 絕緣層之矽晶圓鍵結起來，其介面之 TEM 照片如圖四所示，接面完整無缺陷。經由實驗驗證，尋找最佳製程參數，及快速 bonding 方法以增加 throughput，並減少 bonding layer 的厚度。與其他晶圓以室溫或高溫爐管(Furnace)進行直接鍵結製程動輒數小時至數十小時製程相較，利用快熱製程進行晶圓直接鍵結，升溫過程僅需約 30 分鐘，大幅降低製程時間。



圖六 利用增強反射體照射均度設計之燈管型晶圓鍵結機台進行晶圓鍵結。



圖七 利用增強反射體照射均度設計之燈管型晶圓鍵結機台進行晶圓鍵結之介面TEM照片。

# 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利

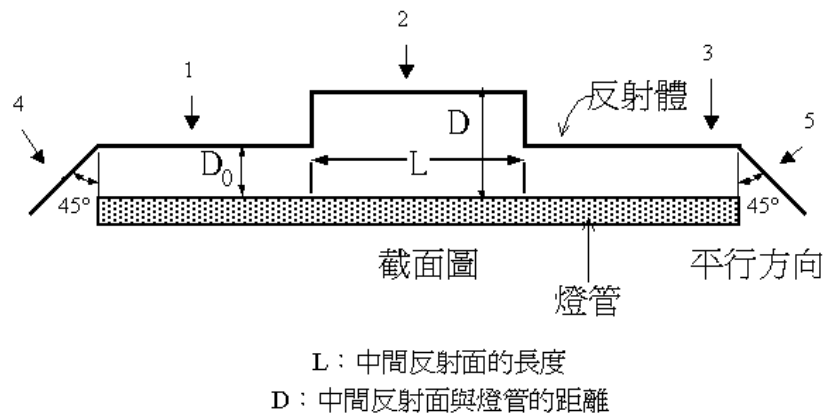
 可技術移轉

日期：93年8月25日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：增強照射均勻度的快熱製程機台反射體之製作與可靠度測試 計畫主持人：劉致為 計畫編號：92-2622-E-002-023-CC3 學門領域：
<b>技術/創作名稱</b>	可增進線性燈管均勻度之反射體構造
<b>發明人/創作人</b>	劉致為 李敏鴻
<b>技術說明</b>	中文： 在快速熱製程機台中，利用燈管照射晶圓，快速升高晶圓溫度，為了要節省燈管的功率，在燈管一側都有反射體的設計，使不在晶圓側的紅外光，可經由反射體再反射到晶圓。但是至今大多數廠商的反射體均僅使用平面反射體，並沒有設計反射體可同時增加燈管輻射的均勻度。本創作，針對線性燈管陣列，在平行於燈管方向，設計多平面反射體與燈管間的不同距離，補償燈管本身在平行方向上輻射的不勻度，並且在反射體兩端加上二個斜向反射面，以將燈管二頂端輻射反射回晶圓表面。設計上，較傳統的反射面，可增加64%的均勻度。 英文： In a rapid thermal processor, the lamp array is used to heat up the wafer placed on one side of the lamp arrays. To increase the irradiation efficiency, a reflector is placed on the other side of the lamp array to redirect light toward the wafers. In this work, a novel reflector is designed not only to increase lamp power efficiency, but also to improve the uniformity parallel to the lamp tube. The reflector has a variable distance between the lamp and reflector to compensate the non-uniformity of lamp irradiation along the lamp. Two edge reflectors are also designed on the reflector edge to redirect the edge emission light of lamp ends. The increase of 64% in irradiation uniformity has been achieved in a typical lamp configuration.
<b>可利用之產業及可開發之產品</b>	政府正在推動半導體制程設備計畫，而快速熱製程設備為12吋IC廠重要之cluster tool的加熱模組，本專利利用新型反射體設計，可增加線性燈管輻射的均勻度，成本低，製作容易，與現有多數商用機台相容，本專利的核準必迫使國外大廠要求授權或加強合作，增加國內半導體製程設備的自製能力。
<b>技術特點</b>	本創作是針對線性燈管陣列而設計。在平行燈管方向，因線性燈管的輻射強度在靠近邊緣較小，燈管中間較強，因此利用反射體的反射輻射來補償此效應。設計上，使反射體的中間反射面離燈管較遠，造成反射輻射較小，兩側反射面離燈管較近，以增加反射，並且在兩端加上斜向反射面，來反射燈管頂端的輻射，如此補償原燈管輻射的不均勻性，增加均勻區長度。

推廣及運用的價值

1. 一種用於快熱製程設備中，可增進線性燈管均勻度的反射體構造；反射體至少由五件反射面組成，包括一件中間反射面，（圖之 2），至少二件兩側反射面（圖之 1、3）和二件之兩端斜向反射面（圖之 4、5）共同組成；其特徵為中間反射面至燈管之距離大於兩側反射面至燈管之距離；中間反射面之兩邊與兩側反射面連接，兩端斜向反射面則分別連接於兩側反射面的外緣，兩端斜向反射面的角度為 45 度；反射面變化的方向是沿線性燈管平行的方向；當加熱燈管一面之輻射直接照射晶圓，而另一面的輻射則藉由反射體之反射，將輻射導引回晶圓，在反射的過程中，利用兩側反射面至燈管距離較中間反射面至燈管距離近，增加在兩側的反射輻射強度；在反射體的兩端，由成 45 度角的斜向反射面，將燈管端點的輻射，亦反射回晶圓，加強兩端的反射輻射，以補償直接輻射在二側較弱的輻射強度，增加均勻輻射區的長度。
2. 如申請專利範圍第 1 項的反射體構造，但其兩側反射面的數目，可增加為 4 件，或 4 件以上，每件兩側反射面與燈管之距離均可不同，以便更精密補償直接輻射強度的不均勻度。
3. 如申請專利範圍第 1 項的反射體構造，兩端斜向反射面的角度為 45 度，可有最佳化的補償，但角度亦可為任意角度；或省略兩端斜向反射面，而由中間反射面與兩側反射面組成次佳化的反射體。



4. 新型反射體的設計示意圖，燈管長度為 30 公分

- ※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。

附錄：本計畫相關之成果

(I)期刊論文

1. B. -C. Hsu, S. T. Chang, T. -C. Chen, P. -S. Kuo, P. S. Chen, and C. W. Liu, "A High Efficient 820 nm MOS Ge Quantum Dot Photodetector, " accepted by *IEEE Electron Device Lett.* 2003.
2. C.-H. Lin, F. Yuan, B.-C. Hsu, and C. W. Liu,"Isotope effect of hydrogen release in metal/oxide/n-silicon tunneling diodes," *Solid-State Electronics*, Vol. 47, pp. 1123-1126, 2003.
3. B. -C. Hsu, K. -F. Chen, C. -C. Lai, and C. W. Liu, "Oxide Roughness Effect on Tunneling Current of MOS Diodes," to be published in *IEEE Trans. Electron Device*, Dec. 2002.
4. B. -C. Hsu, W. -C. Hua, C. -R. Shie, K. -F. Chen, and C. W. Liu, "The Growth and Electrical Characteristics of Liquid Phase Deposition SiO<sub>2</sub> on Ge," *IEEE Electrochemical and Solid State Letters*, Vol. 6(2), F9-F11, 2003.
5. C. -H. Lin, F. Yuan, C.-R. Shie, K.-F. Chen, B.-C. Hsu, M. H. Lee, and C. W. Liu, "Roughness-Enhanced Reliability of MOS Tunneling Diodes," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 23, pp431-433, July 2002.
6. S. T. Chang, K. F. Chen, C. -R. Shie, C. W. Liu, M.-J. Chen, and C.-F. Lin, " The band-edge light emission from the metal-oxide-silicon tunneling diode on (110) substrates," *Solid State Electronics*, Vol. 46, no. 8, pp1113-1116, Aug., 2002.

(II)學術會議論文

1. (Invited) B.-C. Hsu, Z. Pei, S. T. Chang, P. S. Kuo, P. S. Chen, and C. W. Liu, " Si-based Optoelectronics," Symposium on nano device technology (SNDT), pp. 1-4, 2003.
2. M. H. Lee, P. S. Chen, Y. T. Tseng, Y. M. Hsu, S. W. Lee, J. -Y. Wei, C. -Y. Yu, and C. W. Liu, " Performance enhancement in strained-Si NMOSFETs on SiGe virtual substrate," Symposium on nano device technology (SNDT), pp. 28-31, 2003.
3. S. W. Lee, P. S. Chen, L. J. Chen, C. W. Liu, "The growth of high-quality uniform SiGe films by introducing an intermediate Si layer", International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), San Diego, California, 2003, P.78.
4. (Invited) C. W. Liu et al., "The Si/SiGe heterojunction phototransistors with high bandwidth and multi-functionality," International Topical Meeting on Microwave Photonics, Budapest, Hungary, July, 2003.
5. P. S. Chen, S. W. Lee, Y. H. Peng, Z. Pei, M. -J. Tsai , **C. W. Liu**, "Novel composite Ge/Si/Ge quantum dots with high PL efficiency and improved uniformity," First International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM 2003), Jan. 2003.
6. H. C. Chen, S. W. Lee, S. L. Cheng, L. J. Chen, P. S. Chen and **C. W. Liu**, "Enhanced growth of amorphous interlayer in Ti thin films on strained Si/SiGe relaxed substrates," First International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM 2003), Jan. 2003.
7. B.-C. Hsu, S. T. Chang, C.-R. Shie, C.-C. Lai, P. S. Chen, and C. W. Liu, "High Efficient 820 nm MOS Ge Quantum Dot Photodetectors for Short Reach Integrated Optical

Receivers,” International Electron Device Meeting, pp. 91-94, 2002.

8. Yuan, C. -H. Lin, C. -R. Shie, K. -F. Chen, M. H. Lee, and **C. W. Liu**, “Oxide Roughness Enhanced Reliability of MOS Tunneling Diodes,” Int. Solid State Devices and Materials (SSDM), 2002.
9. W. -C. Hua, M. H. Lee, and **C. W. Liu**, “A Novel Gas Switching Method to Improve the Reliability of Rapid Thermal Oxide,” Electrochemical Society 201<sup>st</sup> Spring meeting, Philadelphia, PA, USA, May, 2002.