

金屬薄膜的探針接觸式 殘留應力量測

金屬薄膜的殘留應力影響其附著狀況，殘留應力太高則薄膜容易剝離，因此在薄膜製程上，除了沉積厚度與均勻性必須符合規格外，安定的沉積鍍層則必須依賴於低值的殘留應力，以避免薄膜應力釋放而造成結構扭曲。本文將介紹生產線上使用的薄膜殘留應力量測方式，此量測機臺的主要功能為量測薄膜的厚度，但其附屬功能則是以其接觸式的探針來量測殘留應力大小與分佈狀況，藉此來評估薄膜的穩定性與最佳的製程參數。

戴豐成、李世欽

一、前言

對於材料加工成形，由於施加外在負荷或於熱處理階段的熱脹冷縮效應往往形成材料結晶構造的改變，這些原本不存在於材料原始狀態的殘留應力可分為殘留張應力 (residual tensile stress) 與殘留壓應力 (residual compressive stress) 兩大類，而各有其造成原因與運用場合。表 1 即為常見的殘留應力發生場合⁽¹⁾。對工件而言，表面所殘留壓應力由於可以抑制微裂的發生，因此可以提升工件的疲勞強度，但殘留張應力則無此效用，且其對裂縫的產生具有增益的輔助效應，因此會降低工件的疲勞強

度。除此之外，殘留應力還有應力腐蝕的問題。

對金屬材料而言可以弛力退火 (stress-relief annealing) 方式來消除殘留應力的存在所造成的不良影響。通常可藉著 X 光繞射法 (\sin^2X 、 $0^\circ - 45^\circ$ 、單一傾斜法)、Moire 干涉條紋法、變形計測定法、變形塗料測定法等方式來量測殘留應力的分佈與大小，其中前二項為非接觸式量測，後二項則為接觸式量測⁽²⁾。

在導線薄膜化的電子工業製程裡，以屬於物理氣相沉積 (physical vapor deposition, PVD) 方式的濺鍍 (sputtering) 機構成長的薄膜應用最廣，例如 Al、Ta、TiN 及 TiW 等，除了必須達到設計上要求的厚度及電阻率等特性外，另外尚需考量沈積薄膜的附著性 (基板與薄膜的鍵結能力)、均勻性與覆蓋性等，表 2 則為金屬薄膜的一般特性與分析方式。本文將介紹濺鍍金屬薄膜的殘留應力形成原因及探針接觸式殘留應力的量測原理。

戴豐成先生現為國立成功大學材料科學與工程學研究所博士班學生。

李世欽先生為國立成功大學工學博士，現任國立成功大學材料科學與工程學研究所副教授。

表 1. 表面殘留應力類型與發生原因。

加工處理方式	表面殘留應力類型	發生原因
珠擊、噴砂	-	在工件表面以機械加工方式形成殘留壓應力。
冷加工 / 熱加工	-	冷抽、冷軋或熱軋等加工方式在工件表面形成殘留壓應力。
滲碳 (表面硬化)	-	高碳表層相對於低碳心部將具有較低的麻田散鐵變態溫度，因此較慢變態的表層將形成殘留壓應力。
淬火 (完全硬化)	+	鋼料從高溫降到低溫，則表面優先變態的高比容麻田散鐵形成殘留張應力。
鑄造	+	在無相變化發生的凝固過程，內部將存在殘留張應力而心部則存在。殘留壓應力
焊接	+	變態應力與熱應力構成此殘留張應力。

註：殘留張應力：「+」、殘留壓應力：「-」。

二、薄膜形成殘留應力的原因及其影響

薄膜承受應力的主要來源為內應力、外應力與熱應力等三類不同型式之應力組合；即薄膜應力=內應力 + 外應力 + 熱應力 + ，其個別應力構成因素如下。

1. 內應力

內應力主要為沈積時由薄膜的均勻度與純度所構成，濺鍍機台、靶材與反應氣體三者的清淨度均會影響薄膜純度。

2. 外應力

外應力是薄膜與基板之間的附著狀況，由兩者間的結晶構造來控制。圖 1 則是擴散型鍵結界面的微觀示意圖，薄膜與基板之間的相互擴散特性會形

成較佳的附著效果，但其不同原子類型之間的擴散係數 (Kirkendall 效應) 差異性則會導致孔洞產生，而有降低界面的鍵結力的傾向存在⁽³⁾。理論上，同一材質的薄膜與基板 (相同純度與相同密度) 之間的界面是不存在的，因此對薄膜的殘留應力而言，鍵結外應力是可以不考慮在薄膜應力之內的。

3. 熱應力

此類應力模式是沈積薄膜的最主要應力來源，此由薄膜與基板之間的熱膨脹係數 (thermal expansion coefficient, TEC) 所影響。在濺鍍反應中，由於基板位置承受二次電子的轟擊加熱，因此金屬薄膜、基板與基板承載部位三者間的熱傳特性，深受基板承載部位的冷卻效能所影響，因此薄膜沈積溫度是薄膜應力的控制要素之一⁽⁴⁾。圖 2 表示薄膜在殘留張應力狀態下的薄膜 / 基板示意圖⁽³⁾，從外觀上視薄膜 / 基板為複合材料結構，此為

表 2. 金屬薄膜的一般特性與分析方式。

薄膜特性	測試機台
厚度	四點探針機、輪廓儀、SEM 橫截面量測
表面粗糙度	輪廓儀
電阻率	四點探針機
附著性	推力測試儀
組織結構	SEM (沉積表面、橫截面組織觀測)
殘留應力	X 光、輪廓儀
硬度	微硬度機

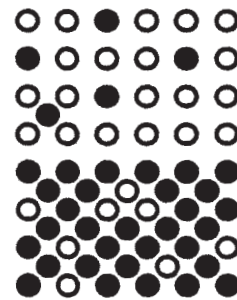


圖 1. 擴散型鍵結界面的微觀示意圖⁽³⁾。

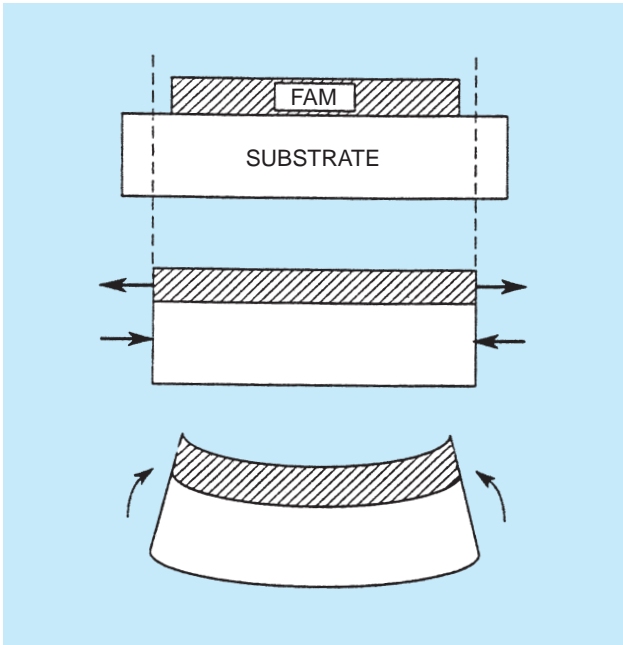


圖 2. 薄膜在殘留張應力狀態下薄膜 / 基板之示意圖⁽³⁾。

沉積薄膜的 TEC 大於基板者。圖 3 則表示薄膜在殘留壓應力狀態下薄膜 / 基板的外觀示意圖 (此為沉積薄膜的 TEC 小於基板)⁽³⁾。圖 4 表示薄膜應力的沈積條件要因圖，舉凡沉積溫度 (功率)、反應氣體流量、鍍層的結晶構造 (晶格常數、TEC、楊氏係數)、基板偏壓及薄膜厚度等沉積條件均會影響薄膜的殘留應力。一般而言，以濺鍍方式沉積的薄膜其電漿狀況與反應氣體 (Ar、N₂、) 等均會影響薄膜的應力分佈，因此薄膜承受的是張應力或是壓應力，端視製程參數而定。

在鍍層 / 基板的界面結構部位，若鍍層與基板的應力組合狀態過大而超過界面鍵結能力的最大承受範圍 (即薄膜的殘留應力過大)，則薄膜自然地從基板的沉積表面上剝落，因此鍍層薄膜的殘留應力量測除了可以做為其剝離 (peeling) 的傾向外，也可做為薄膜沉積的初步可行性判斷依據。

三、探針接觸式薄膜殘留應力的量測原理

薄膜殘留應力的量測主要依循 Stoney's 方程

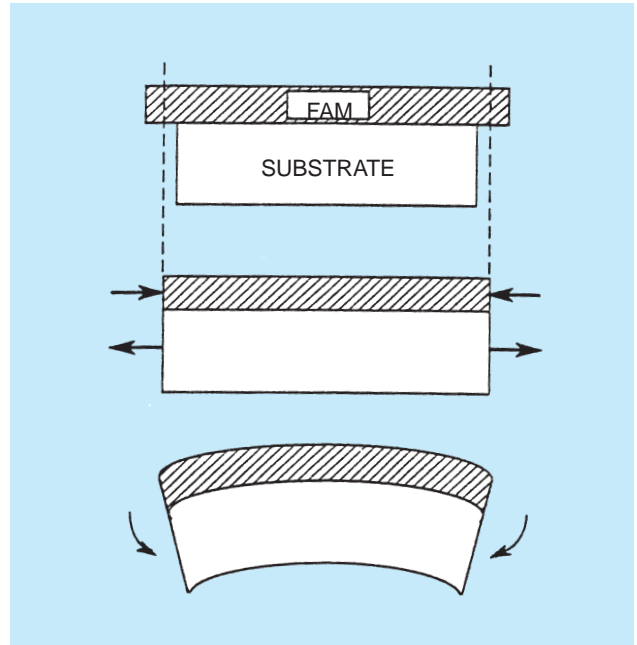


圖 3. 薄膜在殘留壓應力狀態下薄膜 / 基板之示意圖⁽³⁾。

式，基本上，此類型式的量測原理主要是憑藉著基板沈積薄膜前後的彎曲變形量來計算鍍層的薄膜應力，若於沈積反應前基板的彎曲半徑為 R_s (理想上基板為水平狀，即 $R_s = \infty$)，則在沈積薄膜後，基板將因薄膜應力而產生曲率半徑為 R_f 的彎曲變形，則薄膜應力即為薄膜沉積前後基板彎曲量衍生應變所導致的應力差值，以下式表示⁽⁵⁾：

$$\sigma = \frac{E_s T_s^2}{\sigma(1 \pm \nu) T_f} \left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_s} \right)$$

其中， E_s 為基板的楊氏係數， T_s 為基板的厚度， T_f 為薄膜的厚度， ν 則為 Poisson's ratio。

四、探針接觸式薄膜應力的量測機構

圖 5 為 Dektak V 200-Si 輪廓儀的控制流程圖⁽³⁾，其主要功能為量測圓平狀基板的鍍層膜厚及表面粗糙度，附屬功能則為量測殘留應力與影像比對分析。此型輪廓儀的接觸式探針頂端球頭使用硬度最高的鑽石材質，依需要可搭配直徑為 sub-

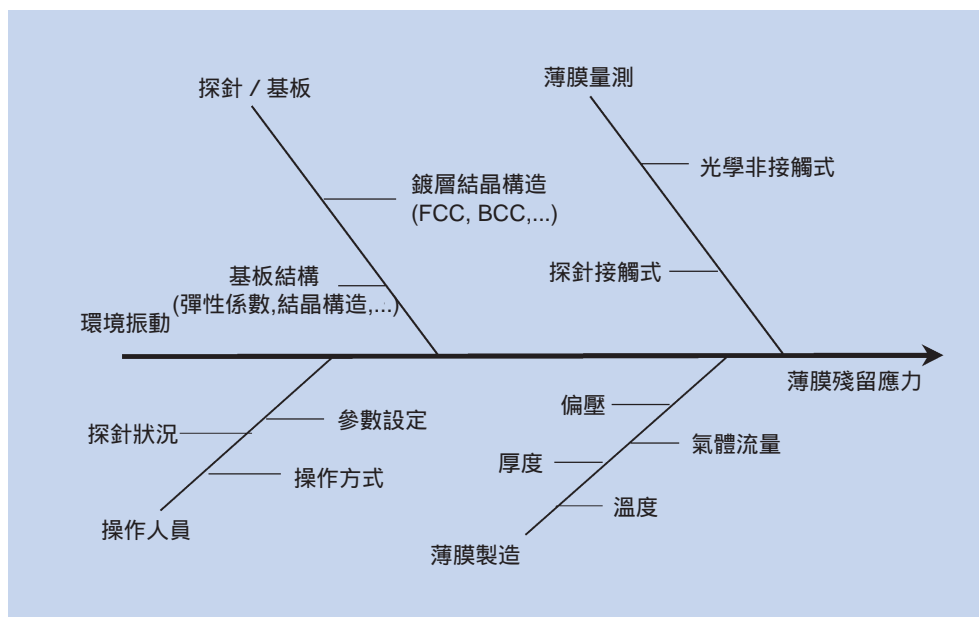


圖 4. 薄膜應力的沈積條件要因圖。

micron、2.5 μm 、5 μm 、12.5 μm 與 25 μm 的探頭，其中 12.5 μm 為標準配備，探針荷重設定範圍為 MIF (minimum inertia force) 至 30 mg，通常若探針的頂端半徑越小，則根據「壓力 = 外力 / 面積」得知，在探針承受固定的負荷下，試片所承受的

應力將越大，因此探針負荷要有適當的設定值，即使用最大荷重 30 mg 對金屬鍍層進行長距離掃描，藉由雷射微粒表面分析可知（微粒直徑下限設定為 0.1 μm ），並不會出現刮痕 (scratch)。雖然如此，但在執行殘留應力的掃描測試時，探針直徑、探針負

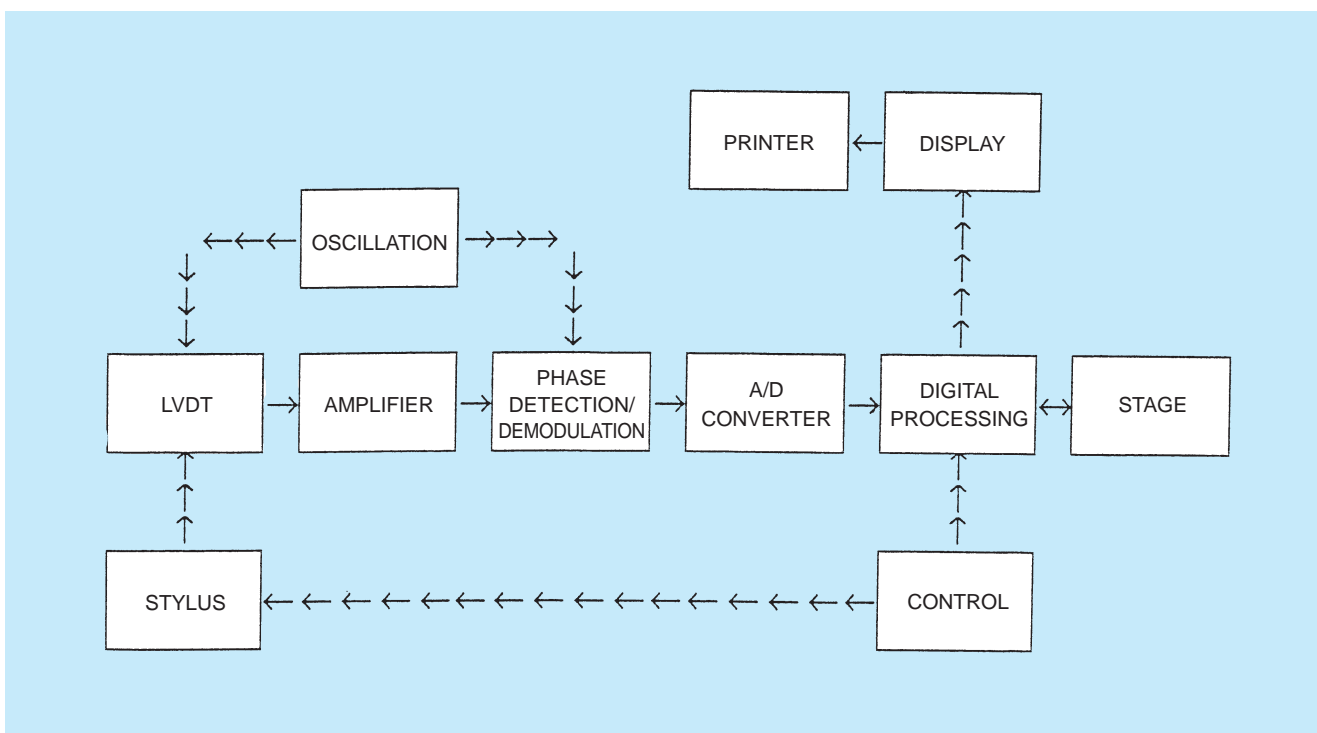


圖 5. Dektak V 200-Si 輪廓儀的控制流程圖⁽⁶⁾。

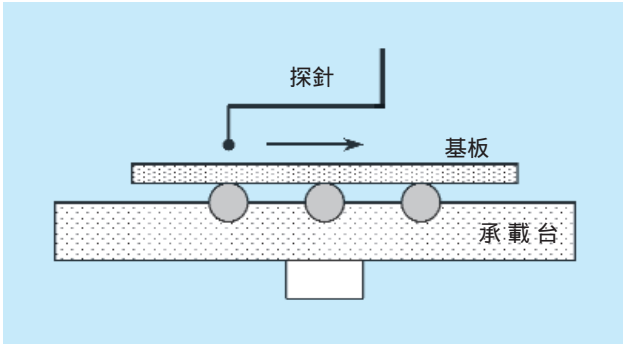


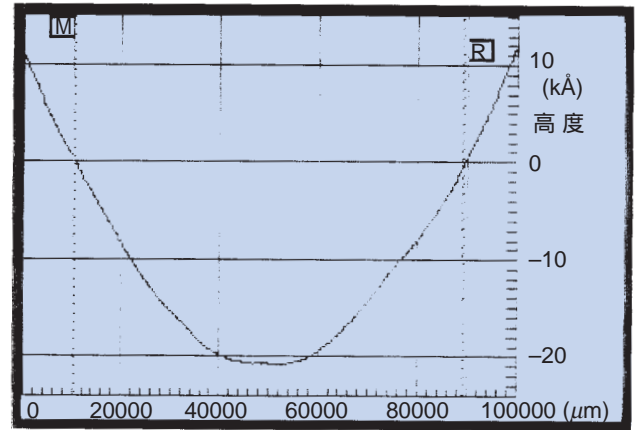
圖 6. 基板 / 基板承載台 / 鋼珠三者間的位置示意圖。

表 3. 基板的彈性係數⁽⁶⁾。

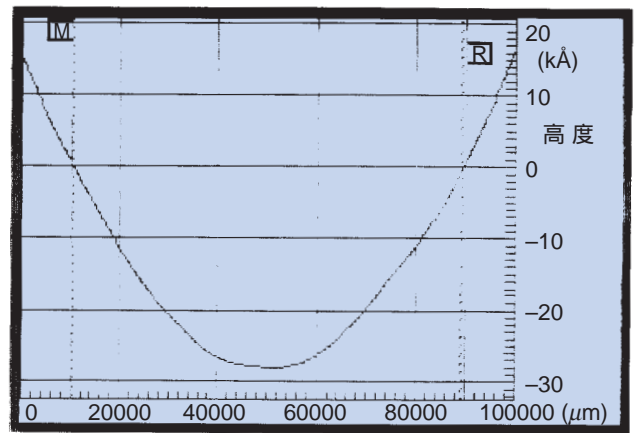
單位： 1.0×10^{12} dyne/cm²

#	基板面結晶方向	彈性模數
1	Si [111]	2.2900
2	Si [100]	1.8050
3	GaAs [111]	1.7410
4	GaAs [100]	1.2390
5	Ge [111]	1.8370
6	Ge [100]	1.4200
7	Al (polycrystalline)	1.0300
8	Phosilicate Glass (amorphous)	9.8800
9	Borosphosilicate Glass (amorphous)	1.5000
10	Sodalime Glass (amorphous)	0.9730
11	Sodalime Float Glass (amorphous)	0.9103
12	Corning 7059 (amorphous)	0.9444
13	Corning 7740 (amorphous)	0.7875
14	Fused Quartz (amorphous)	0.8795

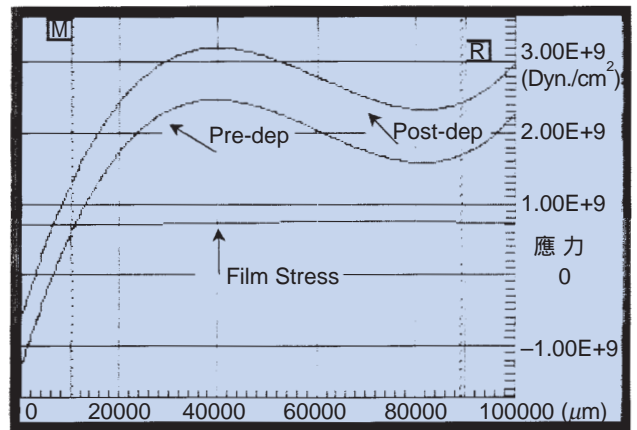
荷、掃描速率與掃描長度等掃描參數必須一起考慮，以求得較佳的量測條件。另外，吸附基板的低度真空亦必須關閉，以避免基板背面的真空吸力造成基板局部凹陷而影響其殘留應力的量測，且探針接觸薄膜表面進行掃描時的基板些微滑動也必須注意（可藉著配合探針掃描方向以程式控制來儘量降低基板的滑動量）。為減少測試平台的真空孔洞吸力對基板的下吸凹陷之額外影響，因此以三顆 0.25 inch 的鋼珠形成等邊三角平面來支撐基板，以 AFBMA/ANSI 的等級 Grade100 而言，此鋼珠的直



(a) 掃描距離



(b) 掃描距離



(c) 掃描距離

圖 7. (a) 基板沈積前的掃描示意圖，(b) 基板於沈積薄膜後的掃描示意圖，(c) 基板沈積前的應力曲線、沈積後的應力曲線與薄膜的應力曲線等三條應力分布曲線。

徑偏差為 $2.5 \mu\text{m}$ (此值同 ASTM E18-94 裡所規定的 Rockwell 硬度壓痕器的直徑允許誤差量)，圖 6 為基板 / 鋼珠 / 基板承載台三者間的位置示意圖。測試前先量測未沈積的基板彎曲量，再儲存其值，待基板沈積薄膜之後，再使用與測試前相同掃描參數的掃描路徑，然後進入應力分析程式裡輸入基板的彈性係數 (參看表 3)、沈積薄膜的厚度與基板的厚度 (假定薄膜沈積前後的基板厚度為固定值)，藉此三項輸入值，再聯合未沈積之前的基板掃描資料檔，即可獲得下列三條的應力分佈曲線：沈積前的應力曲線 (pre-deposition curve)、沈積後的應力曲線 (post-deposition curve)、薄膜的應力曲線 (film stress curve) 及薄膜殘留應力的應力類別 (張應力或壓應力) 與極大值、極大值與平均值。

圖 7(a) 所示即為基板沈積前的掃描示意圖，其幾何輪廓理想上為水平，但一般常見者為凸出狀與凹入狀，尤以凹入狀最為常見。圖 7(b) 所示則為同一片基板於沈積後的掃描示意圖。圖 7(c) 所示即為基板沈積前的應力曲線、沈積後的應力曲線與薄膜的應力曲線等三條應力分佈曲線。此時圖 7(a) 與圖 7(b) 的 Y 軸座標軸將由原先的高度單位 ($1,000 \text{ \AA}$) 轉變為應力單位 (dyne/cm^2)，但其 X 座標軸仍將維持原先的距離單位 (μm)，而由此圖亦可得知在薄膜任何位置的殘留應力值。除了可計算鍍層的殘留應力之外，也可以藉著通過基板中心的長

距離掃描來估計基板於沉積反應前後的彎曲量 (warpage)⁽⁶⁾ 大小，此即圖 7(a) 與圖 7(b) 的彎曲曲線的碗型底部分別與其水平線的最大差異值。

五、結論

濺鍍金屬薄膜除了薄膜的厚度與均勻性必須符合規格外，薄膜的剝離傾向與晶片的彎曲程度也可以當作沉積鍍層的初步可行性判斷依據。探針接觸型式的薄膜殘留應力量測，可以提供薄膜製程上沈積參數 (功率、流量、偏壓、厚度) 的設定參考，其量測上的快速與便捷更為其特點，而此輪廓儀的多功能性，包括薄膜厚度、表面粗糙度、基板彎曲量、殘留應力與影像對比等均可在同一機台上作業，而展現其一機多用的特性。

參考文獻

1. 許樹恩, X 光繞射原理與材料結構分析, 修訂版, 民全書局, 第 14 章 (1996).
2. 金重勳, 熱處理, 修訂八版, 復文書局, 513 (1991).
3. Milton Ohring, *The Materials Science of Thin Films*, 403 (1992).
4. 莊達人, VLSI 製造技術, 修訂四版, 38 (1998).
5. Y. G. Shen, *Effect of Deposition Conditions on the Internal Stresses and Microstructure of Reactively Sputtered Tungsten Nitride Films*, *Surface and Coatings Technology*, 239 (2000).
6. Veeco/Dektak V 200-Si 操作手冊.