

[illegible]

執行期間： 91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

計畫主持人：余政靖

- ☐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

執行單位：國立台灣大學

中 華 民 國 九 十 二 年 五 月 二 十 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

化學機械研磨的模式化與控制 (2/3)

Modeling and Control of Chemical Mechanical Polishing (2/3)

計畫編號：NSC 91-2214-E-002-036

執行期限：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

主持人：余政靖

國立台灣大學化工系

計畫參與人員：邱健賓

國立台灣科技大學化工系

許勝智

國立台灣大學化工系

1、中文摘要

此論文的主要目的，首先我們發現軟著陸技術與 CMP 的相似性，並將其於應用 CMP 製程上，推導出最適化控制的解決方法，來縮小凹陷值與磨除時間。另外根據平坦化製程中的 MIT 模式，我們引進新參數修正，推導出圖形凹凸面的磨除速率為線深、圖形密度、臨界線深和原始磨除速率的關係式，藉此關係式可計算出在平坦化規格下固定固定原始磨除速率所需磨除時間與所需沉積金屬厚度，為 trade-off 形式。而後推導出最適化的原始磨除速率控制模式，可將磨除時間和所需沉積金屬厚度減少至最小。最後利用先前所推導出的關係式應用於過度研磨製程，其中平坦化之後的厚度和磨深即為過度研磨所需磨除厚度和起始缺陷值。

Abstract

In this work, an analogy between the soft landing of a spacecraft and CMP operation is established and, subsequently, a polishing strategy is proposed. The objective of soft landing is to minimize the landing time, a minimum time problem, while ensure a safe landing without damaging the vehicle. A similar situation is encountered in the operation of CMP.

Despite recent advances in copper (Cu) CMP technology, it still suffers pattern dependence that results in large variation across the wafer. Much of the past research focuses on the effects of pattern geometry on the interlevel dielectric (ILD) layer. Nonetheless, the semi-physical pattern dependent model can be extended directly to the copper removal. In this work, the model of Boning and co-workers is extended to Cu CMP by taking the pattern geometry into account.

Finally, the pattern dependent model is extended to the over-polish stage. Therefore, an optimal operation strategy can be derived to achieve prescribed dishing limit while maintaining a high throughput with minimal ECP Cu thickness. This is achieved by selecting an optimal final step height in the planarization stage and devising the over-polishing trajectory. Again, practical considerations lead to the discretization of the continuous trajectory into finite stages, a sub-optimal control law.

2、簡介

隨著積體電路的發展與生產技術的更新，電路的設計尺寸不斷縮小，組成積體電路的電晶體及金屬導線也須不斷地微細化，必須製作多層內連線，亦即將線路層層往上堆積，而需絕緣的部份就以沉積一層介電層將上下兩層隔離，如此需更大面積才能完成的線路，層與層

之間平坦化的工作越需慎重處理。所謂的平坦化，簡單來說就是把不平坦的金屬導線層或是不平坦的氧化層施以物理或化學的力量加以平坦的一種技術，化學機械研磨可將晶圓上凹凸起伏的金屬層(metal layer)、絕緣介電層(inter-layer dielectrics, ILD)加以平坦化。這種技術主要以研磨液(slurry)與晶圓表面產生化學作用，再用研磨液中所含硬度極高的陶瓷粒子以機械力將晶圓表面不平的區域剷切刮除，這種技術的主要原理很容易了解，但是影響 CMP 的參數很多，並不好控制，而且其中真正的反應機構尚未被完全了解。不過，CMP 還是目前平坦化製程中的主流，潛力無限，值得深入研究。

3、應用軟著陸技術之 CMP

早前提出至今仍常被引用於解釋研磨速率最基本的模式，也就是 Preston Equation:

$$RR = K_p PV \quad (1)$$

式子中， K_p 為常數， P 為研磨表面受到之下壓力， V 為研磨表面與研磨墊之間的滑動速度。普里斯登所提出的模式，簡單說明了研磨速率會隨著壓力和轉速增加而變高。而凹陷值是隨著壓力和轉速增加而變大(Wijekoon, 1998)，所以我們可得到一個結果，凹陷值會隨著磨除速率增加而增大。因此若能將磨除速率控制在最小的情形，必定能改善凹陷值。而我們所知道的軟著陸(soft landing)技術即可幫我們改善此問題。

3.1 軟著陸技術與 CMP 類比

首先觀察兩者相似之處。軟著陸為登陸月球表面所用到的技術，太空船在高度 H 時，以垂直速度 V 下降至星球表面，而 CMP 技術則是研磨墊和研磨液以 RR 的研磨速率，磨除掉晶圓上厚度 H 的金屬層；軟著陸目的為逐漸減少下降速率，使太空船接觸星球表面時的垂直速度降至最小值，即為到達地面時，速度為零而所需時間為最小值，便能不受損壞安全降落(Kirk, 1970; Bryson and Ho, 1975)。因此 CMP 當研磨至終點時，磨除速率為最小所需磨除時間也為最小值，凹陷程度也將最小。

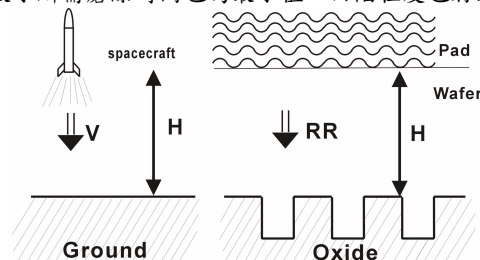


圖 1：軟著陸與化學機械研磨相似圖

3.2 CMP 軟著陸控制模式

我們可以用狀態空間方程式表示 CMP 軟著陸問

題，如下式：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u = Ax + Bu \quad (2)$$

其中 $X_1=H$, $X_2=RR$, $u=a$ ，加速度限制為：

$$-a_{\max} \leq a \leq a_{\max} \quad (3)$$

上式目的在找出 u 使得系統於最短時間內，速度符合條件，以改善凹陷值問題。代入終點邊界條件 $H=0$, $RR=0$ 可得切換方程式：

$$H = \frac{RR|RR|}{2a_{\max}} \quad (4)$$

可利用此式求出切換時間、切換速度與切換厚度，及研磨所需時間。

另外行進軌跡則為：

$$H = \frac{-1}{2a} (RR^2 - RR_0^2) + H_0 \quad (5)$$

3.3 CMP 軟著陸技術應用

以最大加速度值為 3600 Å/min^2 情況來看。我們可以利用 (4)、(5) 式可畫出以研磨加速度為 3600 Å/min^2 之切換曲線與行進軌跡圖，如圖 2 所示。

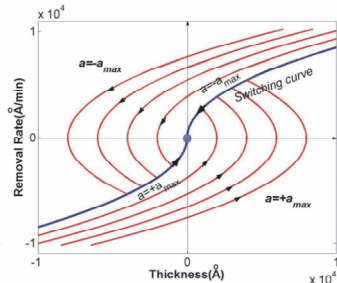


圖 2：CMP 之行進軌跡與切換曲線圖(加速度為 3600 Å/min^2)。

假設起始厚度為 8000 Å ，起始磨除速率為 0 Å/min ，由圖可知落於加速度為 $+a_{\max}$ 區域，所以自起點開始以最大加速度 3600 Å/min^2 ，此時行進軌跡就為厚度與速度之關係式。隨著時間增加，當行進軌跡接觸至切換曲線時，加速度會由最大加速度切換至最大減速度，也就是 3600 Å/min^2 切換至 -3600 Å/min^2 ，直到終點：厚度與速度皆為零。此次規格為：起始點 $(8000, 0)$ ，終點 $(0, 0)$ ，最大加速度 3600 Å/min^2 。我們可以畫出此次研磨過程行進軌跡圖和時間與厚度、研磨速率與加速度圖，如圖 3。

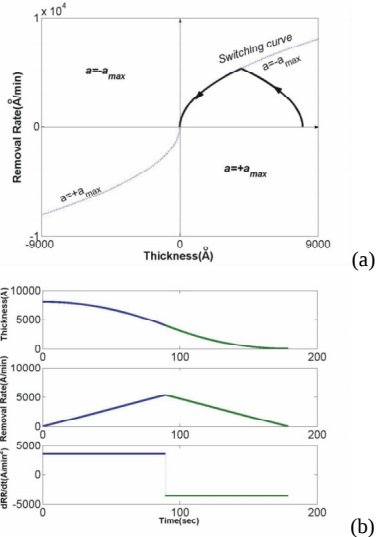


圖 3：加速度為 3600 Å/min^2 時(a)行進路線圖(b)時間與厚度、

研磨速率、研磨加速度關係圖

我們利用軟著陸技術解決 CMP 的問題，可改善 CMP 的凹陷值並求得最小時間值。

4、金屬平坦化模式

在多層內連線的製作中，為了不讓金屬層和金屬層相互接觸而發生短路，金屬層之間，會以氧化層當絕緣層隔離，在尚未進行 CMP 製程前，氧化層部分由於銅嵌刻導線的製程，為金屬層所覆蓋，因為刻之後造成凹槽，覆蓋氧化層之金屬層會比做為線路之金屬層厚度還厚，兩者之間會有階深(step height)的關係。所以 CMP 大致包含兩個階段，首先是平坦化(planarization)，目的為將起始階深研磨縮小，達到平坦化的目的，此一階段，皆為晶圓凹凸面皆為金屬層。接著是過度研磨(overpolishing)，此一階段為確保覆蓋於氧化層上之金屬層完全磨除的步驟，為兩種物質之研磨。

4.1 平坦化階深模式

我們可以由下圖了解平坦化過程中研磨墊與階深的關係：

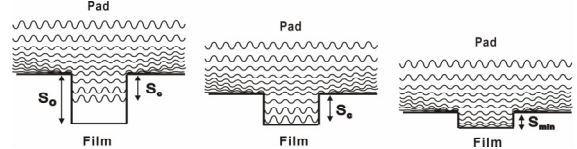


圖 4：研磨墊與階深關係圖

另外根據 Joseph(1997)提出的研磨墊相關式子：

$$y = \frac{wL^5}{32Et^3} \quad (6)$$

其中 y 為研磨墊最大變形量， w 為研磨墊被施予之壓力， L 是凹槽寬度， E 為研磨墊彈性係數， t 是研磨墊的厚度。說明研磨墊變形量正比於研磨墊所被施予之壓力，而根據 Preston Equation，所施予之壓力與磨除速率成正比，可得到研磨墊的變形量正比於磨除速率結論。故我們代入一參數 τ_c ，假設 S_c 與 RR 成一次方正比，來修正 Boning(2001)對階深與磨除速率的關係所提出的一組相關模式：

stage 1：

$$RR_{up} = -\frac{dH}{dt} = \frac{RR}{\rho} \quad (7)$$

$$RR_{down} = -\frac{dh}{dt} = 0 \quad (8)$$

stage 2：

$$RR_{up} = -\frac{dH}{dt} = RR + \frac{1-\rho}{\rho} \frac{S}{\tau_c} \quad (9)$$

$$RR_{down} = -\frac{dh}{dt} = RR - \frac{S}{\tau_c} \quad (10)$$

我們即可利用上面所推導出的公式，來求出最適化的磨除速率控制，以節省 ECP 值和磨除時間，以下為推導結果及所對應的關係圖。

stage 1：

$$t_1 = \frac{\rho}{RR} (S_0 - \tau_c RR) \quad (11)$$

$$H_0 - H_1 = S_0 - \tau_c RR \quad (12)$$

stage 2：

$$t_2 = \rho \tau_c \ln\left(\frac{\tau_c RR}{S_{\min}}\right) \quad (13)$$

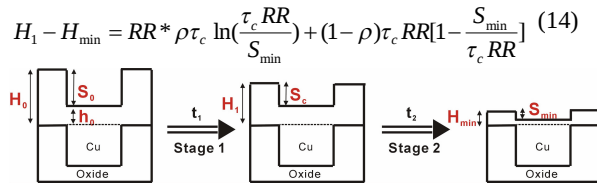


圖 5：平坦化之階深、金屬厚度與時間關係圖

4.2 模式應用

假設系統參數起始階深 S_0 為 4000(Å)、臨界階深時間常數 τ_c 為 60(sec)，平坦化之後規格參數終點金屬厚度 H_{min} 為 2000(Å)、終點階深 S_{min} 為 100(Å)。使用式子 (11)、(12)、(13)、(14) 進而計算出不同磨除速率下達到我們此次磨除目的所花費時間與所需 ECP 厚度。

結果如預期的(圖 6)，隨著磨除速率的增加，所需時間會減少，但是 ECP 厚度也會增加，這有兩個原因。第一個原因，當我們使用較大的磨除速率時，臨界階深跟著磨除速率變大，研磨墊更早接觸到下部區域，而為了達到 S_{min} 為 100(Å) 的目的，必須沉積更多的銅層。第二個原因，當 RR 越大時，上部區域和下部區域的磨除速率都會變大，同樣的，為了達到 S_{min} ，需沉積更多的銅層做補償。結果和預期不同的地方，當磨除速率趨近於無限大時，所需要時間趨近於一定值，而非趨近於零。原因如之前所提，分別為一開始即直接磨除下部區域和下部區域磨除速率大，而欲達到平坦化目的，將沉積更多的銅層，抵銷了磨除速率增加所節省之時間。

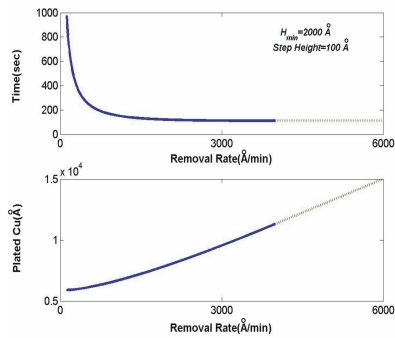


圖 6：固定磨除速率下所需時間與 ECP 厚度

從結果圖 6 中，我們發現這是一個典型的操作成本(磨除時間)與材料成本(ECP 沉積厚度)trade-off 關係。當我們使用低磨除速率時，可節省時間但是需花費較多的材料成本，相反的使用高磨除速率時，可節省材料成本，但是磨除時間增加。我們可提出一目標函數 J ：

$$J = (\alpha H_T^2 + \beta t_T^2) \quad (15)$$

其中 α 與 β 為 weighting factor，可根據不同情況而定其值，可求出最適化的 RR 以得到目標函數 J 最小值。此磨除速率為最適化結果。

4.3 磨除速率最適化操作

圖 7 為磨除速率分別 2000 Å/min 和 4000 Å/min 進行磨除之情形，分別代表由 stage1 開始進行磨除與由 stage2 開始進行磨除。當磨除步驟維持在 stage 1 時，階深的減少等於銅層厚度的減少，因此若能將磨除速率控制在此一階段，可減少銅層厚度的沉積。瞭解停留在 stage 1 的條件，就是 $RR\tau_c \leq S$ ，所以我們將磨除速率由始至終皆控制在等於 τ_c/S 的狀態下，便能確保完全處於 stage 1 的平坦化過程。這樣的磨除過程，將使得研磨墊都無法碰觸到下部面積，下部面積無法磨除，而階深的減少由上部面積厚度減少所致。

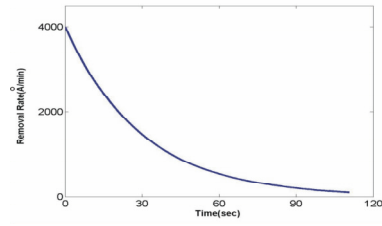


圖 7：磨除速率最適化操作方式

5、過度研磨模式

平坦化到達終點後，晶圓上最先磨除完全金屬層出現氧化層的時間。在平坦化的步驟之後為過度研磨 (overpolishing)，過度研磨有兩個目標，一在晶圓周圍處之銅層需完全磨除，另一方面在晶圓中心處所造成的凹陷值會隨著過度研磨的時間增加而增加，必須將此處的凹陷值控制在我們的容忍值之內。此部分利用前面的模式導出過度研磨凹陷模式，找出最適化的方法來達成過度研磨的目標。

5.1 模式應用

由前面模式可導出在過度研磨時的凹陷模式：

$$D_{min} - D_0 = RR * \tau_c [1 - \exp(-\frac{t_{ov}}{\tau_c})] \quad (16)$$

$$H_{op} = RR * t_{ov} - (1 - \rho) D_0 [\exp(-\frac{t_{ov}}{\rho \tau_c}) - 1] \quad (17)$$

我們利用式子(16)和(17)，其中參數 τ_c 為 60(sec)、 $\rho = 0.5$ ，起始 dishing 假設為零，分別以固定的磨除速率 1000Å/min、2000Å/min、3000 Å/min 進行過度研磨，來探討隨著時間增加 dishing 和 H_{op} 的情形。在 dishing 方面，與時間關係為一階關係，當到達一定時間後 dishing 不會再增加，維持在一最大值，而此 dishing 值即為臨界階深(S_c)，原因為當 dishing 等於臨界階深時，研磨墊碰觸不到下部區域，故不再有 dishing 的增加，當然，磨除速率越大者，同一 τ_c 臨界階深越大，所以 dishing 的最大值，與磨除速率成正比關係。另一方面 H_{op} 會隨著時間增加，也就是隨著時間增加，能磨除更多餘的銅。

接下來，我們訂定此次過度研磨 dishing 的規格，其實也就是整個 CMP 製程所能容忍的 dishing 的最大值。我們設定 $D_{min}=1000$ Å，最後金屬凹陷值不可大於 1000Å。結果如圖 8，可知道當 WIWNU 越差時，所需要磨除的厚度會越多， H_{op} 必須越大，此時只能以較小的磨除速率進行研磨，才能使得 dishing 在 1000Å 之下。相反地，當我們 WIWNU 情況越好時，所需要磨除的厚度越少，也就是 H_{op} 越小，在這種情況下，我們就可使用較大的磨除速率磨除，時間上也因此減少。我們藉此瞭解到在過度研磨前，若能將 WIWNU 的效應減少，可以減少過度研磨時間。

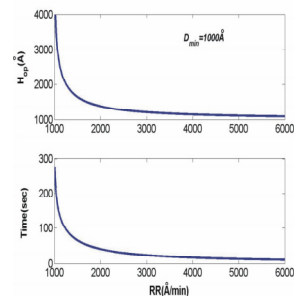


圖 8：不同磨除速率達到最後 dishing 為 1000 Å 所需時間與所能磨除 H_{op}

我們設定目標 $D_{min}=1000$ Å， $H_{op}=1500$ Å，而 D_0 由 100 Å 開始，每增加 100Å 來求出所應該操作之 RR 。由

圖 9，以 $D_0=100 \text{ \AA}$ 時，RR 需小於 $1381 \text{ \AA/min}$ 才可達到我們的目標，時間花費為 63.28 秒。 $D_0=200 \text{ \AA}$ 時，RR 則操作小於 $1161 \text{ \AA/min}$ 花費 75.7 秒。隨著 D_0 增加，操作速度減少，過度研磨時間花費更多。當 $D_0=300 \text{ \AA}$ 時，操作速度照道理需小於 $1000 \text{ \AA/min}$ ，dishing 才會小於 $1000 \text{ \AA}$ 。但是，由於臨界階深的關係，在 $\tau_c=60\text{sec}$ ，以 $RR=1000 \text{ \AA/min}$ 研磨，雖然凹陷值模式式子(16)會隨著起始凹陷值的不同而往上平移，但是受限於臨界階深的問題，無論起始凹陷值為多少，當 dishing 等於臨界階深時，研磨墊再也無法接觸到下部區域，dishing 就不再增加。而在此次操作條件 $D_{\min}=1000 \text{ \AA}$ ，我們可獲得一臨界磨除速率 $RR=1000 \text{ \AA/min}$ ，此速率的意義為無論 D_0 的大小為何，最終 dishing 最大值為 $D_{\min}$ 。所以當 D_0 大於 $300 \text{ \AA}$ 時，我們沒有必要以小於 $1000 \text{ \AA/min}$ 進行磨除，可一直維持在 $1000 \text{ \AA/min}$ ，來達到我們的目標。

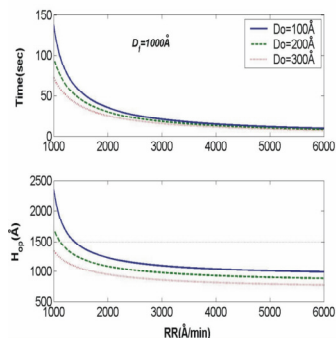


圖 9：分別於 $D_0=100 \text{ \AA}$ 、 $200 \text{ \AA}$ 、 $300 \text{ \AA}$ 以不同磨除速率達到最後 dishing 為 $1000 \text{ \AA}$ 所需時間與所能磨除 H_{op}

最後，我們將結果列於表 1 中，一開始隨著 D_0 增加，所使用的 RR 會越小，過度研磨時間會增加。但是當 D_0 增加至皆以臨界磨除速率 $1000 \text{ \AA/min}$ 研磨時，隨著 D_0 增加，過度研磨時間反而減少。這是因為當 D_0 越大，上部區域的磨除速率也會變大，因此磨除 H_{op} 所需時間會減少。以 $D_0=1000 \text{ \AA}$ 時，所花費時間僅次於時間最小值 $D_0=100 \text{ \AA}$ ，但是 $D_0=1000 \text{ \AA}$ 為 planarization 後最輕易達到之目標，比較 $D_0=100 \text{ \AA}$ ，考慮到 planarization 很明顯的選擇 $D_0=1000 \text{ \AA}$ 為最適合的操作點。因此我們發現將 planarization 之後的終點階深($S_{\min}$)也就是起始凹陷值(D_0)，在過度研磨前設定等於最小 dishing 容忍值($D_{\min}$)，以等速研磨方式，可得到最短的時間。

$D_0 (\text{\AA})$	RR ($\text{\AA/min}$)	Time (sec)
100	1381	63.28
200	1116	75.7
300	1000	81.6
400	1000	78.9
500	1000	76.2
600	1000	73.6
700	1000	71
800	1000	68.5
900	1000	66
1000	1000	63.6

表 1. 系統參數 $\tau_c=60\text{sec}$ ， $\rho=0.5$ 達到 $D_{\min}=1000 \text{ \AA}$ 、 $H=1500 \text{ \AA}$ 所需時間

5、結論

對無圖形化的晶圓研磨製程，我們是將傳統的軟著陸技術應用在 CMP 上，藉著切換曲線的方法，解決了時間最小值與凹陷值的問題。並且將問題延伸至實際上的磨除形式，最後證明了目前二階段方式的確為無圖形化

的晶圓研磨製程的最適化方法。

對於具有圖形化的晶圓研磨，我們先將 CMP 製程分為兩部分分別為 planarization 與 overpolishing。我們引用階深模式再加以修正，分別以不同起始凹陷值設定，求得平坦化製程與過度研磨製程最適化磨除速率操作方法。最後將兩者結果合併，得到最適當的起始凹陷值，和完整 CMP 最適化磨除速率操作。

6、REFERENCES

1. Carpio, R., J. Farkas and R. Jairath, "Initial Study on Copper Slurry Chemistries", *Thin Solid Films*, **266**, 238-244(1995).
2. Cook, L.M., "Chemical Process in Glass Polishing", *J. Non-cryst. Solids*, **120**, 152-171 (1990).
3. Kirk, D. E. *Optimal Control Theory An introduction*, Prentice-Hall, NJ (1970).
4. Wijekoon, K., Tsai, S.; Chandrachood, M.; Brown, B.; Redeker, F.; Nanjangud, S.; Amico, G. "Multi-Step Approach to Copper CMP Development", *SEMI/Japan Technical Symposium* (1998).
5. Sage, A. P.; White III, C. C. *Optimum Systems Control*, 2nd Ed., Prentice-Hall: NJ (1977).
6. Kao, Y. C.; Yu, C. C.; Shen, S. H. "Robust Operation of Copper Chemical Mechanical Polishing", *Microelectronic Eng.* 2002 (accepted).
7. Lee, B.; Boning, D. S.; Economikos, L. "A Fixed Abrasive CMP Model", *Proc. CMP-MIC Conf.* Santa Clara, CA, 395-402, March (2001).
8. Nguyen, V. H.; van der Velden, P.; Daamen, R.; van Kranenburg, H.; Woerlee, P. H. "Modeling of Dishing for Metal Chemical Mechanical Polishing". *Technical Digest-International Electron Devices Meeting*, University of Twente, 499-501, Dec. 2000..
9. Bryson Jr., A. E.; Y. C. Ho "Applied Optimal Control," Hemisphere: Washington, D. C. (1975).
10. Joseph, M. S., P. M. Shyam and J. G. Ronald, *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, John Wiley & Sons, Inc.(1997).
11. Kaufman, F. B., D. B. Thompson, R. E. Broadie, M. A. Jaso, W. L. Guthrie, D. J. Pearson and M.B. Small, "Chemical-Mechanical Polishing for Fabricating Patterned W Metal Features as Chip Interconnects", *Journal of the Electrochemical Society*, **138**, 3460-3465(1991).
12. Liu, C. W., B. T. Dai and C. F. Yeh, "Modeling of the Wear Mechanism during Chemical Mechanical Polishing", *Journal of the Electrochemical Society*, **143**, 716-721 (1996).
13. Luo, Q., S. Ramarajan and S. V. Babu, "Modification of the Preston Equation for the Chemical Mechanical Polishing of Copper", *Thin Solid Films*, **335**, 160-167(1998).
14. Runnels, S. R. and L. M. Eyman, "Tribology Analysis of Chemical Mechanical Polishing", *Journal of the Electrochemical Society*, **141**, 1689-1701(1994).
15. Shi, F.G. and B. Zhao "Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, **67**, 249-252 (1998).
16. Stavreva, Z., D. Zeidler, M. Plotner, G. Grasshoff and K. Drescher, "Chemical Mechanical Polishing of Copper for Interconnect Formation", *Microelectronic Engineering*, **33**, 249-257(1997).
17. Steigerwald, J. M., S. P. Murarka, R.J. Gutmann and D. J. Duquette, "Chemical Process in the Chemical Mechanical Polishing of Copper", *Materials Chemistry and Physics*, **41**, 217-228(1995).
18. Tseng, W. T. and Y. L. Wang, "Re-examination of Pressure and Speed Dependence of Removal Rate During Chemical-Mechanical Polishing Process", *Journal of the Electrochemical Society*, **144**, L15 (1997).
19. Luo, J. and Dornfeld, D.A. "Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: Theory and modeling" *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **14**, 112-133(2001).