

以邊界元素法研究化學機械研磨製程載具膜背壓分佈形式對晶圓應力和表面不平坦度的影響

林有鎰¹ 邱傳聖² 李冠陞³

¹德霖技術學院機械工程系暨創意產品設計系教授

²元智大學機械工程學系副教授

³元智大學機械工程學系研究生

摘要

本文首先推導出晶圓上某一點的相對速度，考慮晶圓和研磨墊的轉速相同，則相對速度成為一個定值且研磨墊為一很大的平整平面，則建立一套二維準靜態的分析模式。其次，以 Brebbia 和 Dominquez 推導 Somigliana 恆等式為基礎，導入位移和分佈力的基本解，在忽略體力作用和考慮定元素的條件下，經離散化後而得到包括晶圓承載器、載具膜、晶圓、研磨墊與維持環之邊界積分統御方程式。最後，考慮同時承受晶圓承載器負荷、載具膜背壓和維持環負荷而建立一套包含施加不同載具膜背壓分佈形式的化學機械研磨製程之二維軸對稱準靜態邊界元素模式，探討全域載具膜背壓分佈和局部載具膜背壓分佈對晶圓表面 von Mises 應力和不平坦度的影響，結果顯示(1)晶圓表面 von Mises 應力分佈與實驗的表面材料移除率在靠近晶圓邊緣處皆有陡昇的突然變動，然後下降的現象，因此利用邊界元素法得到的 von Mises 應力，來預測晶圓表面之材料移除率是可行的，(2)在維持環-晶圓承載器負載比固定為 0.8、晶圓與維持環間距固定為 0.069in.，研磨墊彈性模數固定為 333psi 的條件下，加入局部載具膜背壓得到的晶圓表面平均 von Mises 應力和最大 von Mises 應力均小於全域載具膜背壓，此外對不平坦度而言亦有相同現象。

關鍵字：化學機械研磨製程、維持環、載具膜背壓、邊界元素模式、von Mises 應力、不平坦度

A Study on the Effect of the Back Pressure Distribution Forms of the Carrier Film on the Wafer Stress and the Nonuniformity of the Wafer Surface Using Boundary Element Method for a Chemical Mechanical Polishing Process

Yeou-Yih Lin¹ Chuan-Sheng Chiou² Kuan-Sheng Lee³

¹ Professor, Department of Mechanical Engineering and Department of Creative Product Design,
De Lin Institute of Technology

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering,
Yuan Ze University

³ Graduate Student, Department of Mechanical Engineering,
Yuan Ze University

Abstract

In this paper, a relative velocity at a given point on the wafer surface will be first derived. Revolutions of the wafer and the pad are assumed the same to achieve a constant velocity and the pad is a huge plane, then, a two-dimensional quasic-static analysis model will be established. Next, based on the Somigliana's identity derived by Brebbia and Dominquez, inferring to the fundamental solutions of displacement and traction, and under the conditions that the body force is ignored and constant element is used, the boundary integral governing equation involving in the wafer carrier, the back pressure of the carrier film, the wafer, the pad and the retaining after discretizing was derived. Thereafter, a 2D axisymmetrical quasic-static boundary element model considering the carrier load, the film load and the retaining ring load for CMP was established. The results show that (1) the same tendency to possess that near the wafer edge, it would increase dramatically and then drop between the stress distribution achieved by boundary element method and the experimental material removal rate, it verifies that the boundary element method used in the stress analysis in a chemical mechanical polishing process to predict the wafer's nonuniformity qualitatively is feasible. (2) Under the conditions that the retaining ring-wafer carrier load ratio is 0.8, the wafer-retaining ring gap is 0.069in. and the pad's modulus is 333psi, the average and the maximum von Mises stress on the wafer surface due to the addition of the local back pressure of carrier film is smaller than that of the global to the back pressure of carrier film. Otherwise, the nonuniformity is the similar phenomenon.

Keywords: Chemical mechanical polishing process, back pressure of the carrier film, boundary element model, stress, nonuniformity

壹、緒論

化學機械研磨製程主要是利用研磨墊、研磨液，配合機械動作，將晶圓表面的金屬薄膜研磨除去，以達到所要求的平坦度。由圖 1 知在研磨的過程中，由於晶圓邊緣處的應力集中現象，使得晶圓在邊緣處過度研磨，造成材料移除率增大，導致整片晶圓的不均勻度提高，而無法達到全域平坦化的要求，因此以維持環機構將晶圓邊緣所產生的應力集中轉嫁到維持環與研磨墊的接觸面上，來改善和補償上述邊緣過度研磨的現象，並防止晶圓於研磨過程中滑出晶圓承載器，如圖 2 所示。

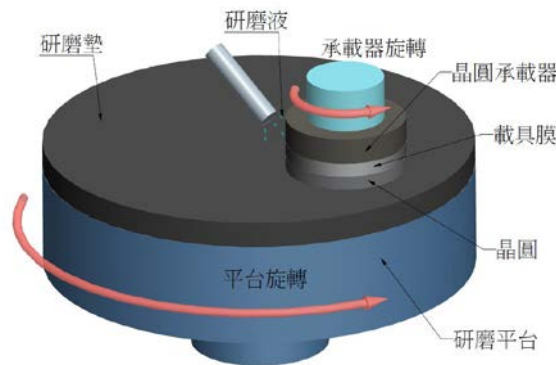


圖 1 化學機械研磨製程

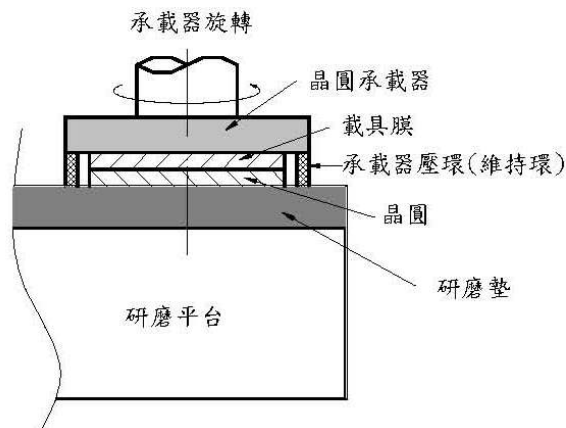


圖 2 維持環機構示意圖

Srinivasa 等[1]建立一個化學機械研磨製程的線彈性研磨模式。它忽略了研磨液作用，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度，經由 ANSYS 套裝軟體模擬，結果顯示應力分佈狀況確實對表面不平坦度造成影響。Wang 等[2]建立化學機械研磨之二維軸對稱線彈性模式。他們忽略了研磨液作用，並假設晶圓表面的剪應力分佈是均勻的。經 I-DEAS 套裝軟體模擬，得到晶圓表面之受力情形，結果與[1]均有邊緣應力大增的現象，但位置卻不大相同。Lin 和 Lo[3][4]首先依據最小總位能原理和軸對稱彈性應力-應變關係式，建立一個化學機械研磨製程之二維軸對稱準靜態邊界元素模式，分析研磨過程中，晶圓表面的 von Mises 應力分佈趨勢，軸向應力、環向應力、徑向應力和剪應力對 von Mises 應力

的影響及軸向應變、環向應變、徑向應變和剪應變對晶圓變形的影響。結果發現 von Mises 應力在靠近晶圓邊緣處，有陡昇的晶圓邊界效應；軸向應力和軸向應變是影響晶圓表面的 von Mises 應力分佈和變形的主要因素。接著，進一步分析晶圓表面的 von Mises 應力分佈趨勢，研磨墊、載具膜的特性和晶圓承載器負荷對晶圓表面應力和不平坦度的影響。結果得到晶圓表面的 von Mises 應力分佈和材料移除率有相似的趨勢，研磨墊的彈性模數、厚度和晶圓承載器負荷的改變對晶圓表面應力和不平坦度有較大的影響，而載具膜的影響並不大。Lin[5]在晶圓承載器外圍加入一圈維持環機構，發展一個包括維持環之二維軸對稱準靜態有限元素模式，探討維持環對晶圓表面應變、應力和不平坦度的影響，發現維持環可以減少晶圓表面的應力分佈，降低不平坦度，達到晶圓表面邊緣過度磨耗和防止晶圓於研磨過程中滑出晶圓承載器的目的。Lo 等[6]進一步分析晶圓-維持環間距和維持環-晶圓承載器負荷比對晶圓表面的應力和不平坦度的影響，得到當晶圓-維持環間距和維持環-晶圓承載器負荷比在一定的範圍內，確實可以改善晶圓表面的不平坦度。林有鎰等[7]建立包括晶圓承載器、載具膜、晶圓、維持環與研磨墊五層結構的化學機械研磨製程之二維軸對稱有限元素模式，負荷形式為晶圓承載器負荷、載具膜背壓和維持環負荷。改變載具膜背壓的分佈形式，探討載具膜局部背壓分佈對晶圓應力和不平坦度的影響。

截至目前為止，以邊界元素法為數值方法的工具來模擬 CMP 的研究者不多，然而因為邊界元素法具備只需要對分析區域的邊界做離散化處理，近似求解，不必牽涉領域，元素數目和記憶容量因此可大幅地減少的優點，此正是分析晶圓表面應力分佈的利器。Lou 等[8][9]建立一套二維薄結構(thin structure)之邊界元素模式，推演理論模式並應用於界面應力分析。Lou[10]建立一套 CMP 二維邊界元素模式，分析研磨過程中，晶圓表面的壓力分佈和晶圓表面材料的移除率的關係。林有鎰等[11]建立一套 CMP 二維準靜態邊界元素模式，藉此求得晶圓與研磨墊之間的應力分佈與表面不平坦度的關係，結果顯示晶圓表面 von Mises 應力分佈與實驗得到的表面材料移除率趨勢相同。

貳、理論基礎

2-1 二維軸對稱準靜態模式

圖 3 為晶圓和研磨墊相對運動示意圖。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

$$\vec{V} = -(\vec{\omega}_p * \vec{R}_{wp}) - \vec{R}_w * (\vec{\omega}_w - \vec{\omega}_p) \quad (1)$$

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。

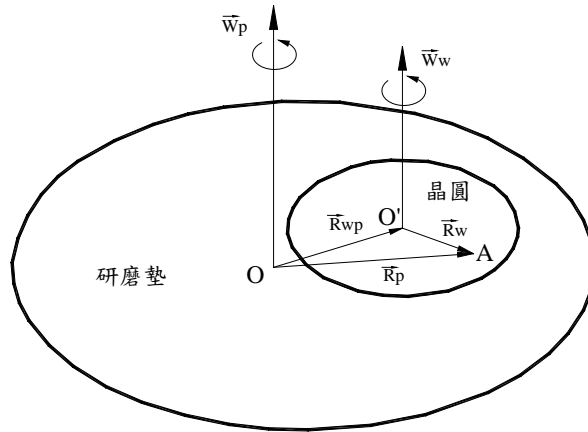


圖3 晶圓和研磨墊相對運動圖

由(1)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} 為 $-(\vec{\omega}_p * \vec{R}_{wp})$ ，它是一個定值。依此，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而建立一個準靜態模式；而在數學模式建構上，因晶圓負載和維持環背壓均為軸對稱分佈，且若假設研磨墊為一大的平整平面，則幾何形狀也可以軸對稱分佈來簡化，故本文簡化為二維軸對稱準靜態模式，如圖 4 所示，其中 P1 為晶圓承載器均佈負載、P2 為維持環均佈負載、P3 為載具膜背壓、W 為晶圓-維持環間距。

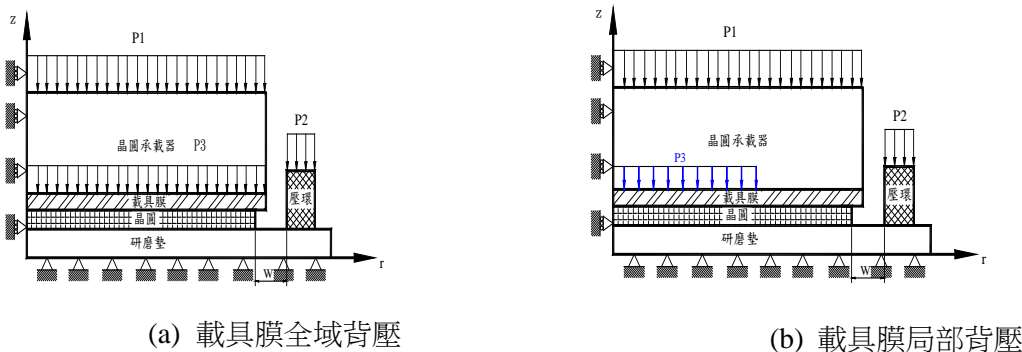


圖4 二維軸對稱準靜態模式

2-2 邊界元素模式

2-2-1 基本解(Fundamental solution)

● 位移的微分方程式(Navier Equation)

考慮力量作用在一個物體上微小元素，其平衡方程式如下：

$$\partial\sigma_{ij}/\partial x_j + f_i = 0 \quad (2)$$

式中， σ_{ij} ：應力， x_j ：X、Y、Z 方向， f_i ：外力。

利用 Hooke 定律，得到 Navier 方程式，如下式：

$$\nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{1-2\nu} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) = \frac{-\mathbf{f}}{\mathbf{u}} \quad (3)$$

式中， \mathbf{u} ：位移， ν ：Poisson 比。

● **Betti 互換定理(Betti's reciprocal theorem)**

假如有一個彈性體受到兩組應力作用且滿足平衡，則第一組(a)的力量作用在第二組(b)在位移所作的功，會相等於第二組(b)的力量作用在第一組(a)在位移所作的功，此即為功的互換定理，由此觀念可推導出積分的關係：

$$\int_S \mathbf{t}_i^{(a)} \mathbf{u}_i^{(b)} dS + \int_V \mathbf{f}_i^{(a)} \mathbf{u}_i^{(b)} dV = \int_S \mathbf{t}_i^{(b)} \mathbf{u}_i^{(a)} dS + \int_V \mathbf{f}_i^{(b)} \mathbf{u}_i^{(a)} dV \quad (4)$$

式中， t_i 和 u_i 為分佈力和位移在 i 方向的分量。

2-2-2 二維軸對稱方程式

● **軸對稱位勢方程式**

Becker[12]定義軸對稱座標系統(又稱為圓柱座標)，其有三個方向分別為：徑向(r)，軸向(z)，環向(θ)。利用分析環向的積分以得到由徑向和軸向所組成的核函數。軸對稱的 Laplace 方程式如下：

$$\nabla^2 \phi_{\text{axi}} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

● **軸對稱彈性邊界積分方程式**

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} u_r(p) \\ u_z(p) \end{bmatrix} + \\ & 2\pi \int_{\Gamma} \begin{bmatrix} T_{rr}(p, Q) & T_{rz}(p, Q) \\ T_{zr}(p, Q) & T_{zz}(p, Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r(Q) \\ u_z(Q) \end{bmatrix} r_Q d\Gamma(Q) \\ & = 2\pi \int_{\Gamma} \begin{bmatrix} U_{rr}(p, Q) & U_{rz}(p, Q) \\ U_{zr}(p, Q) & U_{zz}(p, Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_r(Q) \\ t_z(Q) \end{bmatrix} r_Q d\Gamma(Q) \end{aligned} \quad (6)$$

式中， p ：源點， Q ：場點， Γ ：邊界， $U_{ij}(p, Q)$ ：位移向量， t_r 、 t_z ：軸向和徑向 traction， u_r 、

u_z ：徑向和軸向位移。

● **軸對稱彈性統御方程式**

$$[A][u] = [B][t] \quad (7)$$

式中， $[A]$ 、 $[B]$ 矩陣包含 T_{ij} 與 U_{ij} 核函數， $[u]$ 為位移矩陣， $[t]$ 為牽引力矩陣。

● **CMP 二維軸對稱邊界元素模式**

將二維軸對稱之晶圓承載器、載具膜、晶圓、研磨墊與維持環五層結構分為領域 Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 、 Ω_4 和 Ω_5 ， Γ_1 、 Γ_4 和 Γ_5 分別為晶圓承載器、研磨墊和維持環的邊界，如圖 5 所示。圖 6 表示晶圓承載器、載具膜、晶圓、研磨墊與維持環之邊界元素分割示意圖。圖 7 表示承受晶圓承載器負荷、載具膜背壓和維持環負荷之 CMP 模式。

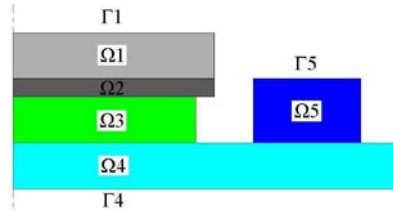


圖 5 晶圓承載器、載具膜、晶圓、研磨墊與維持環五層結構示意圖

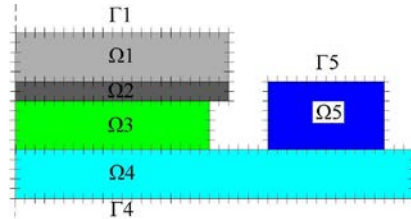
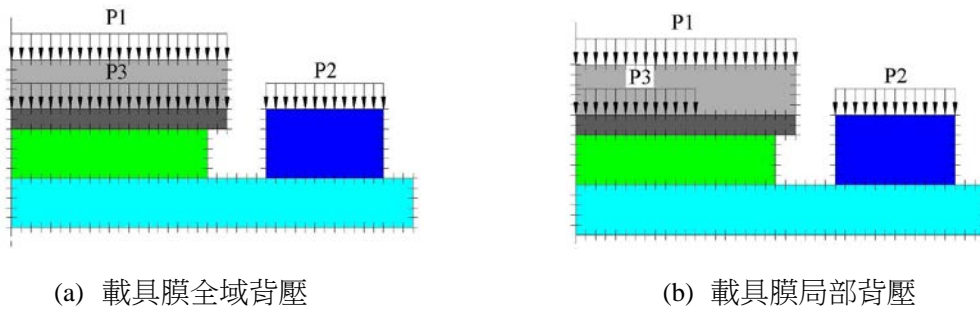


圖 6 邊界元素分割示意圖



(a) 載具膜全域背壓

(b) 載具膜局部背壓

圖 7 承受晶圓承載器負荷、載具膜背壓和維持環負荷之 CMP 模式

參、結果與討論

3-1 模式驗證

本文以 von Mises 等效應力作為模擬應力之結果，von Mises 應力於二維軸對稱模型中可以簡化如下：

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + 6\tau_{rz}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中， $\bar{\sigma}$ ：von Mises 應力， σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 和 τ_{rz} ：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，材料性質與幾何尺寸條件，如表 1 所示。

表 1 材料性質與幾何尺寸

	彈性模數 (psi)	蒲松比	半徑 (in.)	厚度 (in.)
晶圓	30×10^6	0.3	3.937	0.0278
研磨墊	330	0.1	5	0.035
維持環	30×10^6	0.3	3.966(內)	0.265
			4.083(外)	

圖 8 為在 10psi 載具膜全域背壓條件下，模擬的晶圓表面 von Mises 應力和距晶圓中心的距離的關係。由圖八顯示在靠近晶圓中心處，von Mises 應力分佈平坦，變化不大，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。

圖 9 為在國家奈米元件實驗室(National Nano Device Laboratories(NDL))實驗機台上之材料移除率實驗值。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 8 和圖 9，發現雖然二圖的條件不同，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。

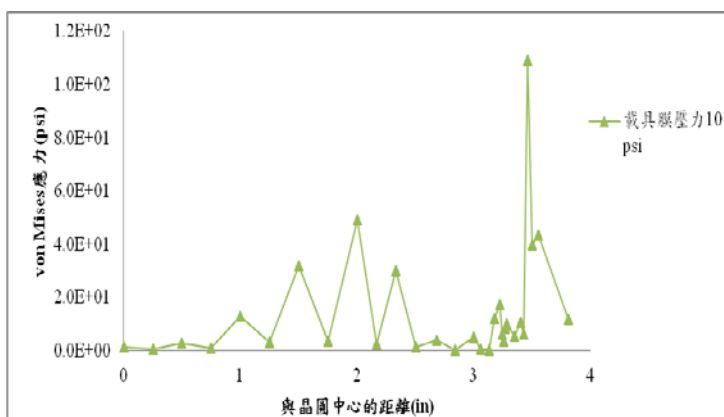


圖 8 晶圓表面 von Mises 應力的分佈情形

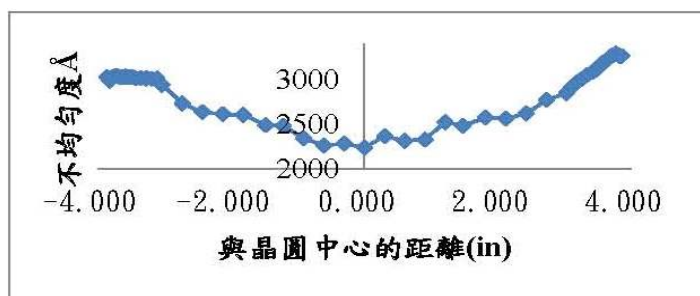


圖 9 材料移除率實驗值

3-2 晶圓表面不平坦度

不平坦度定義如下：

$$R = \frac{S_{\max}}{S_{\text{avg}}} \tag{10}$$

式中，R 為晶圓表面不均勻度， S_{avg} 為晶圓表面平均 von Mises 應力， S_{\max} 為晶圓表面最大 von Mises 應力。

3-3 全域載具膜背壓分佈和局部載具膜背壓分佈對晶圓表面 von Mises 應力和不平坦度的影響

在維持環-晶圓承載器負載比固定為 0.8、晶圓與維持環間距固定為 0.069in.，研磨墊彈性模數固定為 333psi 的條件下，改變載具膜背壓分佈的形式，探討背壓分佈的形式對晶圓表面 von Mises 應力與不平坦度的影響。若背壓分佈於載具膜全部，稱為全域載具膜背壓分佈；若參考圖 8 的 von Mises 應力的分佈，將背壓施加的範圍只設定到達平坦處，約半徑 3.5”的地方，則

稱為局部載具膜背壓分佈。加入局部載具膜背壓得到的晶圓表面平均 von Mises 應力和最大 von Mises 應力均小於全域載具膜背壓，如表二所示。此外對不平坦度而言亦有相同現象，如表二所示。

表二 載具膜背壓分佈的形式對晶圓表面 von Mises 應力的比較

載具膜背壓(psi)	S_{avg} (psi)	S_{max} (psi)	R
10(全域)	8.76	109.31	12.47
10(局部)	7.08	48.94	6.91

肆、結論

經由本文所建立的晶圓、維持環和研磨墊等結構之化學機械研磨之二維軸對稱準靜態邊界元素模式，歸納模擬和分析結果，結論如下：

- (1) 建立一套考慮晶圓承載器、載具膜、晶圓、研磨墊與維持環等五層結構，同時承受晶圓承載器負荷、載具膜背壓和維持環負荷之化學機械研磨製程之二維軸對稱準靜態邊界元素模式，其中包含施加不同載具膜背壓分佈形式。
- (2) 模擬所得的晶圓表面 von Mises 應力分佈顯示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。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) 加入局部載具膜背壓得到的晶圓表面平均 von Mises 應力和最大 von Mises 應力均小於全域載具膜背壓，此外對不平坦度而言亦有相同現象。

陸、誌謝

由於國科會的支持(國科會編號NSC 102-2221-E-237-002-)和國家奈米元件實驗室(National Nano Device Laboratories(NDL))的實驗協助，使本文得以順利進行，特此致上由衷的感謝。

伍、參考文獻

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Lin, Y. Y. and S. P. Lo, 2004, "A Study of A Finite Element Model for Chemical Mechanical Polishing Process," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.23, pp.644-650.
- (4) Lin, Y. Y. and S. P. Lo, 2003, "A Study on the Stress and Nonuniformity of the Wafer Surface for

- the Chemical Mechanical Polishing Process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.22, pp.401-409.
- (5) Lin, Y. Y., 2007, "Influence of a Retaining Ring on Strain and Stress in Chemical Mechanical Polishing Process," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.22, pp.871-878.
- (6) Lo, S. P., Y. Y. Lin and J. C. Huang, 2007, "Analysis of Retaining Ring Using Finite Element Simulation in Chemical Mechanical Polishing Process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp.547-555.
- (7) 林有鎰、羅仕鵬、李文喜，2010，"化學機械研磨製程背壓分佈對晶圓應力和不平坦度的影響研究"，第27屆中國機械工程學會全國學術研討會，台北，台北科技大學。
- (8) Luo, J. F., Y. J. Liu and E. J. Berger, 1998, "Analysis of Two-Dimensional Thin Structures (from Micro- to Nano-Scales) using the Boundary Element Method," *Computational Mechanics*, Vol.22, pp.404-412.
- (9) Luo, J. F., Y. J. Liu and E. J. Berger, 2000, "Interfacial Stress Analysis for Multi-Coating Systems using an Advanced Boundary Element Method," *Computational Mechanics*, Vol.24, pp.448-455.
- (10) Luo, J. F., 2003, "Integrated Modeling of Chemical Mechanical Planarization/Polishing (CMP) for Integrated Circuit Fabrication: From Particle Scale to Die and Wafer Scales," Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- (11) 林有鎰、羅仕鵬、邱傳聖，2012，"應用二維邊界元素法模擬化學機械研磨之晶圓表面之不平坦度"，中國機械工程學會第二十九屆全國學術研討會，高雄，中山大學。(NSC-100-2221-E -237-003)
- (12) Becker, A. A., 1992, "The Boundary Element Method in Engineering A complete course," McGraw-Hill Book Company(UK).