

化學機械研磨製程空氣背壓對晶圓應力分佈和 表面不平坦度的影響研究

林有鎰

德霖技術學院機械工程系副教授

摘要

本文首先考慮晶圓和研磨墊的轉速相同，受力形式為晶圓承載器負載和空氣背壓，兩者均為軸對稱分佈，而建立化學機械研磨製程的二維軸對稱準靜態模式。其次由最小能量原理出發，得到二維軸對稱準靜態有限元素模式，此模式包括晶圓承載器、載具膜、晶圓與研磨墊四層結構。藉由此模式探討空氣背壓對晶圓表面的應力分量、von Mises 應力分佈和表面不平坦度的影響。結果發現晶圓表面的軸向應力對 von Mises 應力影響最大，而空氣背壓對軸向應力影響最大，使得軸向應力沿 $-z$ 方向增加。因此，當施以一空氣背壓時，晶圓表面的 von Mises 應力會增加，但表面不平坦度會降低。由此可見，加入背壓補償確實可以達到改善晶圓表面平坦化的目的。

關鍵字：化學機械研磨、有限元素模式、空氣背壓、應力、表面不平坦度

Study on effect of air back pressure to the stress and nonuniformity of wafer in chemical mechanical polishing process

Yeou-Yih Lin

Department of mechanical engineering, associate professor

Abstract

In this paper, the revolutions of wafer and pad were considered the same and the force forms including the pressure exerted on the top of wafer surface and the carrier back pressure were axisymmetric distributed, a two-dimensional axisymmetric quasic-static model for chemical mechanical polishing process (CMP) was first established. Based on the principle of minimum total potential energy, a two-dimensional axisymmetric quasic-static finite element model with a carrier back pressure compensation for CMP was then established. In this model, the four-layer structures including wafer carrier, carrier film, wafer and pad are involved. The effect of a given carrier back pressure on the stress components, von Mises stress on wafer surface and surface nonuniformity was analyzed. The findings indicated that the axial stress was the dominant factor to the von Mises stress distribution on wafer surface. Because that the back pressure had the maximum affect on the axial stress and it made the axial stress increased along the $-z$ direction. Thus, while applying a back pressure, the von Mises stress distribution increased, but the nonuniformity of wafer surface reduced. The result showed obviously that during the CMP process, it could achieve the purpose to improve the planarization of wafer surface by compensating a given carrier back pressures.

Keywords: CMP, FEM, air back pressure, stress, surface nonuniformity

壹、緒論

對未來的半導體製造業，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。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。加工過程為將晶圓表面置於貼有一層或多層研磨墊的研磨平台上，晶圓承載器則透過載具膜以真空吸住晶圓背面，研磨液以導管均勻地噴注於研磨墊上。此時在晶圓承載器上施予一向下的正向壓力。藉由承載器與研磨平台旋轉所產生的相對運動，對晶圓進行機械研磨，使晶圓表面與研磨液中微粒子接觸產生機械摩擦、化學結合與化學液溶去的複合作用，進行高效率的研磨去除加工。

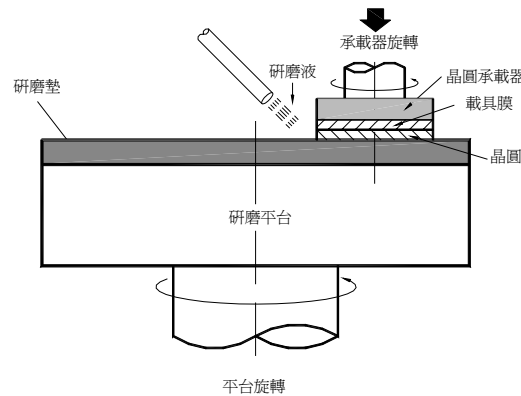


圖 1 化學機械研磨製程示意圖

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。Runnels 和 Renteln[1]以軸對稱的模型，假設(1)研磨墊與晶圓中間無力傳遞、(2)研磨墊為彈性、(3)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，顯示材料移除率受正向壓力影響顯著。Runnels 和 Eyman[2]以流體動力學描述化學機械研磨中化學劑作動情形，並設定力平衡於液體-固體-液體之接觸研磨，所建立的模型亦可同時滿足研磨劑傳遞模式(slurry transport model)與物理研磨模式(physical erosion model)。但實驗結果則較趨進於物理研磨模式。Warnock[3]提出一腐蝕現象學模式，利用研磨墊壓縮性質來預測拋光率，該模式認為可預測不同圖案之絕對或相對拋光率。但該模式無法預測晶圓邊緣之情況。Sivaram 等[4]認為可利用研磨墊的彎曲程度來預測拋光率和平坦度，但該模式僅考慮晶圓表面局部範圍，如果要預測全面性平坦化，將是一個極為複雜的數學問題。Wang 等[5]建立化學機械研磨之二維軸對稱線彈性模式。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。Baker[7]視研磨墊為一彈性平板，解出晶圓與研磨墊間的變形與壓力分佈。Lou 和 Dornfeld[8]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。Lou 等[9]發展化學機械研磨製程的整合模式。它由數層次模式組成，這些次模式包括壓力、速度分佈等製程參數，研磨墊圖案、晶圓圖案等幾何參數和材料移除、晶圓表面不平坦度、碟型化、腐蝕、刮傷等輸出結果，藉此說明不同輸入變數所扮演的角色和它們的交互作用。Lou 和 Dornfeld[10]發展包含磨料重量濃度的材料移除率模式。隨著磨料重量濃度的增加，材料移除存在三個區域：以化學作用為主的急速增加區、以機械作用為主的線性區和以機械作用為主的飽和區。

本文的目的是建立一個考慮承載器空氣背壓的二維軸對稱準靜態有限元素模式。藉由此模式，探討承載器空氣背壓對晶圓表面的應力分量、von Mises 應力分佈和表面不平坦度的影響。

貳、理論基礎

(一)、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)被視為施加的正向壓力及相對運動速度的函數，通常由 Preston 方程式[11]來描繪，如下：

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

式中， P 為正向壓力， V 為相對運動速度， C_p 為Preston常數(與化學蝕刻、材料性質有關)。

(二)、二維軸對稱準靜態模式

圖 2 為晶圓和研磨墊相對運動之示意圖，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的加工點 A 而言，其對於研磨墊之相對速度 \vec{V} 為

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

式中， $\vec{\omega}_w$ 為晶圓轉速， $\vec{\omega}_p$ 為研磨墊轉速， \vec{R}_{wp} 為研磨墊中心到晶圓中心的距離， \vec{R}_w 為晶圓上加工點 A 到晶圓中心的距離。

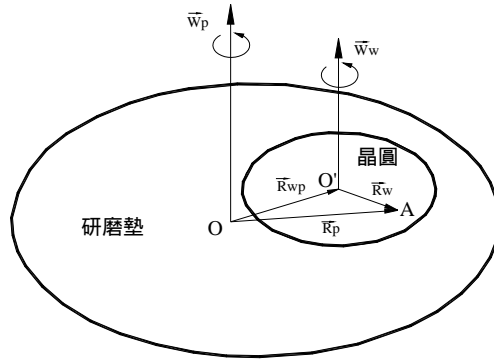


圖 2 晶圓和研磨墊相對運動示意圖

由(二)式，若研磨墊與晶圓具有相同的角速度與方向，即 $\bar{\omega}_w = \bar{\omega}_p$ ，則晶圓上加工點 A 的相對速度 \bar{v} 僅為 $-(\bar{\omega}_p * \bar{R}_{wp})$ ，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。

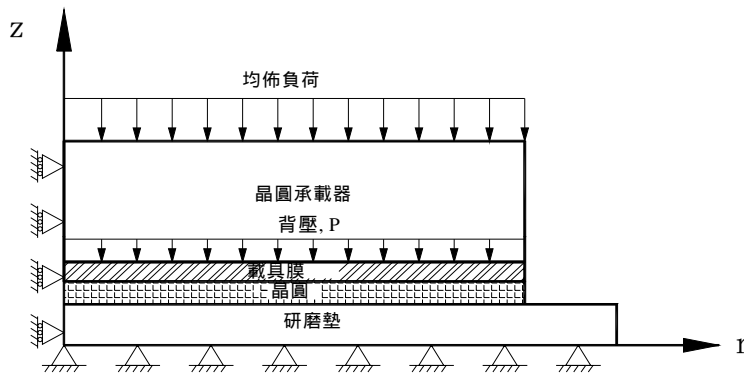


圖 3 CMP 二維軸對稱準靜態模式

(三)、最小總位能原理

考慮一彈性體受到物體力及表面力的作用而變形，其總位能為物體變形能減去外力之位能，即[12]

$$\Pi(u, v) = U_p(u, v) - V_p(u, v) \quad (3)$$

式中， $\Pi(u, v)$ 為總位能、 $U_p(u, v)$ 為應變能、 $V_p(u, v)$ 為外力位能。

應變能 $U_p(u, v)$ 定義為

$$U_p(u, v) = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (4)$$

式中， $\{\varepsilon\}$ 為應變列向量， $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{rr} \quad \varepsilon_{\theta\theta} \quad \varepsilon_{zz} \quad \gamma_{rz}\}^T$ ； $\{\sigma\}$ 為應力列向量， $\{\sigma\} = \{\sigma_{rr} \quad \sigma_{\theta\theta} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{rz}\}^T$ ； V 為物體的體積。

外力位能 $V_p(u, v)$ 定義為

$$V_p(u, v) = \iiint_V \{d\}^T \{F_b\} dV + \iint_S \{d\}^T \{T_d\} dS \quad (5)$$

式中， d 為位移、 $\{F_b\}$ 為物體力、 $\{T_d\}$ 為表面拉力、 S 為設定拉力所存在的表面。

依據最小總位能原理，當系統的總位能為最小值時，位移為一平衡狀態，即

$$\delta\Pi(u, v) = \delta U_p(u, v) - \delta V_p(u, v) = 0 \quad (6)$$

(四)、二維軸對稱有限元素方程式

根據最小總位能原理和虎克定律，可得線彈性有限元素構成方程式為

$$[K]\{\delta\} = \{Q\} \quad (7)$$

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

(五)、晶圓背壓之 Hertz 接觸理論

當晶圓承載器吸附晶圓並施加空氣背壓時，如圖 3 所示。根據 Hertz 接觸理論[13-15]，晶圓表面和研磨墊間會有 Hertz 接觸的產生，所產生的 Hertz 應力方程式如下：

$$P_b = P * \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{1/2} \quad (8)$$

式中， P_b 為壓力分佈， P 為背壓， r 為晶圓上的某一點， R 為晶圓半徑。

(六)、表面節點負載計算方式

二維軸對稱表面負載等價到節點之節點力之計算方式如下：[12]

$$\{Q_s\} = \int_{S_f} [N]^T \begin{Bmatrix} P_r \\ P_z \end{Bmatrix} dS_f = \int_{s_r} \begin{bmatrix} L_i & 0 \\ 0 & L_i \\ L_j & 0 \\ 0 & L_j \\ L_k & 0 \\ 0 & L_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_r \\ P_z \end{Bmatrix} 2\pi r ds_r \quad (9)$$

式中， $\{Q_s\}$ 為表面節點力向量， $[N]$ 為形狀函數， S_f 為受力表面， L_i 、 L_j 、 L_k 為自然座標， s_r 為表面邊之元素二節點的距離， P_r 、 P_z 為作用在表面之壓力。

(9)式中，若晶圓承載器壓力沿軸向作用在其表面的三角形元素的 ij 邊，即 $s_r = s_{ij}$ ， $L_k = 0$ ， $P_r = 0$ ， $P_z = \text{定值}$ ；同理，若晶圓背壓沿軸向作用在載具膜表面的三角形元素的 ij 邊，即 $s_r = s_{ij}$ ， $L_k = 0$ ， $P_r = 0$ ， $P_z = P_b$ 。

參、有限元素模式

本計畫將圖 3 分割成 6800 個元素和 3661 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)，原因為難以得到非等向性材料參數。(3)各材料間之接觸面皆為緊密接合。(4)因為晶圓與研磨墊的接觸表面為完全光滑，因此當施加承載器背壓時，僅考慮垂直方向的壓力。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和承載器背壓。(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、晶圓與研磨墊間為緊密接合，因此相接節點於變形時擁有相同的變形量。

肆、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，本計畫根據 Srinivasa-Murthy 等[6]，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：

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

式中， σ 為 von Mises 應力， σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 和 τ_{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，材料性質與幾何尺寸條件參考 Srinivasa-Murthy 等[6]，由林有鎰和羅仕鵬[16]的模擬得知，在靠近晶圓中心處，von Mises 應力分佈幾乎維持一平滑的直線，然後微量增加；而在靠近材料邊緣處，應力值明顯的下降；最後在邊緣處有陡昇的突然變動，而達到最大值，造成所謂的晶圓邊界效應。此結果與 Srinivasa-Murthy 等[6]的模擬結果相類似，也和實驗的材料移除率分佈有相類似的趨勢。由此證明本文所建立的分析模式具有一定的可行性。

伍、結果與討論

圖 4 為不具背壓補償的晶圓表面徑向應力、環向應力、軸向應力和剪應力的分佈圖。由(10)式知 von Mises 應力為一等效應力，其因子包含了以上四項應力，由於晶圓承載器是沿著-Z 軸施加 0.0689655MPa 的壓力，導致軸向應力值為負值，且遠大於其他三項應力值，因此 von Mises 應力的大小和趨勢主要是受到軸向應力的影響，且其變化趨勢和軸向應力的趨勢相似。

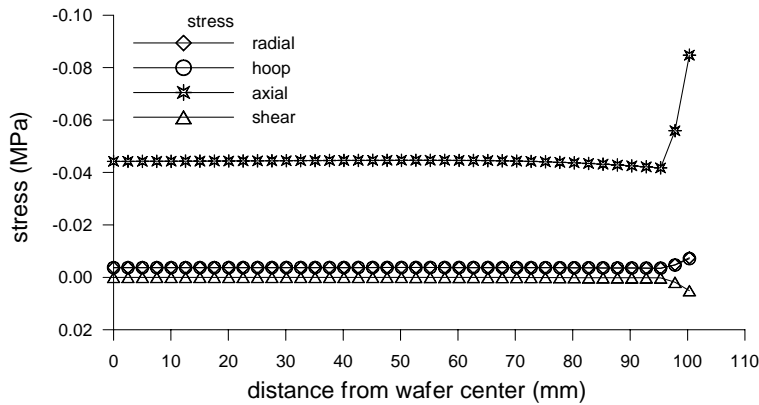


圖 4 不具背壓補償之晶圓表面徑向應力、環向應力、軸向應力和剪應力分佈圖

圖 5 顯示承受 0.0137931MPa (2psi) 背壓下的晶圓應力分量分佈。由於承載器背壓的施力方向和晶圓承載器壓力一樣，即它們均是沿著軸向施力，這使得圖 5 的軸向應力分量沿著-z 方向和圖 4 比較時會增加。最後，可以得到圖 6 所示之 von Mises 應力增加，且其增加量類似軸向應力分量沿著-z 方向的增加量。

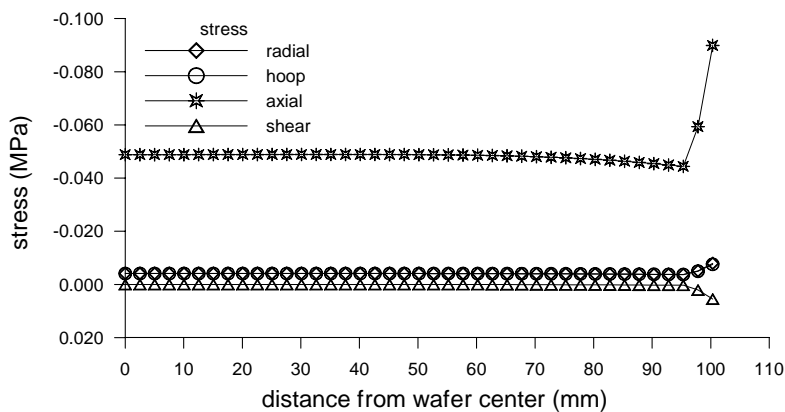


圖 5 施加 0.0137931MPa (2psi) 背壓下之晶圓應力分量分佈圖

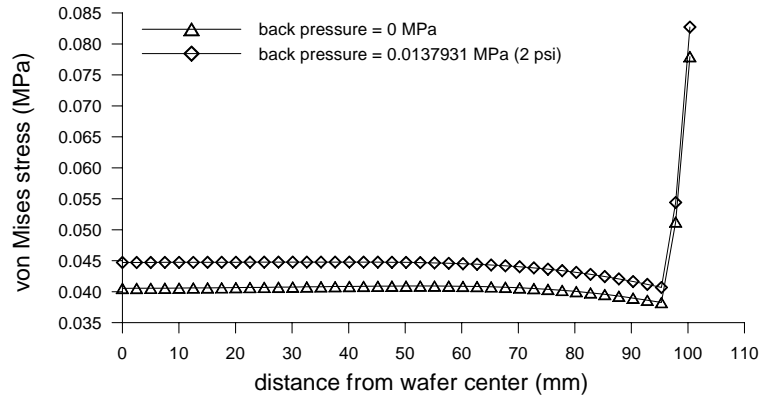


圖 6 不具背壓補償和施加 0.0137931MPa 背壓之晶圓表面 von Mises 應力分佈比較圖
另外，根據 Wang 等[5]對晶圓表面不平坦度的定義，表示如下：

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} \quad (11)$$

式中，R 為晶圓表面不平坦度、 σ_{\max} 為晶圓表面 von Mises 應力的最大值、 σ_c 為晶圓中心的 von Mises 應力。表 1 顯示加入承載器背壓，會使 σ_{\max} 和 σ_c 變高，但 R 值卻降低。由此可知，加入背壓補償確實可以達到改善晶圓表面平坦化的目的。

表 1 不具背壓補償和施加 0.0137931MPa 背壓之 σ_c 、 σ_{\max} 和 R

背 壓		σ_c (MPa)	σ_{\max} (MPa)	R
MPa	Psi			
0	0	0.04053677	0.07795506	1.92307
0.0137931	2	0.04471396	0.08271145	1.84970

陸、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. 建立一個化學機械研磨製程考慮承載器空氣背壓之二維軸對稱準靜態有限元素模式。
2. 由於承載器背壓的施力方向和晶圓承載器壓力一樣，即它們均是沿著軸向施力，這使得施加背壓之軸向應力分量沿著-z 方向和不具背壓補償者會增加，導致 von Mises 應力增加，且其增加量類似軸向應力分量沿著-z 方向的增加量。
3. 承載器背壓的加入，會使 σ_{\max} 和 σ_c 變高，但 R 值卻降低。因此在 CMP 製程中，加入背壓補償確實可以達到改善晶圓表面平坦化的目的。

參考文獻

- (1). 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.
- (2). Runnels, S. R. and L. M. Eyman, 1994, "Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 141, No. 6, pp.1698-1701.
- (3). Warnock, J., 1991, "A Two-Dimensional Process Model for CMP Planarization," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.138, No.8, pp.2398-2402.
- (4). Sivaram, S., R. Tolles, H. Bath, E. Lee and R. Leggett, 1992, "Chemical Mechanical Polishing of inter-level Dielectrics : Models for Removal Rate and Planarity," Technical Report, SEMATECH, Austin, Texas.
- (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). Baker, A. R., 1997, "The Origin of the Edge Effects in CMP," *The Electrochemical Society Proceedings*.
- (8). 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.
- (9). Lou, J. F., D. A. Dornfeld, Z. Mao and E. Hwang, 2001, "Integrated Model for Chemical-Mechanical Polishing Based on a Comprehensive Material Removal Model," *Sixth International Conference on Chemical-Mechanical Polish (CMP) Planarization (CMP-MIC)*, Santa Clara, CA, U. S. A., pp.1-pp.8.
- (10). Lou, J. F. and D. A. Dornfeld, 2003, "Material Removal Regions in Chemical Mechanical Planarization for Submicron Integrated Circuit Fabrication: Coupling Effects of Slurry Chemicals, Abrasive Size Distribution and Wafer-Pad Contact Area," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.16, No.1, pp.45-pp.56.
- (11). Preston, F., 1927, "Optimization of Computer Controlled Polishing," *Glass Tech.*, Vol.11, pp.214-219.
- (12). Rao, S. S., 1989, "The Finite Element Method in Engineering," Pergamon Press.
- (13). Timoshenko, S., 1956, "Strength of Materials Part II Theory and Problems," d. Van Norstrand Company, Inc..
- (14). Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 1987, "Advanced Strength and Applied Elasticity," Elsevier Science Publishing Co., Inc..
- (15). Tsai, M. Y., Tsai, J. C. and Liu, C., 1999, "Mechanical Wear Models and Experiment for the CMP," *Proceedings of The Sixth Symposium on Nano Device Technology*, pp.20-24.
- (16). 林有鎰、羅仕鵬，2003，"化學機械研磨製程之有限元素建模"，第十七期德霖學報，pp.273-pp.284.