

# 建立化學機械研磨製程之接觸有限元素模式

林有鎰\* 董彥臣\*\*

\*德霖技術學院機械工程系副教授

\*\*德霖技術學院機械工程系講師

## 摘要

本文假設晶圓和研磨墊的轉速相同，軸對稱均勻分佈之受力形式和最小能量原理，並考慮晶圓與研磨墊間的接觸，而建立一套二維軸對稱準靜態接觸有限元素模式。在化學機械研磨過程中，將晶圓承載器、載具膜和晶圓視為一結構體，當它與研磨墊產生接觸時，以不同節點處理晶圓表面和研磨墊表面的節點，並以形狀函數處理接觸邊界負荷和位移的轉換。藉由此模式，分析晶圓表面的 von Mises 應力分佈，晶圓承載器負載對晶圓表面應力和不平坦度的影響。結果得到(1)晶圓表面的 von Mises 應力分佈和材料移除率有相似的趨勢，(2)當作用在承載器的負載增加時，晶圓表面的應力會變大。

關鍵字：化學機械研磨、二維軸對稱準靜態接觸有限元素模式

## A Contact Finite Element Model in Chemical Mechanical Polishing Process

Yeou-Yih Lin\*    Yan-Chen Dung\*\*

\*Department of mechanical engineering, associate professor

\*\*Department of mechanical engineering, lecturer

### Abstract

In this paper, the revolutions of wafer and pad were assumed the same, the axisymmetric uniformly-distributed pressure form was given and the minimum energy theory was applied and wafer-pad contact model was considered, a 2-D axisymmetric quasic-static contact finite element model for chemical mechanical polishing process will be established. During the polishing process, the carrier, carrier film and wafer are considered as an integral, it contacts with the pad and we regard both of them as two different bodies. In this model, we will treat these two surfaces as different nodes and a shape function is used to treat the transformation load and displacement between them. Following this model, the von Mises stress distributions on the wafer surface were analyzed, the effect of the load of carrier on the von Mises stress and nonuniformity on the wafer surface were investigated. The findings indicate that (1) the profile of the von Mises stress distributions correlates with the removal rate profile. (2) While the load exerted on the carrier is increasing, the von Mises stress on wafer surface becomes larger.

**Keywords:** chemical mechanical polishing, 2-D axisymmetric quasic-static contact finite element model

## 壹、緒論

對半導體製造業而言，基於電子元件精密度與性能的提高、儲存空間與記憶體容量的加大，晶圓的尺寸勢必要加大，使得晶圓表面之高低起伏輪廓的容忍要求更嚴苛，故全面性平坦化技術愈益顯得重要，而化學機械研磨製程正是獲得晶圓表面的全面性平坦化的主要方法。圖 1 為化學機械研磨製程的示意圖，它是由晶圓承載器、載具膜、研磨墊和研磨平台組合而成。加工過程為晶圓固定於晶圓承載器下，下壓於研磨墊上，欲進行平坦化之晶圓面朝下，晶圓和研磨墊各自旋轉。此時將包括化學溶液和懸浮的細微研磨顆粒組成的研磨液注入研磨墊上，藉離心力的作用均勻地散佈於研磨墊上。由於化學溶液的化學作用氧化晶圓表面和軟化表層；晶圓承載器的向下壓力產生機械作用；藉由承載器與研磨平台旋轉所產生的相對運動使晶圓表面與研磨液中研磨顆粒接觸而產生機械摩擦等效應，使晶圓表面上不平整的薄層材料被去除，因此化學機械研磨製程是一種結合機械摩擦、化學結合與化學液溶去的複合作用而進行高效率研磨去除加工的方法。在研磨的過程中，晶圓表面的移除量甚少，又晶圓表面與研磨墊接觸，因此了解晶圓-研磨墊接觸界面的變化，對晶圓表面的全面性平坦化的影響是相當重要的。

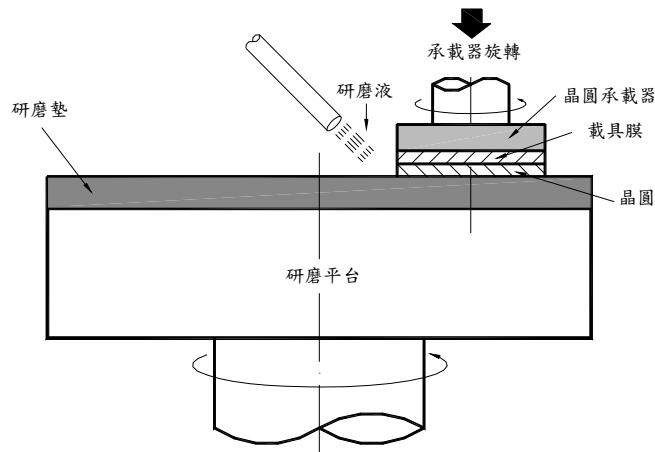


圖 1 化學機械研磨製程之示意圖

由圖 1 知，化學機械研磨製程的加工機制在本質上非常複雜，要解析其磨耗機制是相當困難，因此適當的簡化模型以模擬磨耗機制是必要的。Sundararajan 等[1]和 Thakurta 等[2]應用潤滑理論求解研磨液薄膜厚度和壓力分佈，並以質量傳遞模式求材料移除量。當化學機械研磨製程發生在潤滑區時，此時晶圓並未接觸研磨墊，此模式可以預測合理的材料移除量。Tichy 等[3]將化學機械研磨製程視為一接觸問題，其中晶圓作用在粗糙的研磨墊上，上面噴研磨液。他以研磨墊粗度(pad asperities)高度控制研磨液薄膜厚度，並以雷諾方程式求界面壓力。結果發現此模式和實驗量測的壓力輪廓相吻合。Runnels 和 Renteln[4]以軸對稱的模型，假設研磨墊與晶圓中間無力傳遞、研磨墊為彈性和忽略研磨劑效應，模擬晶圓表面的應力分佈並重寫 Preston 公式，而推導出材料移除率與應力之間的關係。結果顯示材料移除率受正向壓力影響顯著。Wang 等[5]忽略研磨液的作用而建立化學機械研磨之二維軸對稱線彈性模式，假設晶圓表面的剪應力是均勻分佈，藉由 von Mises 應力分佈狀況預測晶圓表面不平坦率。經 I-DEAS 套裝軟體模擬，結果顯示應力分佈狀況確實對表面不平坦率造成影響。Srinivasa 等[6]建立一化學機械研磨製程

的線彈性研磨模式，經 ANSYS 套裝軟體模擬，得到晶圓表面之受力情形，結果與[5]均有邊緣應力大增的現象，但位置卻不大相同。Lou 和 Dornfeld[7]深入探討化學機械研磨製程之固體-固體接觸模式的磨耗機構。在晶圓-磨粒界面和研磨墊-磨粒界面的塑性接觸、磨料大小的常規分佈和研磨墊表面的週期性粗糙度的假設下，他們發展出預測材料移除的新模式。它除了有 Preston 方程式裡的壓力和速度等製程參數外，還包括晶圓硬度、研磨墊硬度、研磨墊粗糙度、磨料大小和磨料幾何形狀等輸入參數。Yu[8]則以 Hertz 接觸理論說明接觸面間粗糙變形與研磨率的關係。Tseng[9]以薄板模擬晶圓，分別利用應變能與 Hertz 接觸理論計算晶圓與研磨墊間的壓力分佈。Ahmadi 和 Xia[10]使用機械接觸理論分析研磨顆粒和晶圓表面的相互作用，並研究研磨顆粒磨耗機構移除晶圓表面的過程。鄭壁瑩和黃建勳[11]以 ANSYS 套裝軟體建立化學機械研磨製程的有限元素模式，進行晶圓、承載器墊塊和研磨墊之間的接觸應力電腦模擬分析。Lin 和 Lee[12]使用有限元素法，建立三維板材軋延的接觸模式。在軋延過程中，考慮工輥為彈性體，探討工輥的變形量對板材的影響。Lin 和 Lo[13][14]以有限元素法建立二維正交切削之接觸模式。考慮刀具為彈性體，在低速切削下，探討刀具-切屑界面之接觸問題。

本文的目的是建立一套考慮晶圓與研磨墊間的接觸問題的二維軸對稱準靜態接觸有限元素模式來分析晶圓表面的 von Mises 應力分佈趨勢，研磨墊、載具膜的特性和晶圓承載器負載對晶圓表面應力和不平坦度的影響。

## 貳、理論基礎

### (1) Preston 方程式

化學機械研磨製程的主要特性是材料的移除。在研磨過程中，材料移除率(Material Removal Rate, MRR)為施加的正向壓力及相對運動速度的函數，由 Preston 方程式[15]來描繪，如下：

$$MRR = C_p \times P \times V \quad (1)$$

式中，P：正向壓力，V：相對運動速度， $C_p$ ：Preston 常數。

### (2) 二維軸對稱準靜態模式

圖 2 為晶圓和研磨墊相對運動示意圖，在化學機械研磨作業的過程中，我們可以對研磨正壓力參數加以控制，而相對速度可以分解為研磨墊轉速及晶圓轉速之關係式，亦即對任一個位於晶圓上之加工點 A 而言，其對於研磨墊之相對速度  $\vec{V}$  為

$$\vec{V} = -(\vec{\omega}_p \times \vec{R}_{wp}) - \vec{R}_w \times (\vec{\omega}_w - \vec{\omega}_p) \quad (2)$$

式中， $\vec{\omega}_w$ ：晶圓轉速， $\vec{\omega}_p$ ：研磨墊轉速， $\vec{R}_{wp}$ ：研磨墊中心到晶圓中心之距離， $\vec{R}_w$ ：晶圓上之加工點 A 到晶圓中心之距離。

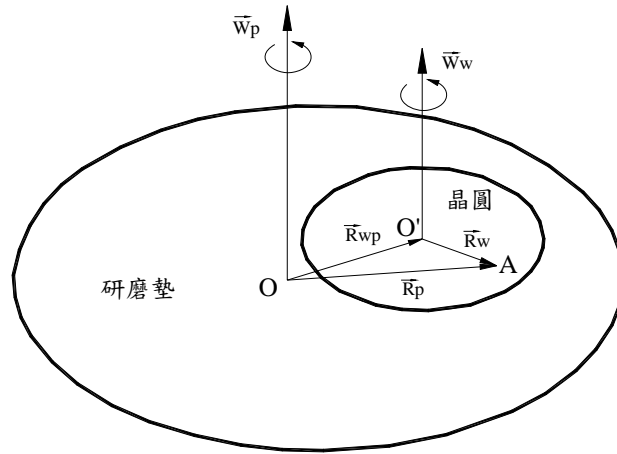


圖 2 晶圓和研磨墊之相對運動示意圖

由(2)式，若研磨墊與晶圓具有相同的角速度與方向，即  $\vec{\omega}_w = \vec{\omega}_p$ ，則晶圓上之加工點 A 的相對速度  $\vec{V}$  僅為  $-(\vec{\omega}_p * \vec{R}_{wp})$ ，它是一個定值。依此類推，可以得到晶圓表面與研磨墊之間的剪應力為定值，且均勻分佈於兩者的界面，因此本文忽略剪應力的影響，建立一個準靜態模式；又因受力形式為晶圓承載器負載和承載器空氣背壓，兩者均為軸對稱分佈，且若假設研磨墊為一極大的平整平面，則幾何形狀也可以軸對稱分佈來簡化，故本文可以簡化成一個二維軸對稱準靜態模式，如圖 3 所示。

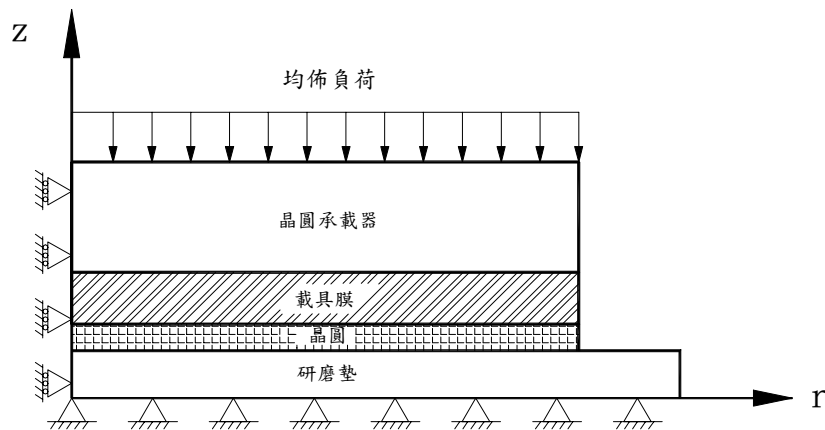


圖 3 二維軸對稱準靜態模式

### (3) 二維軸對稱有限元素方程式

依據最小總位能原理，有限元素構成方程式可表示為[16]

$$[K]\{\delta\} = \{Q\} \quad (3)$$

式中， $[K] = \sum_1^n [K]_e$  為剛性矩陣、 $\{Q\} = \sum_1^n \{Q\}_e$  為節點負荷合力。

### (4) 晶圓-研磨墊界面的接觸模式 有限元素構成方程式

在研磨過程中，圖 3 上半部結構體(包含晶圓承載器、載具膜和晶圓)與研磨墊於研磨區產生接觸，此時上半部結構體和研磨墊可視為兩個互相接觸的物體，假設研磨墊視為接觸體 A，上半部結構體視為接觸體 B，若將兩者看作分離的兩個物體，對於接觸問題則二者同時存在代數等式，將二者區分開來表示如下：[12-14]

研磨墊有限元素構成方程式：

$$[K_A]\{d_A\} = \{F_A\} \quad (4)$$

式中， $[K_A]$ 為研磨墊剛性矩陣、 $\{d_A\}$ 為研磨墊節點位移、 $\{F_A\}$ 為研磨墊節點負荷。

上半部結構體有限元素構成方程式：

$$[K_B]\{d_B\} = \{F_B\} \quad (5)$$

式中， $[K_B]$ 為上半部結構體剛性矩陣、 $\{d_B\}$ 為上半部結構體節點位移、 $\{F_B\}$ 為上半部結構體節點負荷。

### 接觸面處理步驟

1. 每一步驟開始時，先不考慮上半部結構體的變形，由(4)式計算出研磨墊節點在接觸區的位移： $[K_A]\{d_A\}_i = \{F_A\}_i$ 。

2. 將研磨墊節點負荷，利用形狀函數矩陣，轉換成上半部結構體接觸節點負荷：

$$\{F_B\}_i = [N_B]^T \{F_A\}_i \quad (6)$$

式中， $[N_B]$ 為上半部結構體之形狀函數矩陣，表示如圖 4。圖 4 為一個以 a,b,c 為三個頂點的三角形元素，此三角形元素是研磨墊位於研磨區的接觸元素之一，若 a-b 線上的 F 點為薄膜層與研磨墊相接觸的節點，則 $[N_B]$ 可表示如下：

$$[N_B] = \begin{bmatrix} N_a & 0 & N_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_a & 0 & N_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， $N_a$  和  $N_b$  分別為三角形元素的點座標。

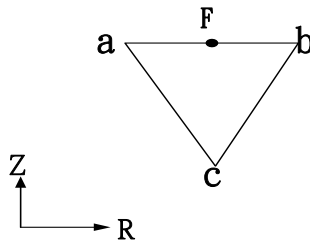


圖 4 研磨區接觸線上接觸點示意圖

3. 代入(5)式以求解出上半部結構體的變形量： $[K_B]\{d_B\}_i = \{F_B\}_i$ 。
4. 把此彈性變形量利用 $\{d_{AC}\}_i = [N_B]\{d_B\}_i$ ，轉換成相對應的研磨墊接觸節點回彈位移量 $\{d_{AC}\}_i$ ，並把它迭加在研磨墊接觸節點的位移 $\{d_A\}_i$ 上，此即為研磨墊回彈後的變形量 $\{d_A\}_i + \{d_{AC}\}_i$ ，將此變形量稱為前一次的變形量。
5. 將前一次的變形量 $\{d_A\}_i + \{d_{AC}\}_i$ 代入(4)式 $[K_A](\{d_A\}_i + \{d_{AC}\}_i) = \{F_A\}_{i+1}$ ，計算出研磨墊節點在接觸區的節點負荷 $\{F_A\}_{i+1}$ 。
6. 將研磨墊節點負荷 $\{F_A\}_{i+1}$ ，利用(6)式 $\{F_B\}_{i+1} = [N_B]^T \{F_A\}_{i+1}$ ，轉換成上半部結構體接觸節點負荷 $\{F_B\}_{i+1}$ 。
7. 將此彈性變形量利用 $\{d_{AC}\}_{i+1} = [N_B]\{d_B\}_{i+1}$ ，轉換成相對應的研磨墊接觸節點回彈位移量 $\{d_{AC}\}_{i+1}$ ，並把它迭加在研磨墊接觸節點的位移 $\{d_A\}_i + \{d_{AC}\}_i$ 上，此即為研磨墊回彈後的變形量 $(\{d_A\}_i + \{d_{AC}\}_i) + \{d_{AC}\}_{i+1}$ ，將此變形量稱為後一次的變形量。

### (5) 晶圓表面節點負載

當一二維表面負載分布在表面節點，則節點力可表示如下：[16]

$$\{F_s\} = \int_{S_f} [N]^T \begin{Bmatrix} p_r \\ p_z \end{Bmatrix} dS_f = \int_{s_r} \begin{bmatrix} L_i & 0 \\ 0 & L_i \\ L_j & 0 \\ 0 & L_j \\ L_k & 0 \\ 0 & L_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_r \\ p_z \end{Bmatrix} 2\pi r ds_r \quad (8)$$

式中， $\{F_s\}$  為表面節點力向量， $S_f$  為作用表面， $L_i$ 、 $L_j$  和  $L_k$  為自然座標， $s_r$  為受力邊相鄰二節點的距離， $p_r$ 、 $p_z$  為作用在表面上的壓力。

若晶圓負載是沿著軸向作用在晶圓表面三角形元素的  $ij$  邊， $s_r$  以  $s_{ij}$  代替， $L_k$  等於零， $p_r$  等於零， $p_z$  為已知壓力，即  $p_z$  等於  $P_1$ ，如圖 5 所示，則(8)式可簡化為

$$\{F_s\} = \int_{s_{ij}} \begin{Bmatrix} 0 \\ P_1 L_i \\ 0 \\ P_1 L_j \end{Bmatrix} 2\pi r ds_{ij} \quad (9)$$

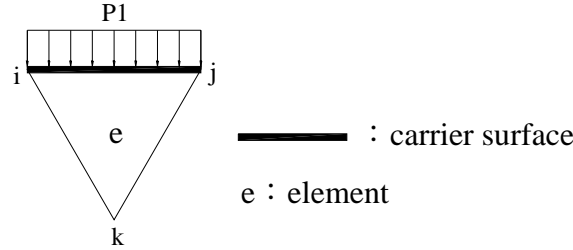


圖 5 晶圓表面元素

## 參、有限元素模式

本文接觸體 A 分割成 1800 個元素 1086 個節點、接觸體 B 為 3226 個元素 1731 個節點。基本假設為(1)晶圓承載器、載具膜、晶圓與研磨墊四者皆為平整的平面。(2)以上四種材料皆具等向性(isotropy)。(3)晶圓承載器、載具膜、晶圓相鄰面皆為緊密接合。此外，邊界條件為：(1)受力型式為均勻施加於晶圓承載器表面的負載。(2)左側為對稱邊界，承受滾輪支撐，其節點在徑向的位移為零。(3)研磨墊底部表面為固定，亦即此處的節點位移恆為零。(4)晶圓承載器、載具膜與晶圓間為緊密接合，因此相接節點於變形時擁有相同的變形量。

## 肆、結果與討論

### (1) 模式驗證

Von Mises 在 1913 年發現當材料的組合應力即 von Mises 應力值超過材料的降伏強度時，材料開始降伏。本文根據 Wang 等[5]，以 von Mises 等效應力作為模擬應力之結果，其 von Mises 應力於二維軸對稱模型中可以簡化為：

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + 6\tau_{rz}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中， $\bar{\sigma}$  為 von Mises 應力， $\sigma_{rr}$ 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 $\sigma_{zz}$  和  $\tau_{rz}$  分別為徑向、環向、軸向應力和剪應力。

在忽略研磨液的化學作用的條件下，參考 Wang 等[5] 的材料性質與幾何尺寸條件，如表 1 所示，承受晶圓承載器施加的 5.0psi 壓力，以有限元素法計算晶圓表面的 von Mises 應力分佈。圖 6 為模擬的晶圓表面 von Mises 應力和距晶圓中心的距離之間的關係。由圖 6 顯示在靠近晶圓中心處，von Mises 應力分佈幾乎維持一平滑的直線，然後有陡昇的突然變動，在靠近材料邊緣處，應力值達到最大值，而後明顯的下降；最後在邊緣處，應力值再次上升。此結果與 Wang 等[5]的模擬結果相類似。

表 1 材料性質和幾何條件[5]

	彈性係數(psi)	柏松比	半徑(in)	厚度(in)
晶圓承載器	$3.0 \times 10^7$	0.3	3.95	0.3
載具膜	38.5	0.1	3.95	0.025
晶圓	$3.0 \times 10^7$	0.3	3.937	0.0278
研磨墊	333.0	0.1	5.0	0.055

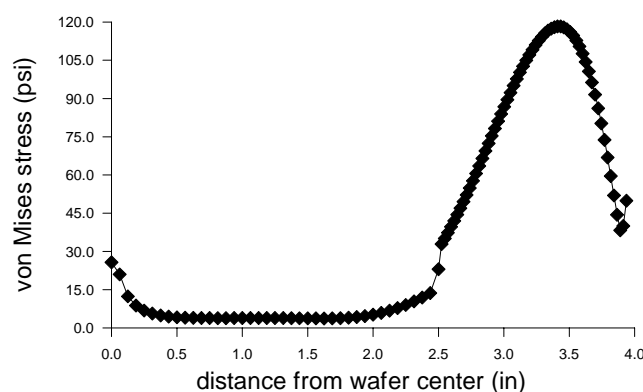


圖 6 晶圓表面之 von Mises 應力分佈

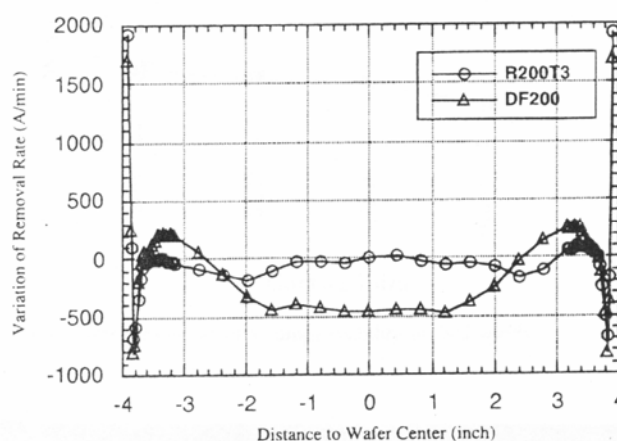


圖 7 晶圓表面之實驗材料移除率[5]

圖 7 為在實驗機台上使用二種不同載具膜之材料移除率實驗值，其中包涵二條表面研磨率曲線，分別代表不同的載具膜材質，R200T3 之彈性模數為 0.69MPa，DF200 為 0.407MPa[5]。圖上顯示材料移除率在靠近晶圓邊緣處有陡昇的突然變動現象，而後明顯的下降；最後在邊緣處，



應力值再次上升。觀察圖 6 和圖 7，發現雖然本文的模擬條件和圖 7 的實驗條件不同，但晶圓表面的 von Mises 應力分佈與材料移除率有相似的趨勢，即二圖的分佈趨勢和特性在定性上相互吻合，由此證明本文所建立的分析模式具有一定的可行性。

## (2) 晶圓承載器負載的影響

如表 2 所示，利用三種不同的承載器負載，來模擬晶圓表面之應力分佈和不平坦度的變形情形。

表 2 承載器負載

負載	psi
較輕負載	1
輕負載	3
標準負載	5

圖 8 為在不同承載器負載作用下，晶圓表面應力之分佈情形。由圖上知，當作用在承載器的負載增加時，它使得晶圓表面的應力變大。

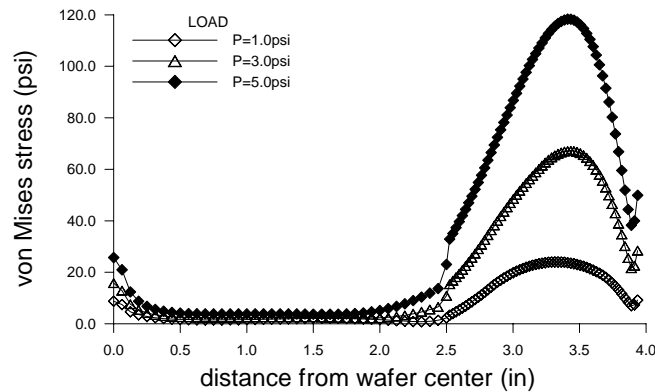


圖 8 在不同承載器負載作用下，晶圓表面應力之分佈情形

## 伍、結論

經由本文所建立的模式的模擬和分析，得到以下結論：

- (1) 結合化學機械研磨製程有限元素法和晶圓-研磨墊接觸模式而建立一套二維軸對稱準靜態接觸有限元素模式。
- (2) 模擬所得的晶圓表面 von Mises 應力分佈顯示在靠近晶圓中心處，von Mises 應力分佈幾乎維持一平滑的直線，然後有陡昇的突然變動，在靠近材料邊緣處，應力值達到最大值，而後明顯的下降；最後在邊緣處，應力值再次上升。此結果的分佈趨勢和特性與實驗的材料移除率有相似的趨勢，證明本文所建立的分析模式在定性上具有一定的可行性。
- (3) 當作用在承載器的負載增加時，晶圓表面的應力變大。

## 陸、參考文獻

1. Sundararajan, S., D. G. Thakurta, D. W. Schwendeman, S. P. Murarka and W. N. Gill, 1999, "Two-Dimensional Wafer-Scale Chemical Mechanical Planarization Models Based on Lubrication Theory and Mass Transport," J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 2, pp.761-766.
2. Thakurta, D. G., C. L. Borst, D. W. Schwendeman, R. J. Gutmann and W. N. Gill, 2001, "Three-Dimensional Chemical Mechanical Planarization Slurry Flow Model Based on Lubrication Theory," J. Electrochem. Soc., Vol.148, No.4, pp. G207-G214.
3. Tichy, J., J. A. Levert, L. Shan and S. Danyluk, 1999, "Contact Mechanics and Lubrication Hydrodynamics of Chemical Mechanical Polishing," J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 4, pp.1523-1528.
4. Runnels, S. R. and P. Renteln, 1993, "Modeling the Effect of Polish Pad Deformation on Wafer Surface Stress Distributions during Chemical-Mechanical Polishing," Dielectric Sci. Technol., pp.110-121.
5. Wang, D., J. Lee, K. Holland, T. Bibby, S. Beaudoin, and T. Cale, 1997, "von Mises Stress in Chemical-Mechanical Polishing Processes," J. Electrochem. Soc., Vol.144, No.3, pp.1122-1127.
6. Srinivasa-Murthy, C., D. Wang, S. P. Beaudoin, T. Bibby, K. Holland, T. S. Cale, 1997, "Stress Distribution in Chemical-Mechanical Polishing," Thin Solid films, Vol.308, pp.533-537.
7. Lou, J. F. and D. A. Dornfeld, 2001, "Material Removal Mechanism in Chemical-Mechanical Polishing: Theory and Modeling," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.14, No.2, pp.112-pp.132.
8. Yu, T. K., 1995, "Modeling of Chemical-Mechanical Polishing Process," Materials Research Society Proceedings ULSI-X Conferences.
9. Tseng, W. T., 1998, "Machine-Related Wafer Pressure Distribution and Its Influence on Chemical-Mechanical Polishing Process," The Electrochemical Society Proceedings.
10. Ahmadi, G and X. Xia, 2001, "A Model for Mechanical Wear and Abrasive Particle Adhesion During the Chemical-Mechanical Polishing Process," J. Electrochem. Soc., Vol.148, No.3, G99-G109.
11. 鄭璧瑩、黃建勳, 1999, "CMP 研磨頭對晶圓壓力分佈影響之研究", 中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集, 254 頁~259 頁。
12. Lin, Z. C. and S. Y. Lee, 1997, "Application of An Elastic Roller with Slightly Convex Shape in the Improvement of the Flatness of A Strip for Cold Rolling", JSME International Journal Series A, Vol.40, No.4, pp.96-5018.
13. Lin, Z. C. and S. P. Lo, 1997, "A Study of the Tool-Chip Interface Contact Problem under Low Cutting Velocity with An Elastic Cutting Tool," Journal of Materials Processing Technology, Vol.170, pp.34-46.
14. Lin, Z. C. and S. P. Lo, 1998, "A Study of Deformation of the Machined Workpiece and Tool under Low Cutting Velocity with An Elastic Cutting Tool," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.40, No.7, pp.623-681.
15. Preston, F., 1927, "Optimization of Computer Controlled Polishing," Glass Tech., Vol.11, pp.214-219.

16. Rao, S. S., 1989, "The Finite Element Method in Engineering," Pergamon Press.

