

金屬薄膜之光學與機械性質研究

王奕翔¹ 何旭川¹ 蕭健男² 陳宏彬²

¹元智大學機械工程學系

桃園縣中壢市遠東路 135 號

²財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心

新竹市科學園區研發六路 20 號

摘要

光學系統常以金屬薄膜為反射鏡面，藉以改變光的傳播路徑或接收光訊號，如反射式望遠鏡、高效率發光二極體等。鋁（Al）和銀（Ag）為最常使用的金屬，並以玻璃或矽為支撐金屬薄膜的基板，由於金屬膜屬軟膜，常因使用中的擦拭而磨耗，需在金屬膜表面加鍍保護層。本文以電子槍蒸鍍技術，蒸鍍鋁和銀膜於 B270 之玻璃基板，並以二氧化矽（SiO₂）為保護層，同時為增加銀膜與 B270 基板之附著力，於 B270 基板表面蒸鍍鉻（Cr）。探討不同膜厚下的光學反射率及保護層對反射率之影響，求得最佳之金屬薄膜與保護層厚度，並將實驗量測值與理論計算值相比，獲得相當吻合的結果。再應用奈米壓痕機量測薄膜在不同厚度之硬度與楊氏係數，百格刀檢測薄膜與基板之附著力，藉以瞭解金屬薄膜之機械性質。

關鍵詞：電子槍蒸鍍，反射率，奈米壓痕機，機械性質

Optical and Mechanical Properties of a Metallic Layer

YI-HSIANG WANG¹, SHIUH-CHUAN HER¹, CHIEN-NAN HSIAO² and HUNG-PIN CHEN²

¹*Department of Mechanical Engineering, Yuan Ze University*

135 Yuan-Tung Rd., Chungli, Taoyuan, Taiwan 320 R.O.C

²*Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories*

20 R&D VI Rd., Hsinchu Science Park, Hsinchu, Taiwan 300 R.O.C

ABSTRACT

In an optical system using a metallic layer as a reflecting mirror, it is common to change the optical path. Aluminum (Al) and Silver (Ag) have been widely used for depositing on a silica-based substrate to form a thin metallic film. In this research, metallic films of Al and Ag are deposited on a B270 substrate by using the electronic-beam vapor deposition technique, being coated with SiO₂ on the top surface to protect the metallic film. The effects of the thickness on the reflectance are determined through a parametric study and validated by an experimental measurement. The influence of a protective layer of SiO₂ on the reflectivity is also investigated. The mechanical properties and adhesive strength of the metallic film are determined by nanoindentation and an attachment test, respectively.

Key Words: electronic-beam vapor deposition reflectance nanoindentation mechanical property

一、前言

金屬膜反射鏡常被用於改變光線的路徑及接收光信號上，例如：反射式望遠鏡、高效率發光二極體、太空衛星反射鏡等等...。光學系統多以玻璃或矽當成支撐金屬膜的基板，傳統的電子槍蒸鍍技術，所得到的是具柱狀微觀結構的薄膜 [2]，其堆積密度 (packing density) 在室溫下大約在 0.7。在大氣中薄膜內柱狀結構的孔隙會吸附水汽，改變原來的折射率與光學厚度而影響光學薄膜穩定性 [6]。金屬膜是屬於軟膜，因為使用中必須要擦拭，經不起摩擦，必須再加鍍一層保護膜，通常以氧化膜當保護層，優質的薄膜應有良好的機械性質。

本研究使用電子槍熱蒸鍍技術，蒸鍍鋁膜、銀膜、鉻膜、保護層，由於鉻機械強度好、化學性穩定，可增加銀膜與玻璃基板之附著性， SiO_2 是氧化物中膜性良好的最低折射率材料，不易分解、吸收與散射很小，在 160nm 到 $8\mu\text{m}$ 有良好的透明度，可做為鋁膜與銀膜之保護層。

本研究亦利用 Essential Macleod 光學薄膜設計軟體，針對所設計的薄膜進行計算分析與實驗值做比對。此外，為進一步了解金屬膜的機械性質，進行薄膜附著力與奈米壓痕實驗，並藉由奈米壓痕所得硬度與楊氏係數，探討壓痕深度對保護層的影響以及保護層在不同基材下硬度與楊氏係數的關係。

二、儀器設備與實驗

本研究之金屬膜與保護層皆由國家實驗研究院儀器科技研究中心之電子槍蒸鍍機所鍍成，基板材料為 B270 玻璃基板，金屬薄膜的靶材為鋁 (Al)、銀 (Ag)、鉻 (Cr)，保護層靶材為 SiO_2 。蒸鍍條件為室溫環境下，真空度維持在 8×10^{-6} (Torr) 以下，金屬薄膜蒸鍍速率維持在 30~40Å/S，保護層的蒸鍍速率維持在 15~20 Å/S。石英振盪器所顯示的膜厚與實際膜厚有所誤差，利用 FESEM 量測實際膜厚，將所得到的校正參數輸入石英振盪器以便獲得更精確的膜厚。

製作試片的過程，首先在 B270 玻璃基板上蒸鍍不同厚度的金屬薄膜，經由光譜儀量測後得到最佳反射率的金屬薄膜厚度。將最佳反射率的金屬薄膜厚度當作底層，在金屬薄膜上直接蒸鍍不同厚度的保護層。銀膜與基板之間加鍍鉻做為緩衝層，以增加附著性。

反射率量測方面利用分光光譜儀 (PERKIN ELMER) 量測可見光範圍 450~680 (nm) 反射率，硬度與楊氏係數則

由奈米壓痕機 (Nano indentation test) 使用 Berkovich 壓痕器所量測，壓痕速率設定為 0.1 (mN/S)、持壓時間總共為 10s。

三、金屬薄膜反射率

本研究以實驗量測和理論計算兩種方式求得薄膜光學反射率，再比較實驗值與計算值之差異。實驗部分是以光譜儀量測薄膜在可見光 (波長 450nm~680nm) 之反射率並計算其平均反射率。理論計算則是應用 Essential Macleod 光學薄膜設計軟體，此軟體是以導納軌跡法 (admittance loci) 之薄膜光學理論為基礎所發展出的分析軟體。

金屬薄膜垂直入射之反射率 [1]：

$$R = \left| \frac{1 - (n - ik)}{1 + (n - ik)} \right|^2 = \frac{(1 - n)^2 + k^2}{(1 + n)^2 + k^2} \quad (1)$$

由於光場強度會隨著光進入薄膜內所行進距離以指數關係衰減，所以 k 稱之為消光係數。而 Essential Macleod 光學薄膜設計軟體資料庫中儲存各種靶材的資料，包含靶材在相同厚度下不同波長所對應折射率 n 與消光係數 k 。

在 Essential Macleod 中輸入金屬薄膜所設計的膜厚後，接著 Essential Macleod 自動輸入其該單一波長的折射率 n ，及消光係數 k 至式 (1) 分析計算，得到單一波長之反射率，再集合 (波長 450~680nm) 的反射率取平均值做為計算值，接下來使用分光光譜儀 (PERKIN ELMER) 量測金屬反射率的實驗值，先設定量測可見光範圍 450~680 (nm) 內反射率入射角為 5° 。先量出參考鏡 R_f 之反射強度 I_1 ，再將參考鏡移到上面，另一邊則放置所要量測的試片 S ，而試片與參考鏡保持等距離，量得反射強度 I_2 ，反射率可求得如下：

$$R = (I_2 / I_1)^{\frac{1}{2}}$$

當金屬薄膜隨著膜厚增加時，薄膜的 n 值與 k 值會隨著膜厚增加而增加，不過當薄膜增加到某一程度的厚度時，即可視為塊材，其 n 值與 k 值會趨近一個穩定值，而所對應的反射率也會趨近於一個收斂值。將金屬薄膜的膜厚分成五種，每一種膜厚都取可見光波長 450~680 (nm) 的反射率平均值，比較金屬薄膜的計算值與實驗值的反射率，如表 1 所示，結果顯示銀膜平均反射率高於鋁膜。圖 1 和圖 2 分別

為鋁膜和銀膜在不同厚度實驗量測所得波長 450~680 (nm) 平均反射率，並與 Essential Macleod 軟體計算所得比較，結果顯示兩者相當吻合誤差多在 3% 內，誤差原因為實驗試片在鍍膜過程可能有其他雜質，而理論計算則不受雜質影響。

四、金屬薄膜加保護層反射率

利用先前實驗所得到最佳反射率的金屬薄膜厚度當做基材，在其金屬薄膜上蒸鍍不同膜厚的保護膜，由於保護膜材料特性限制，能影響波長的反射率範圍有限，在計算設計取參考波長 ($\lambda_0=550\text{nm}$)

$$\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_f & i(\sin \delta_f / \eta_f) \\ i\eta_f \sin \delta_f & \cos \delta_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha - i\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 代表了該單層膜的特性，因此稱之為薄膜的特徵矩陣，簡稱膜矩陣，設 $\alpha - i\beta$ 為金屬薄膜導納值

表1. 鋁膜與銀膜在不同膜厚實驗量測與軟體計算所得平均反射率 (波長450~680nm) 之比較

| 鋁薄膜 (Al) | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 膜厚(nm) | 10 | 30 | 54 | 104 | 140 |
| 計算反射率(%) | 68.06 | 89.83 | 91.37 | 91.44 | 91.44 |
| 實驗反射率(%) | 65 | 87.92 | 91.44 | 92.93 | 92.09 |
| 誤差(%) | -3.06 | -1.91 | -0.07 | +1.5 | +0.66 |
| 銀薄膜 (Ag) | | | | | |
| 膜厚 (nm) | 44 | 53 | 77 | 128 | 168 |
| 計算反射率(%) | 91.84 | 94.86 | 97.55 | 98.11 | 98.11 |
| 實驗反射率(%) | 82.65 | 97.92 | 99.59 | 99.91 | 99.75 |
| 誤差(%) | -9.19 | +3.06 | +2.04 | +1.8 | 1.64 |

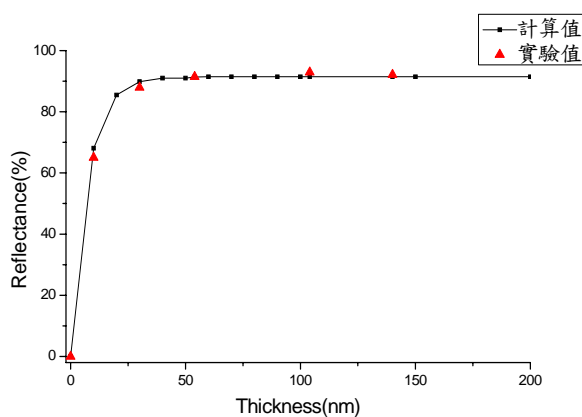


圖1. 鋁膜在不同厚度實驗量測與軟體計算所得平均反射率之比較

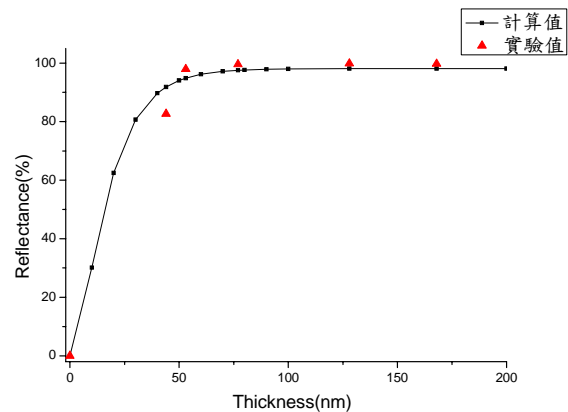


圖2. 銀膜在不同厚度實驗量測與軟體計算所得平均反射率之比較

(Admittance, $n-ik$), 導納值指的是系統中電磁波的磁場 (H) 與電場 (E) 之比 ($Y=H/E$), 鋁膜導納值在波長 550nm 時 $n-ik=0.76-i5.32$, 銀膜導納值在波長 550nm 時 $n-ik=0.055-i3.32$ 。光從表面進入到薄膜內所行進距離稱為相厚度 (phase thickness), $\delta_f=2\pi D_f/\lambda_0$ 為 SiO_2 相厚度, η_f 為 SiO_2 導納值 ($n=1.46$) 將其代入式 (2) 中計算導納值, 光學厚度 (D_f) 表示光在薄膜的膜厚內所行走的距離, 而光學厚度是由實際膜厚與折射率相乘而得 $D_f=nd$ 。

令 $\mu=H/E$ 為所求之導納值實部與實部相等, 虛部與虛部相等

$$\alpha \cos \delta_f = \mu [\cos \delta_f + (\beta \sin \delta_f) / \eta_f] \quad (3)$$

$$\eta_f \sin \delta_f - \beta \cos \delta_f = \mu (\alpha \sin \delta_f) / \eta_f \quad (4)$$

將式 (3) 除以式 (4), 可得相厚度 (δ_f)

$$\delta_f = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\beta\eta_f}{\eta_f - \alpha^2 - \beta^2} \right] + \frac{m\pi}{2} \quad m=0,1,2,3\dots$$

光學厚度 (D_f) 可表示為

$$D_f / \lambda_0 = (1/4\pi) \tan^{-1} \left[\frac{2\beta\eta_f}{\eta_f^2 - \alpha^2 - \beta^2} \right] + \frac{m}{4} \quad (5)$$

由於保護層的導納值是會隨著保護層的光學膜厚增加而改變, 沿著圓軌跡順時針方向移動, 求得使保護層達到反射率極大值的導納值, 根據 Park [5] 中所提供的計算方式, 求得導納值代入 (1) 式, 即可得最大反射率。式 (5) 為保護層導納軌跡與實軸相交的光學厚度, 第二個交點 ($m=2$)

的保護層光學厚度，可提升金屬薄膜外加保護層的反射率，再反求得實際保護膜厚度 (d)。

由於可見光範圍內各不同波長實驗量測與理論計算所得反射率均有所差異如圖 3 所示，為方便量化誤差本文以可見光範圍內平均反射率比較計算值與實驗值的差異。應用 Essential Macleod 計算鋁膜表面蒸鍍之二氧化矽保護層不同厚度對可見光反射率，再製作接近平均反射率極大與極小之三種不同二氧化矽光學厚度分別為 0.233、0.427 與 0.467，以光譜儀量測可見光平均反射率並與理論計算值比較，如表 2 與圖 4 所示，兩者相當吻合實驗值略小於計算值誤差在 4% 內。銀膜表面蒸鍍接近平均反射率極大與極小值之三種不同二氧化矽光學厚度為 0.215、0.329 和 0.465，以光譜儀量測可見光平均反射率並與理論計算值比較如表 3 與圖 5 所示，兩者相當吻合實驗值略大於計算值誤差在 2% 內。

五、奈米壓痕硬度與楊氏係數理論計算

奈米壓痕又稱為深度敏感壓痕 (depth-sensing indentation) 是一種使用程序簡便的檢驗方法。奈米壓痕量

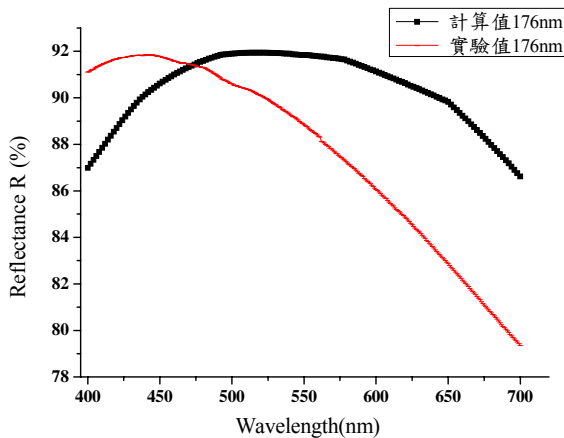


圖 3. 鋁膜表面蒸鍍保護層厚度 176nm 軟體計算與實驗量測所得可見光反射率之比較

表 2. 鋁膜表面蒸鍍 SiO₂ 保護層不同厚度實驗量測與軟體計算所得波長 450~680nm 平均反射率之比較

| | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| 鋁 (Al) 厚度(nm) | 124 | 157 | 143 |
| 保護層 SiO ₂ 厚度(nm) | 88 | 161 | 176 |
| SiO ₂ (nd/λ ₀) | 0.233 | 0.427 | 0.467 |
| 計算反射率(%) | 83.8 | 90.74 | 91.02 |
| 實驗反射率(%) | 82.57 | 89.84 | 87.43 |
| 誤差(%) | -1.23 | -0.9 | -3.59 |

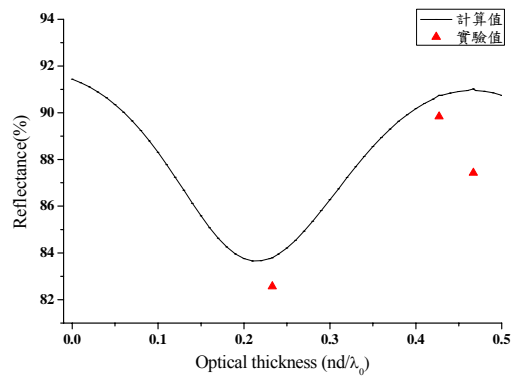


圖 4. 鋁膜表面蒸鍍不同保護層厚度實驗量測與軟體計算所得平均反射率之比較

表 3. 銀膜表面蒸鍍 SiO₂ 保護層不同厚度實驗量測與軟體計算所得波長 450~680nm 平均反射率之比較

| | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| 鉻 (Cr) 厚度(nm) | 110 | 88 | 77 |
| 銀 (Ag) 厚度(nm) | 155 | 108 | 126 |
| 保護層 SiO ₂ 厚度(nm) | 81 | 124 | 175 |
| SiO ₂ (nd/λ ₀) | 0.215 | 0.329 | 0.465 |
| 計算反射率(%) | 96.69 | 97.77 | 98.04 |
| 實驗反射率(%) | 97.95 | 99.31 | 99.26 |
| 誤差(%) | +1.26 | +1.54 | +1.22 |

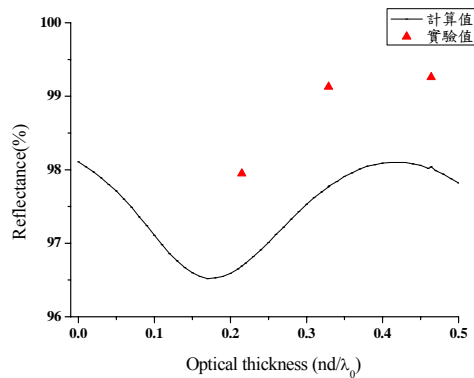


圖 5. 銀膜表面蒸鍍不同保護層厚度實驗量測與軟體計算所得平均反射率之比較

測技術使用極小外觀呈三角錐狀 Berkovich 鑽石壓痕器垂直壓入試片中，接著釋放負載產生微小的壓痕，並同時紀錄作用力與薄膜的塑性及彈性變形所造成位移曲線。圖 6 所示 (Oliver 和 Pharr [4]) 為典型之負載與壓痕深度曲線，由此關係曲線可求得楊氏係數和硬度。薄膜應用日漸漸通機械性質亦受到重視，奈米壓痕器檢測薄膜硬度與楊氏係數，為近幾年探討材料表面性質及薄膜相關特性的主要技術。

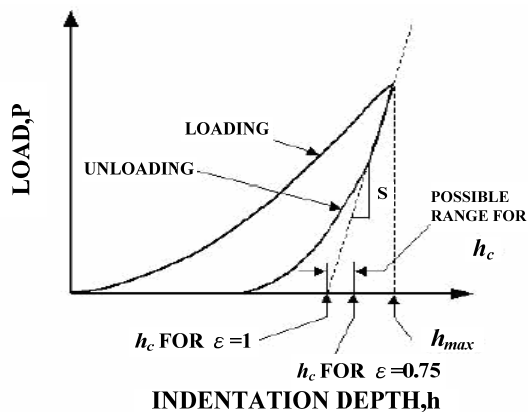


圖 6. 壓痕負載與深度關係曲線 [4]

使用奈米壓痕機時將所量測的試片以三秒膠黏貼在圓柱型載台，首先使用顯微鏡觀察試片表面確認表面平整再進行量測，量測結果會產生負載-位移圖，卸載曲線初始斜率是取卸載曲線前段的 20%，量測所得實驗數據包括接觸柔性 (C)、最大壓痕深度 (h_{max})、最大負載 (P) 以及硬度 (H) 與變形彈性模數 (E_r)，

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P}{S} \quad (6)$$

將奈米壓痕所量測到的數據代入式 (6) 計算卸載後接觸深度 h_c [4]，其中 h_{max} 為最大壓痕深度、P 為最大負載、卸載曲線初始斜率 S ($S=dP/dh$) 稱為接觸剛性、 ε 為幾何常數與壓痕器的形狀有關，對於三角錐 Berkovich 鑽石壓痕器 ε 為 0.75。

$$A = 24.5h_c^2 + \sum_{i=1}^8 C_i h_c^{\frac{1}{2^i}} \quad (7)$$

先計算出 h_c 而投影接觸面積 A 經由式 (7) 計算出壓痕器面積函數，第一項代表完美尖端的 Berkovich 壓痕器，第二項則描述尖端鈍化後壓痕器。投影接觸面積 A 求得後硬度 H 即可算出：

$$H = \frac{P}{A} \quad (8)$$

此硬度為負載下的投影面積，即在接觸深度 h_c 時施加材料上的平均壓力，受到壓痕器幾何形狀所影響，導出以下變形

彈性模數 (reduced modulus, E_r)：

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \quad (9)$$

其中 S 為接觸剛性，A 為接觸面積， β 為壓痕器幾何形狀相關常數 (Berkovich 壓痕器， $\beta=1.034$) [3]。

$$E = \frac{E_r E_i (1 - \nu_i^2)}{E_i + E_r (1 - \nu_i^2)} \quad (10)$$

將所得 E_r 值代入式 (10) 計算求得楊氏係數 (Young's modulus, E)，下標 “i” 為壓痕器 (indenter)，鑽石壓痕器的 $E_i=1141\text{Gpa}$ 、 $\nu_i=0.07$ ； E 與 ν 為所量測到試片的楊氏係數 (Young's modulus) 與浦松比 (Poisson ratio)，其中浦松比為薄膜塊材的理論值。

六、薄膜機械性質檢測

本文對薄膜機械性質之檢測包含附著性、硬度與楊氏係數，分述如下：

(一) 金屬薄膜之附著性

薄膜附著性檢測方式參考 ASTM D3359 規範，將薄膜表面以百格刀劃成方形網塊，撕取約 7.5 公分的壓力測黏性膠帶，將壓力測黏性膠帶貼在方形網塊的膜面上，確定膠帶與膜面間沒有氣泡，然後一手按住試片，另一手將膠帶以背對背的方式撕起膠帶在 3 秒內快速拉開，用放大鏡檢視薄膜表面的方形網塊區域。金屬薄膜試片在經過附著性測試之後觀察薄膜表面剝落的程度，ASTM D3359 規範依剝落程度，將附著性從最差到最佳區分為 0B~5B 共六個等級。實驗結果顯示鋁膜與玻璃基板附著性良好可達 5B 等級，而銀膜附著性為最差等級 0B，為改善銀膜附著性，加鍍鉻膜在金屬膜與基板之間，可以與基板形成較強的化學結合力，並與銀膜形成金屬鍵，檢測結果如表 4，可提高銀膜附著性至 4B 等級。

表 4. 金屬薄膜之附著性

| 基材 | Ag | Cr+Ag | Al |
|---------|-----|-----------------|-----|
| 膜厚 (nm) | 168 | Cr 50 Ag 162 | 140 |
| 附著性 | 0B | 4B | 5B |

(二) 二氧化矽保護層在不同材料之硬度

本文應用奈米壓痕機檢測奈米薄膜硬度，計算原理與方法如 5 節所述，探討二氧化矽在鋁膜、銀膜與玻璃基板等不同材料之硬度。玻璃基板表面先蒸鍍一層厚 143nm 鋁膜，再於鋁膜表面加鍍厚 176nm 之二氧化矽保護層，圖 7 為鋁膜外加保護層的不同最大壓痕深度所得負載與深度關係曲線，計算所得二氧化矽硬度，如圖 8 所示，壓痕深度比 h/t 從 0.25 增加至 0.75，硬度從 7.7GPa 下降至約 3GPa。

玻璃基板表面先蒸鍍厚 77nm 之鉻緩衝層，再將厚 126nm 銀膜鍍於緩衝層之上，再於銀膜表面蒸鍍厚 175nm 二氧化矽保護層，圖 9 為緩衝層（鉻）與銀膜外加保護層的不同最大壓痕深度所得負載與深度關係曲線，檢測所得二氧化矽硬度如圖 10 所示，壓痕深度比 h/t 從 0.25 增加至 0.75，硬度從 7.8GPa 下降至約 2.5GPa。

將厚 276nm 二氧化矽直接蒸鍍於玻璃基板，增加保護層厚度，可使量測得到較穩定可靠之結果。圖 11 為基板上

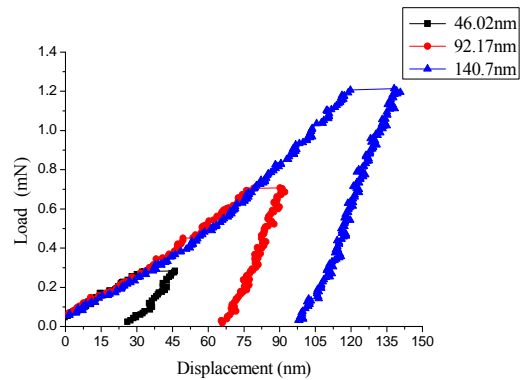


圖 9. 銀膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同最大深度所得負載與深度關係曲線

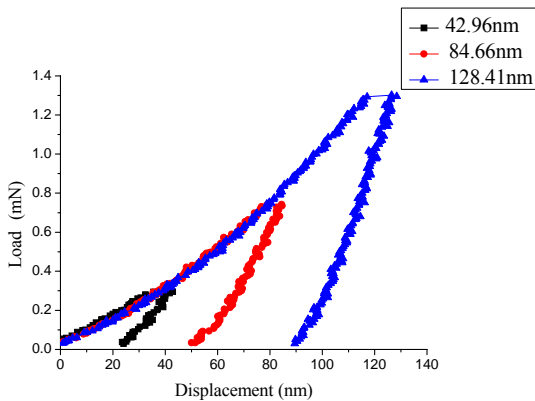


圖 7. 鋁膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同最大深度所得負載與深度關係曲線

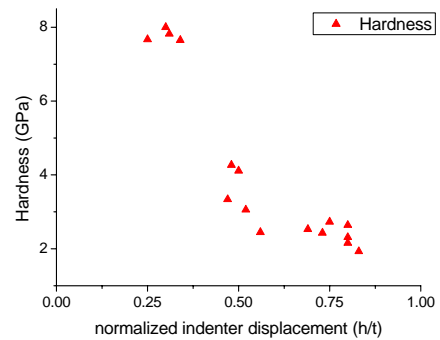


圖 10. 銀膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與硬度之關係

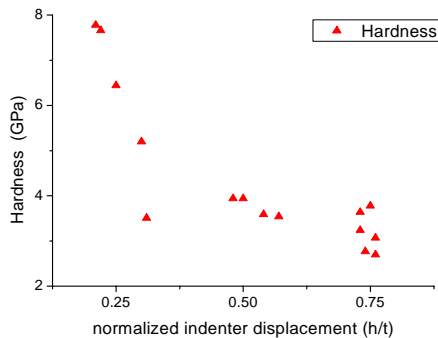


圖 8. 鋁膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與硬度之關係

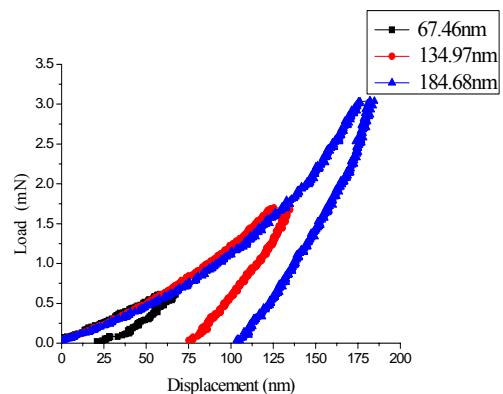


圖 11. 基板表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同最大深度所得負載與深度關係曲線

保護層的不同最大壓痕深度所得負載與深度關係曲線，檢測所得二氧化矽薄膜硬度如圖 12 所示，壓痕深度比 h/t 從 0.25 增加至 0.5，硬度從 7GPa 下降至約 3.5GPa，壓痕深度

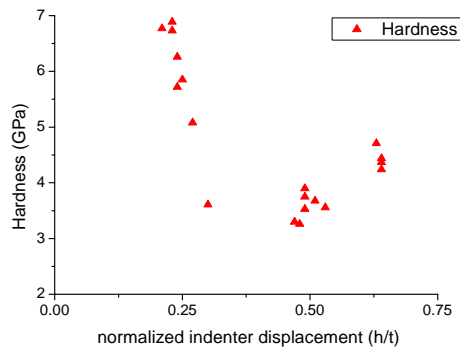


圖 12. 基板表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與硬度之關係

度比繼續增加至 0.65，硬度不降反升至約 4.5GPa，推測原因可能受到玻璃基板硬度較高約 6.5GPa 影響而上升。如表 5 所示，硬度隨著壓痕深度增加而減少，硬度是結合薄膜與基板的特性，壓痕深度較淺受試片表面粗糙度、氧化、雜質等因素影響，所得硬度較不穩定，隨著壓痕深度增加，逐漸表現薄膜真實材料性質，若繼續增加壓痕深度，來自基材之影響愈加明顯。

(三) 二氧化矽保護層在不同材料之楊氏係數

楊氏係數為薄膜重要機械性質，探討二氧化矽保護層在鋁膜、銀膜與玻璃基板等三種不同材料之楊氏係數。鋁膜厚 143nm 鍍上二氧化矽厚 176nm 做為保護層，在不同壓痕深度量測所得保護層楊氏係數如圖 13，結果顯示保護層楊氏係數並未隨著壓痕深度之變化而有明顯差異，大約維持在 45GPa。

銀膜厚 126nm 鍍上厚 175nm 之二氧化矽保護層，在不同壓痕深度量測所得保護層楊氏係數如圖 14，結果顯示保護層楊氏係數隨著壓痕深度之增加逐漸減少，從 50GPa 下降至 30GPa。玻璃基板鍍上厚 276nm 之二氧化矽，在不同壓痕深度量測所得二氧化矽楊氏係數如圖 15，結果顯示二氧化矽楊氏係數大約維持在 50GPa，唯當壓痕深度 (h/t=0.75) 接近玻璃基板，楊氏係數受基板材質影響向上提昇至約 60GPa。

表 5. 保護層在不同基材上之硬度值 (GPa)

| 基材 | 玻璃 | Cr+Ag | Al |
|---------------|------|-------|------|
| 壓深比 0.25(h/t) | 5.85 | 7.67 | 6.44 |
| 壓深比 0.5(h/t) | 3.90 | 4.11 | 3.94 |
| 壓深比 0.75(h/t) | 3.88 | 2.73 | 3.78 |

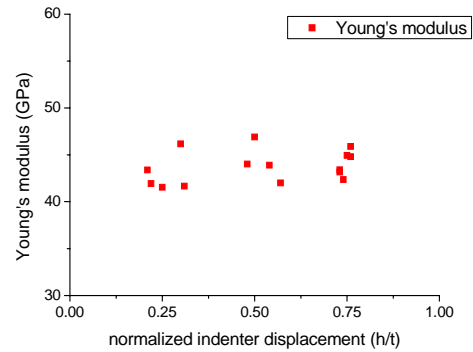


圖 13. 鋁膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與楊氏係數之關係

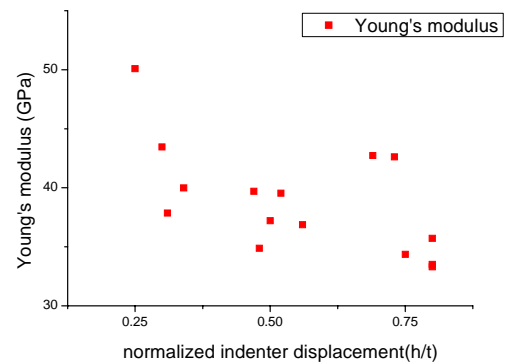


圖 14. 銀膜表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與楊氏係數之關係

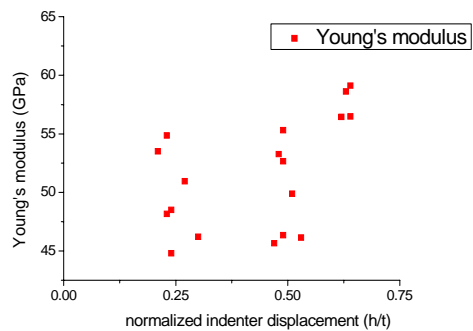


圖 15. 基板表面蒸鍍保護層奈米壓痕不同壓痕深度厚度比 (h/t) 與楊氏係數之關係

七、結論

二氧化矽保護層主要功能在防止金屬氧化與摩擦損壞，但却會減少金屬膜反射率且隨著二氧化矽膜厚不同而有差異。本文先以 Essential Macleod 求得最大反射率之二氧化矽膜厚，再以實驗量測鋁膜和銀膜表面蒸鍍二氧化矽保護層

之可見光反射率。比較理論計算和實驗量測所得可見光平均反射率如表 1、2、3 相當吻合，誤差多在 3% 以內屬實驗可接受之誤差範圍。可藉由選擇適當之二氧化矽厚度，使鋁和銀反射率受到影響最小，又能達到保護的目的。基板與銀膜之間蒸鍍鉻膜，可改善銀膜與基板之附著力，經檢測結果附著性由 0B 提升至 4B。薄膜硬度與楊氏係數隨著壓痕深度而有所變化，初始壓痕深度所得硬度與楊氏係數受表面粗糙度、氧化或雜質等因素影響較不穩定，並隨著壓痕深度增加而逐漸受基材性質之影響。比較二氧化矽在鋁、銀和玻璃三種不同基材所得薄膜硬度和楊氏係數，顯示基材為玻璃可得較高之硬度和楊氏係數，其次為鋁膜而基材銀膜所得硬度與楊氏係數最小。再比較玻璃，鋁膜和銀膜三種基材之硬度，依序為玻璃最大其次為鋁膜，最小為銀膜。說明基材硬度對薄膜機械性質具顯著影響，並隨著壓痕深度之增加而增加。

誌謝

本研究承蒙國家實驗研究院儀器科技研究中心提供電子槍蒸鍍機與光學量測設備，使研究得以順利進行。另外，感謝蕭健男老師及陳宏彬學長在光學理論與實驗儀器操作上的指導，以及邱柏凱學長在設備維護上所給予的幫助。

參考文獻

1. 李正中 (民 93)，薄膜光學與鍍膜技術，第四版，頁 149-150，藝軒出版社，台北。
2. Kaiser, N. and A. Zuber (1993) Evaluation of thin MgF_2 films by spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films*, 232, 16-17.
3. King, R. B. (1987) Elastic analysis of some punch problems for a layered medium. *International Journal of Solids Structure*, 23(12), 1657-1664.
4. Oliver, W. C. and G. M. Pharr (1992) An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiment. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564-1583.
5. Park, K. C. (1964) The extreme values of reflectivity and the condition for zero reflection from thin dielectric films on metal. *Applied Optics*, 3, 877-881.
6. Saxe, S. G., M. J. Messerly, B. Bovard, F. J. Van. Milligen and H. A. Macleod (1984) Ion bombardment induced retarded moisture absorption in optical thin films. *Applied Optics*, 23, 3633-3637.

收件：96.03.29 修正：96.06.01 接受：96.09.27