

以邊界元素法研究化學機械研磨製程之維持環對晶圓表面不均勻度之影響

林有鎰¹ 邱傳聖² 莊惟舜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、維持環和研磨墊之邊界積分統御方程式而建立了一套含維持環機構之化學機械研磨之二維軸對稱準靜態邊界元素模式。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)研磨墊厚度越厚，不均勻度越低，(3)維持環背壓增加，不均勻度下降，(4)晶圓與維持環間距愈大，不均勻度愈低。

關鍵字：化學機械研磨製程、維持環、邊界元素模式、不均勻度

A Study on the Effect of a Retaining Ring Mechanism on the Nonuniformity of Wafer Surface Using Boundary Element Method for a Chemical Mechanical Polishing Process

Yeou-Yih Lin¹ Chuan-Sheng Chiou² Wei-Shun Chuang³

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, 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, the retaining and the pad after discretizing was derived. Thereafter, a 2D axisymmetrical quasic-static boundary element model for CMP involving a retaining ring mechanism 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) the larger the pad thickness is, the nonuniformity decreases. (3) the larger the ring load is, the nonuniformity decreases. (4) the longer the gap between the ring and the wafer is, the nonuniformity also decreases.

Keywords: *CMP, retaining ring, boundary element model, 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。

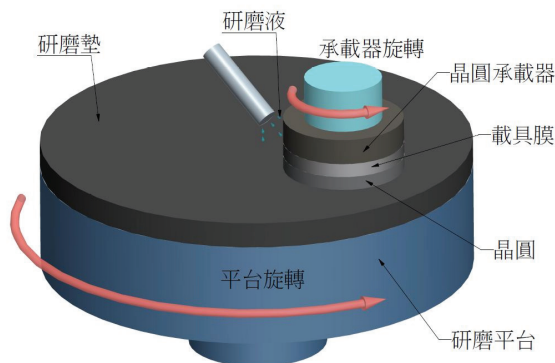


圖 1 化學機械研磨製程

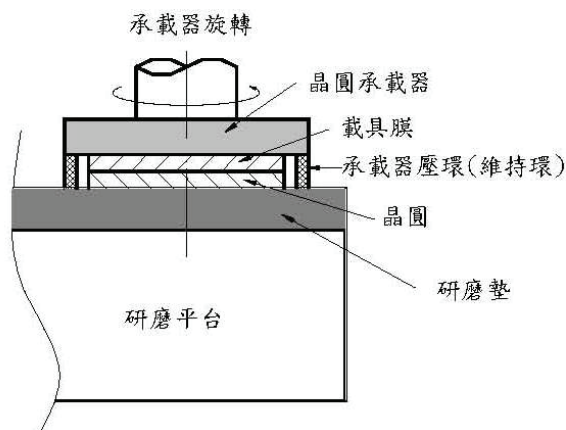


圖 2 維持環機構示意圖

Lin[1]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、應力和不均勻度的影響，發現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，減少了晶圓表面的應力分佈，降低不均勻度，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[2]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均勻度的影響，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均勻度。林有鎰等[3]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背壓。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均勻度的影響。

截至目前為止，以邊界元素法為數值方法的工具來模擬化學機械研磨製程的研究者不多，

而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。Lou 等[4][5]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[6]建立一套化學機械研磨之二維邊界元素模式，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，發現二者分佈趨勢類似。

本文藉由發展一套包括晶圓和研磨墊等結構的二維軸對稱邊界元素法，負荷形式為晶圓負載和維持環背壓，探討研磨墊厚度、維持環背壓、晶圓與維持環間距對晶圓表面不均勻度的影響。

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。

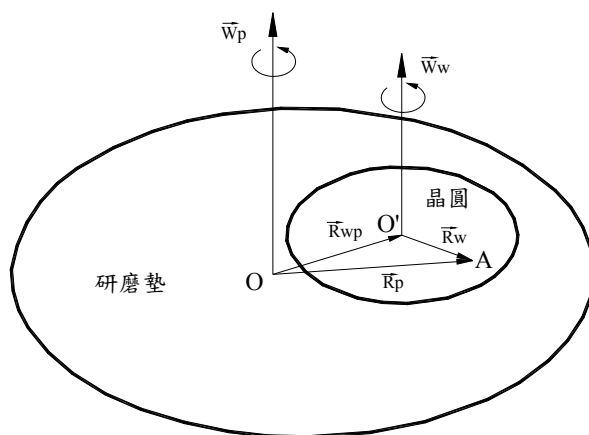


圖3 晶圓和研磨墊相對運動圖

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，故本文可以簡化成為一個二維軸對稱準靜態模式，如圖 4 所示。

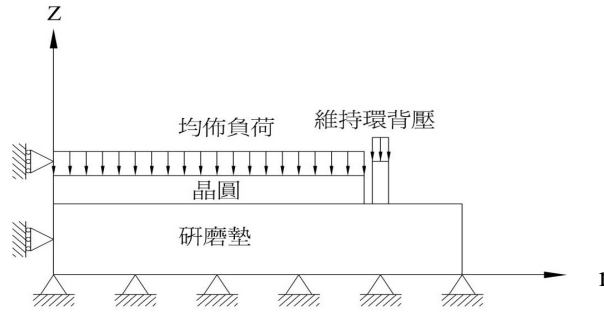


圖4 二維軸對稱準靜態模式

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[7]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：

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

● 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。

橢圓積分的位移核函數如下：

$$\begin{aligned} U_{rr}(p, Q) &= \frac{A}{R_p r_Q C} * \\ & \left[(3-4\nu)(R_p^2 + r_Q^2) + 4(1-\nu)(Z_p - z_Q)^2 \right] K\left(m, \frac{\pi}{2}\right) + \\ & \frac{A}{R_p r_Q C} * \\ & \left[-C^2(3-4\nu) - \frac{(Z_p - z_Q)^2 [R_p^2 + r_Q^2 + (Z_p - z_Q)^2]}{D} \right] * \\ & E\left(m, \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_{rz}(p, Q) &= \frac{A(Z_p - z_Q)}{R_p C} * \\ & \left[K\left(m, \frac{\pi}{2}\right) - \frac{r_Q^2 - R_p^2 (Z_p - z_Q)^2}{D} E\left(m, \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} U_{zr}(p, Q) &= \frac{A(Z_p - z_Q)}{r_Q C} * \\ & \left[-K\left(m, \frac{\pi}{2}\right) + \frac{R^2 - r_Q^2 + (Z_p - z_Q)^2}{D} E\left(m, \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_{zz}(p, Q) &= \frac{2A}{C} * \\ & \left[(3-4\nu)K\left(m, \frac{\pi}{2}\right) + \frac{(Z_p - z_Q)^2}{D} E\left(m, \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

式中， $K(m, \pi/2)$ ：第一種橢圓積分、 $E(m, \pi/2)$ ：第二種橢圓積分、 $U_{ij}(p, Q)$ ：位移向量、 m ：

橢圓積分係數、 n_r ：徑向單位法向量、 n_z ：軸向單位法向量、 μ ：剪力模數、 R_p, θ_p, Z_p ：圓柱

座標上的固定源點 p 、 r_Q, Q_Q, Z_Q ：場點的圓柱座標變數。

橢圓積分的軸對稱 traction 核函數如下：

$$T_{rr}(p, Q) = 2\mu n_r \left[\left(\frac{1-v}{1-2v} \right) \frac{\partial U_{rr}}{\partial r} + \left(\frac{v}{1-2v} \right) \left(\frac{U_{rr}}{r} + \frac{\partial U_{rz}}{\partial z} \right) \right] + \mu n_z \left[\frac{\partial U_{rr}}{\partial z} + \frac{\partial U_{rz}}{\partial r} \right] \quad (11)$$

$$T_{rz}(p, Q) = \mu n_r \left[\frac{\partial U_{rr}}{\partial z} + \frac{\partial U_{rz}}{\partial r} \right] + 2\mu n_z \left[\left(\frac{1-v}{1-2v} \right) \frac{\partial U_{rz}}{\partial z} + \left(\frac{v}{1-2v} \right) \left(\frac{U_{rr}}{r} + \frac{\partial U_{rr}}{\partial r} \right) \right] \quad (12)$$

$$T_{rz}(p, Q) = 2\mu n_r \left[\left(\frac{1-v}{1-2v} \right) \frac{\partial U_{rz}}{\partial r} + \left(\frac{v}{1-2v} \right) \left(\frac{U_{rz}}{r} + \frac{\partial U_{zz}}{\partial z} \right) \right] + \mu n_z \left[\frac{\partial U_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial U_{zz}}{\partial r} \right] \quad (13)$$

$$T_{zz}(p, Q) = \mu n_r \left[\frac{\partial U_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial U_{zz}}{\partial r} \right] + 2\mu n_z \left[\left(\frac{1-v}{1-2v} \right) \frac{\partial U_{zz}}{\partial z} + \left(\frac{v}{1-2v} \right) \left(\frac{U_{rz}}{r} + \frac{\partial U_{rz}}{\partial r} \right) \right] \quad (14)$$

● 軸對稱彈性統御方程式

$$[A][u] = [B][t] \quad (15)$$

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。

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 5 為模擬的晶圓表面 von Mises 應力和距晶圓中心的距離的關係。由圖 5 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 6 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 5 和圖 6，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。

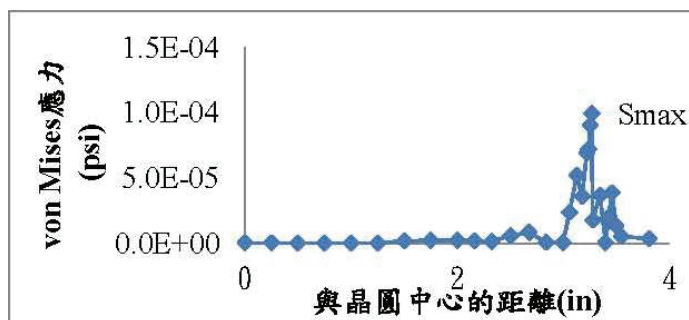


圖 5 晶圓表面 von Mises 應力的分佈情形

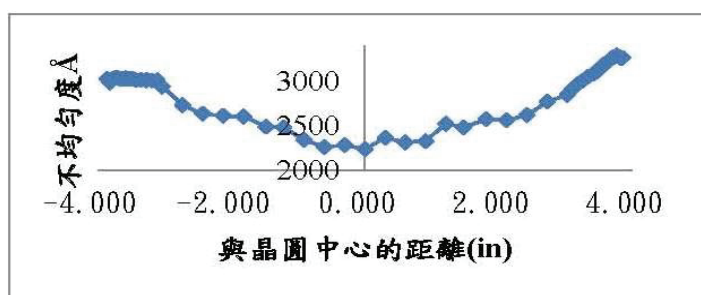


圖 6 材料移除率實驗值

3-2 晶圓表面不均勻度

以數值計算定義不均勻度如下：

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

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 研磨墊厚度對晶圓表面不均勻度的影響

在晶圓負載和維持環背壓均為 10psi，研磨墊彈性模數為 333psi 的條件下，改變研磨墊厚度探討對晶圓表面不均勻度的影響。由表 2 可看出在 0.035in.、0.055in.和 0.075in.的三種研磨墊厚度條件下，研磨墊越厚，不均勻度越低。

表 2 不同研磨墊厚度條件下，晶圓表面不均勻度的比較

厚度 (in.)	S_{avg} (psi)	S_{\max} (psi)	R
0.035	1.270E-6	9.896E-5	77.923
0.055	1.226E-6	8.168E-5	66.609
0.075	1.184E-5	6.233E-4	52.636

3-4 維持環背壓對晶圓表面不均勻度的影響

在晶圓負載固定為 10psi、研磨墊厚度 0.055in.的條件下，改變維持環背壓，探討維持環背壓對晶圓表面不均勻度的影響。由表 3 可看出在 5psi、10psi 和 15psi 的三種維持環背壓條件下，不均勻度與維持環背壓成反比。

表 3 不同維持環背壓條件下，晶圓表面不均勻度的比較

背壓 (psi)	S_{avg} (psi)	S_{max} (psi)	R
5	3.061E-06	9.931E-5	110.088
10	3.365E-06	9.896E-5	77.923
15	3.747E-06	9.862E-5	26.317

3-5 晶圓與維持環間距對晶圓表面不均勻度的影響

在晶圓負載為 10psi、研磨墊厚度 0.055in.、維持環背壓為 10psi 的條件下，改變晶圓與維持環間距，探討晶圓與維持環間距對晶圓表面不均勻度的影響。由表 4 可看出在 0.033in.、0.034in. 和 0.035in.的三種晶圓與維持環間距條件下，維持環與晶圓的間距在 0.035in.時不均勻度最低。

表 4 不同晶圓與維持環間距條件下，晶圓表面不均勻度的比較

間距 (in.)	S_{avg} (psi)	S_{max} (psi)	R
0.033	4.279E-06	1.30E-4	30.403
0.034	3.795E-06	1.10E-4	28.960
0.035	6.576E-06	1.81E-4	27.513

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) 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。
- (2) 研磨墊度越厚，不均勻度越低。
- (3) 不均勻度與維持環背壓成反比。
- (4) 維持環與晶圓的間距愈大，不均勻度愈低。

伍、參考文獻

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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。
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Becker, A. A., 1992, "The Boundary Element Method in Engineering A complete course," McGraw-Hill Book Company(UK).