

非均向薄膜之光學特性研究

The Study of Optical Properties for Anisotropic Thin Film

任貽均、游竟維、林佳鋒

Yi-Jun Jen, Ching-Wei Yu, Chia-Feng Lin

本文使用方位角掃描技術製鍍非均向性光學薄膜，藉由基板來回掃描降低自我遮蔽效應的非均向性，以改善在垂直沉積平面方向發生扇形擴張的現象。鋁奈米柱陣列薄膜可以利用斜向角度沉積技術製鍍；這裡以高折射率稜鏡耦合非均向金屬膜的方式，探討並分析反射率在共振發生時的光學成因。此外，設計多層薄膜結構（稜鏡／均向薄膜／非均向薄膜／空氣），並旋轉非均向層的沉積平面，以調制寬波域反射光的橢圓率。

The phisweep technique is applied in coating anisotropic films. During the deposition, the periodical sweep of the substrate will improve the fan-out phenomenon. Aluminum (Al) nanorod arrays (NRA) thin film are prepared by oblique angle deposition (OAD). Anisotropic optical properties of the film are measured for polarized lights which the oscillating direction of electric field is perpendicular (*S*-polarization) and parallel (*P*-polarization) to the plane of the incidence. The attenuated total reflection (ATR) curves are measured for the prism/NRA/air system. The optical resonances of ATR are interpreted by ray tracing method to find that the *P* polarized resonance is associated with the surface plasmon resonance. The *S* polarized resonance occurs because the destructive interference becomes obvious at the oblique incidence. Moreover, the polarization state of the reflected light is modulated by rotating the deposition plane of the anisotropic MgF_2 layer in the prism/isotropic film/anisotropic MgF_2 film/air system.

一、前言

光學薄膜是指在光學元件上或獨立的基板鍍上一層或多層的介電質薄膜、或金屬膜、或介電質膜與金屬膜組成的膜堆，以改變光波傳遞的特性。近年來隨著光電產業的蓬勃發展，光學薄膜已被廣泛地應用在各種產業的光學元件上。由於不同的光學薄膜理論與設計方法相繼提出，使得新穎的光學元件能被製造，這意味著需要更先進的光學鍍膜技術

來提供高品質的薄膜及降低製程的困難度。藉由回顧斜向沉積技術的發展及薄膜的生長機制對於微觀結構的影響，進而了解薄膜結構對於光學現象的影響。

斜向沉積 (GLAD) 是製造薄膜的技術，以物理汽相沉積 (PVD) 為基礎，利用斜向入射的蒸鍍通量和控制基板的運轉方式能夠製鍍不同型態的薄膜結構。有別於垂直入射的沉積方式，斜向入射的沉積方式製鍍出的薄膜擁有獨特的物理特性，像是非

均向性的磁性、電性和光學特性，所以使得斜向沉積方式製成的薄膜被廣泛的研究和應用。其中以非均向性的光學特性應用於光學元件最令人感興趣，這是均向性的光學薄膜無法達成的。非均向性的光學薄膜已經有不同的應用，像是太陽能電池、非均向性的抗反射膜、雙折射的全方向反射鏡、三維光子晶體、氣體感測器及濾光片等元件已被製造和應用⁽¹⁻⁶⁾。

非均向性薄膜會展現不同的光學特性是因為結構的關係。在低原子移動率的條件下，蒸鍍通量入射到傾斜的基板會讓薄膜生長出朝著蒸鍍源方向的柱狀結構，如圖 1 所示，其中沉積角 α 定義為蒸鍍通量的入射方向與基板法線的夾角，柱狀傾斜角 β 定義為圓柱的生長方向與基板法線的夾角，沉積平面則是定義為蒸鍍通量的入射方向與基板法線構成的平面，因此研究薄膜結構與光學特性的關係很重要，因為使用斜向沉積技術能控制薄膜結構和光學特性。將基板傾斜放置，使得蒸鍍通量以斜向入射的方式沉積至基板上，由於基板在沉積期間靜止不動，薄膜在自我遮蔽效應的影響下會有柱狀結構的產生。這種靜態的斜向沉積技術最早起源要追溯到 1886 年德國科學家 Kundt 把可導電的金屬線放入真空腔體，在低壓的環境下藉著電弧 (electric arc) 將金屬線蒸鍍到傾斜放置的基板上⁽⁷⁾，並且在光學實驗中發現了薄膜的雙折射特性會隨著孔隙率而變化。

在 1950 年 Helwing 等人使用穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscopy of shadow-cast

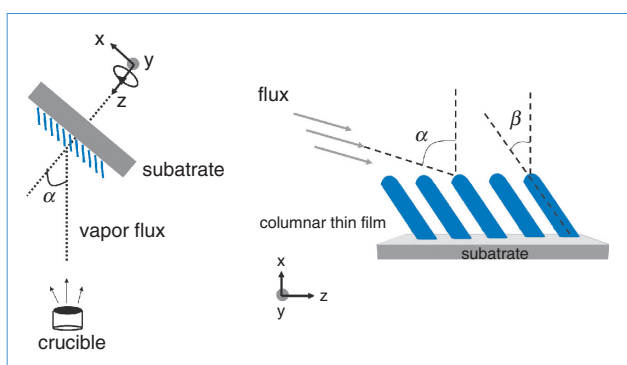


圖 1. 斜向沉積技術架構與沉積角和柱狀傾斜角關係示意圖。

replica specimen) 觀察斜向沉積技術製成的鋁 (Al)、鉑 (Pt) 及氧化鎢 (WO_3) 薄膜的微觀結構，推斷出有原子的自我遮蔽效應 (self-shadowing effect) 在斜向沉積的過程中，造成薄膜有柱狀結構⁽⁸⁾。1953 年 Holland 以鋁為材料，在沉積角大於 80 度下製成出散光反射板 (diffuse reflector)，以自我遮蔽效應和柱狀結構的表面粗糙度為基礎解釋了元件的特性。因此光學鍍膜工程從研究偏振光透過介質膜結構的特性，拓展到研究金屬膜的表面反射和散射⁽⁹⁾。

在 1959 年 Smith 發現 Ni-Fe 薄膜具有非均向性的磁性行為，打開了磁性儲存元件技術的開端⁽¹⁰⁾。在 1959 年 Knorr 和 Hoffmann 證明 Fe 和 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜在斜向沉積的生長有單軸非均向性的磁性⁽¹¹⁾。在 1966 年 Nieuwenhuizen 和 Haanstra 由電子顯微鏡觀察證實了斜向沉積薄膜的微觀結構是由朝蒸鍍源方向生長的傾斜柱所組成，並提出經驗公式 tangent rule 來描述沉積角與柱狀傾斜角的關係⁽¹²⁾。

在 1996 年 G. B. Smith 以鉻 (Cr) 為材料製成出鉻奈米柱陣列薄膜⁽¹³⁾，並量測偏極光在不同入射角的透射率。當以 P 偏極光斜向角度入射非均向薄膜時，對稱基板法線兩端的透射率並不相同；當薄膜的沉積平面與入射光入射平面重合時，此斜向柱狀結構為一單軸晶體 (uniaxial crystal)；以 P 偏極光斜向入射非均向金屬薄膜時，入射光在薄膜中的波向量 (wavevector)，在對稱基板法線的兩個方向上並不相同，而造成透射率的不對稱性。在 1997 年 T. Otitu 和 G. A. Niklasson 等人探討了鎳 (Ni) 奈米柱陣列薄膜的電氣特性⁽¹⁴⁾。在 2003 年 J. Lintymer 等人量測多層鉻奈米柱陣列薄膜的表面粗糙度、膜層的導電率及硬度⁽¹⁵⁾。在 2005 年 Y. Takeda 和 T. Motohiro 等人分別以金 (Au)、鋁 (Al) 及銀 (Ag) 等五種不同的金屬材料，以斜向角度沉積技術蒸鍍在玻璃 (glass) 及塑膠 (PMMA) 基板上，並比較以偏極光正向入射薄膜的透射率差異。金屬的材料與基板影響了 P 偏極光與 S 偏極光的透射率；當選用鋁為材料、PMMA 為基板時，P 偏極光與 S 偏極光的透射率差異為最大，可作為偏極元件上的應用⁽¹⁶⁾。同年 Y. P. Zhao 和 S. B. Chaney 利用銀奈米柱陣列作為 SERS (surface enhanced

Raman spectroscopy) 的基板以提昇訊號強度⁽¹⁷⁾，並量測銀奈米柱陣列薄膜之光譜及偏極光對於薄膜的吸收曲線⁽¹⁸⁾。

現今光學薄膜應用單層與多層膜干涉技術開發許多光學元件，近期非均向薄膜光學現象也被進一步探討⁽¹⁹⁾，至今本實驗室利用非均向薄膜作為設計的開端，發展出新穎的光學元件，例如寬帶、窄帶偏極轉換濾光片⁽²⁰⁾，以雙層薄膜達到所需波域下 $S(P)$ 偏振態入射至薄膜，反射可為 $P(S)$ 偏振態。首先，討論單層薄膜 BK7-稜鏡／非均向薄膜／空氣，沉積平面角 $\delta = 90^\circ$ ，針對在全反射中的特定入射角，厚度在 800 nm 以上，在薄膜干涉的偏極轉換效率可達極高^(21, 22)。藉此加入均向薄膜搭配非均向薄膜成為二層薄膜，BK7-稜鏡／非均向(均向) 薄膜／均向(非均向) 薄膜／空氣，調制均向折射率的高(低)，可調制出窄帶(寬帶) 偏極轉換濾光，且轉動沉積平面角 δ 從 90° 旋轉到 0° 時，偏極轉換效率也會隨之遞減。利用偏極轉換現象，本文以雙層薄膜(稜鏡／均向薄膜／非均向薄膜／空氣)，整理寬帶反射型橢圓率的光譜強度、平整度與橢圓傾角，對於搭配不同的均向與非均向薄膜的折射率、厚度、柱狀傾角與入射角的現象。

二、利用方位角掃描技術雕刻非均向性光學薄膜

為了能有效解決靜態的斜向沉積技術對於薄膜製鍍的限制及薄膜結構上的生長不均勻，也就是 β 和孔隙率同時被 α 控制，及扇形擴張現象，本文利用方位角掃描技術，期望透過動態的斜向沉積技

術－方位角掃描技術，製鍍出比靜態的斜向沉積技術更理想的非均向薄膜。

1. 扇形擴張的改善

在沉積過程中，靜態的斜向沉積技術將基板保持固定不動，使得自我遮蔽效應只會發生在平行沉積的平面方向，造成薄膜結構會在垂直沉積平面方向產生扇形擴張的現象。隨著薄膜厚度的增加，扇形擴張的現象會越來越嚴重，造成傾斜柱結構在垂直沉積平面方向的空間逐漸變小，最後與鄰近的傾斜柱連在一起。這種不理想的薄膜結構對於使用靜態的斜向沉積技術是無法避免的。

方位角掃描技術有別於靜態的斜向沉積技術，是一種動態的斜向沉積技術。基板在沉積期間的來回掃描能破壞自我遮蔽效應不均勻的現象，使得自我遮蔽效應不再只固定發生於平行沉積平面方向，能改善傾斜柱會因為非均向性的自我遮蔽效應所造成的扇形擴張現象。

透過 SEM 觀察能夠更清楚上述的現象。由俯視圖 2 可以明顯看出靜態的斜向沉積因為基板固定不動，自我遮蔽效應只發生於平行沉積平面方向，隨著膜厚增加會使得扇形擴張的現象更加嚴重，白色的箭頭表示蒸鍍通量入射的方向，所以傾斜柱的截面積是橢圓，其長軸為垂直沉積平面方向 x ，短軸在平行沉積平面方向 y 。如圖 3 所示，以方位角掃描技術製鍍出的傾斜柱，因為基板方位角在沉積期間來回的掃描，能破壞自我遮蔽效應的不均勻，改善扇形擴張的現象，所以其截面積是近似圓形，柱與柱之間的孔隙較為明顯，也就是說傾斜柱是獨立分開的。

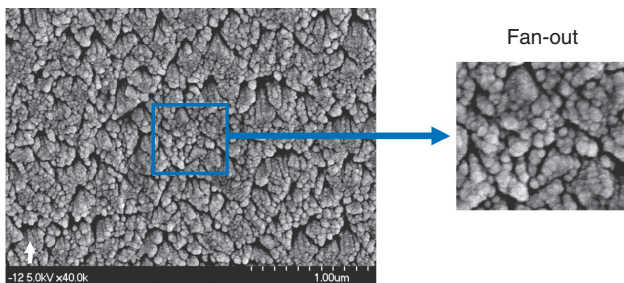


圖 2. 在 $\alpha = 75^\circ$ 使用 GLAD 製鍍出 $\beta = 45^\circ$ 的 MgF_2 柱狀薄膜之 SEM 俯視圖。

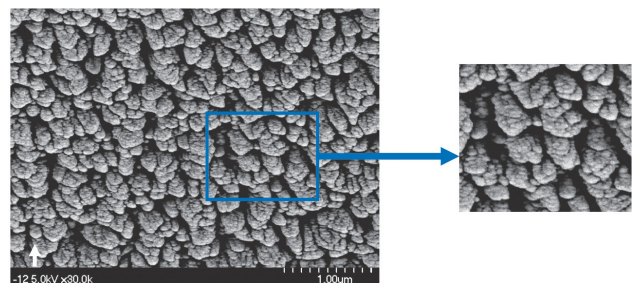


圖 3. 在 $\alpha = 85^\circ$ 、 $\gamma = 33^\circ$ 使用 phisweep 製鍍出 $\beta = 45^\circ$ 的 MgF_2 柱狀薄膜之 SEM 俯視圖。

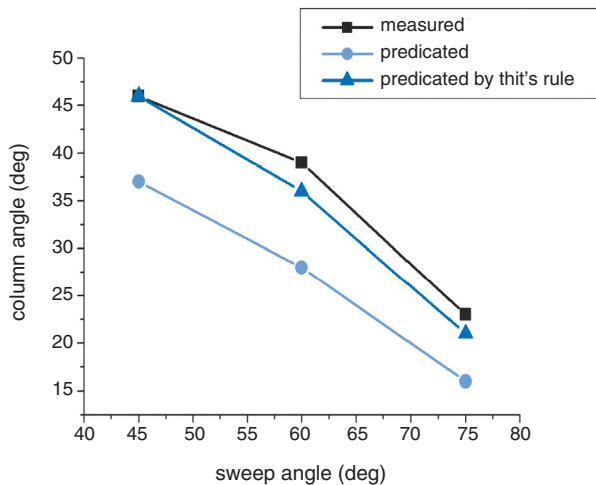


圖 4. 固定 $\alpha = 80^\circ$ 在不同掃描角下柱狀傾斜角量測與預測值之曲線圖。

2. 以方位角掃描技術調制柱狀傾角

方位角掃描技術能將薄膜的柱狀傾斜角和孔隙率分開處理，不再同時受沉積角的控制。基板在沉積期間的來回掃描(定義擺角為 γ ，在兩邊擺幅停止時間的沉積厚度為 q)，其功效由蒸鍍通量入射至動態基板的向量分析得知；引入掃描角使得薄膜的柱狀傾斜角和孔隙率能夠解耦合，不再單單因為沉積角決定後，兩者就同時被決定了。

在實驗製鍍的部分，利用方位角掃描技術分別在 $\alpha = 80^\circ$ 與相同的 $q = 30 \text{ nm}$ 下，搭配不同的 γ 來製鍍非均向性薄膜，基板的方位角有週期性的來回掃描，使得遮蔽效應方向改變，對於傾斜柱的生長會有中斷而不連續的現象，造成柱狀表面有不平滑的特徵。表 1 為固定 $\alpha = 80^\circ$ 搭配不同的掃描角下，實驗製鍍與理論預測柱狀傾斜角的差異。在實驗上使用方位角掃描技術調制柱狀傾斜角前，必須先了解所選擇的沉積角在 $\gamma = 0^\circ$ 時所製鍍出的柱狀傾斜角是多少，這等同於靜態的斜向沉積，可以用 Tait's rule 預測可能的柱狀傾斜角搭配不同的掃描角下求得相對應預測的柱狀傾斜角，可見表 1 的第五行。不過，Tait's rule 是由幾何關係導出的公式，雖然適用於物理汽相沉積下的各種蒸鍍材料，但是對於製鍍架構和蒸鍍材料的不同，公式的精確性還是有相當的誤差。

在上述狀況下，另一種使用公式的方法是將靜

態斜向沉積技術製鍍出的柱狀薄膜，在不同的掃描角下計算出預測的等效柱狀傾斜角，見表 1 的第四行。雖然這兩種使用公式的方法，預測值與量測值看起來都有相當的誤差，但可以得到兩項結論。經由掃描角的引入後，方位角掃描技術所製鍍出傾斜柱的傾斜角，必定會小於 $\gamma = 0^\circ$ 的柱狀傾斜角，並且柱狀傾斜角隨著掃描角越大而越小，實驗與理論兩者是相符的。從反推求出需要的掃描角度，由表格可以看到量測的傾斜角比預測的傾斜角大了許多，但是隨著掃描角變大，柱狀傾斜角的整體下降趨勢與理論值卻是相符的，如圖 4 所示，因此顯示方位角掃描技術有很強調制柱狀傾斜角的能力。

3. 方位角掃描技術調制折射率的能力

方位角掃描技術能將薄膜孔隙率和柱狀傾斜角解耦合，也就是說能製鍍出有相同柱狀傾斜角但擁有不同薄膜孔隙率的非均向性薄膜。在實驗中使用靜態斜向沉積分別在沉積角 $\alpha = 75^\circ$ 製鍍出 $\beta = 45^\circ$ 非均向性薄膜，其三主軸折射率 (n_x, n_y, n_z) 為 (1.252, 1.252, 1.281)；而使用方位角掃描技術 $\alpha = 85^\circ$ ，搭配 $\gamma = 59^\circ$ 和 $\gamma = 33^\circ$ 同樣製鍍出相對應的柱狀傾斜角，但三軸折射率卻改變為 (1.220, 1.220, 1.245)。由此可知，雖然有相同的柱狀傾斜角，但光學常數卻有相當大的差異，原因是薄膜孔隙率的不同，所以展現不同的光學常數。

三、鋁奈米柱陣列薄膜光學特性研究

鋁奈米柱陣列可以用斜向角度沉積法 (OAD) 達成。使用金屬材料作為蒸鍍源要製鍍出有結構的非均向薄膜並不容易，當斜向沉積角(基板法線與

表 1. $\alpha = 80^\circ$ 在不同的掃描角下，柱狀傾斜角量測與預測的值。

α ($^\circ$)	γ ($^\circ$)	Measured β ($^\circ$)	Predicted β ($^\circ$)	Predicted β ($^\circ$) by Tait's rule
80	0	47	N/A	55
80	45	46	37	46
80	60	39	28	36
80	75	23	16	21

蒸鍍源入射方向的夾角) 維持在大角度時, 才會有柱狀結構的產生。圖 5 及 圖 6 分別以鋁為金屬材料, 在沉積角度為 86 度、蒸鍍速率為 0.5 nm/s 時所製鍍出的鋁奈米柱陣列薄膜之 SEM 截面圖及俯視圖, 由截面圖可知其厚度約為 500 nm、柱狀傾角為 50 度。當柱狀結構的長度隨著厚度增加時, 在垂直於沉積方向上因為無遮蔽效應的關係, 柱子外形在此方向的直徑也會逐漸變大, 當長度成長至一定大小時會造成相鄰柱子黏在一起。

1. 偏極光透射光譜

以 P 偏極光與 S 偏極光正向入射薄膜厚度為 495.8 nm、沉積角度為 86 度之鋁奈米柱陣列, 其

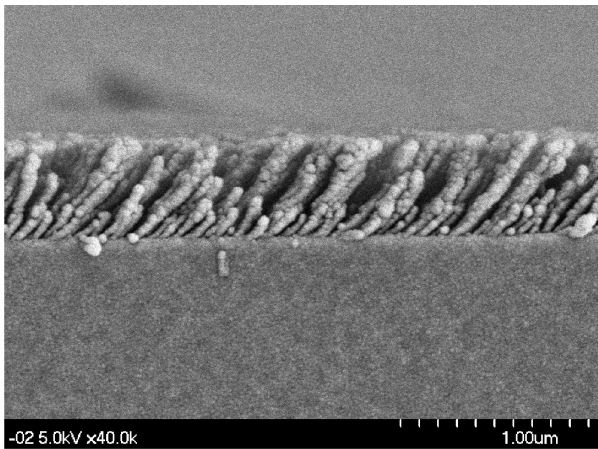


圖 5. 鋁奈米柱陣列薄膜的 SEM 橫截面, 厚度為 500 nm。

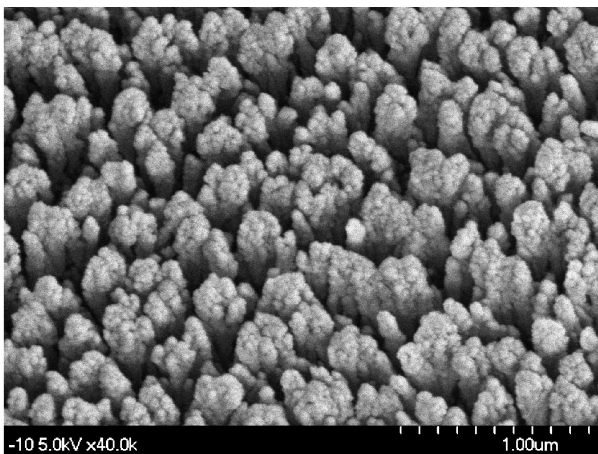


圖 6. 鋁奈米柱陣列薄膜的 SEM 俯視圖, 厚度為 500 nm。

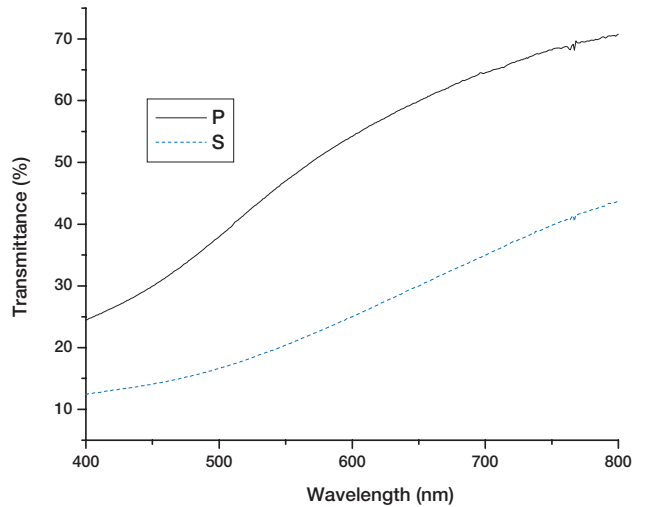
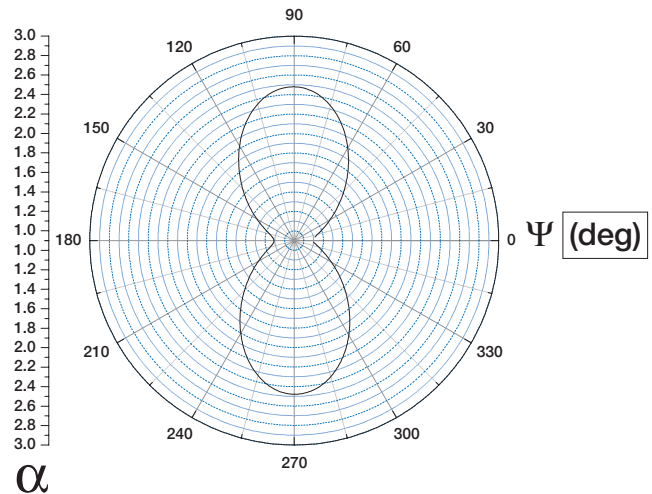


圖 7. 偏極光在鋁奈米柱陣列薄膜之光譜。



α

圖 8. 入射光偏極方向與吸收強度關係圖。

透射光譜如圖 7 所示。當波長為 632.8 nm 時, P 偏極光之透射率為 58.20%, S 偏極光之透射率為 28.32%, 其透射率差為 29.88%。因為金屬材料比介電材料多了一個消光係數 κ 的存在, 在金屬奈米柱陣列結構中 P 偏極光與 S 偏極光所看到薄膜的孔隙率並不相同, 而造成透射率的差異。

圖 8 為入射光在不同的偏振方向下, 正向入射厚度為 495.8 nm 的鋁奈米柱陣列薄膜之吸收曲線, 入射光的波長為 632.8 nm, 其中 Ψ 為入射光偏振方向與 P 偏極光方向的夾角, α 為透射率的指數部份衰減項。若入射光為 P 偏極光, 則吸收為最小; 若為 S 偏極光, 則吸收為最大。其透射強度

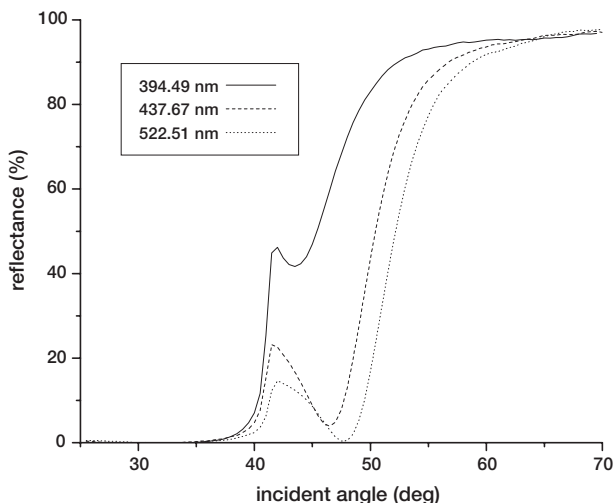


圖 9. 以 P 偏極光入射在不同薄膜厚度之 ATR 曲線。

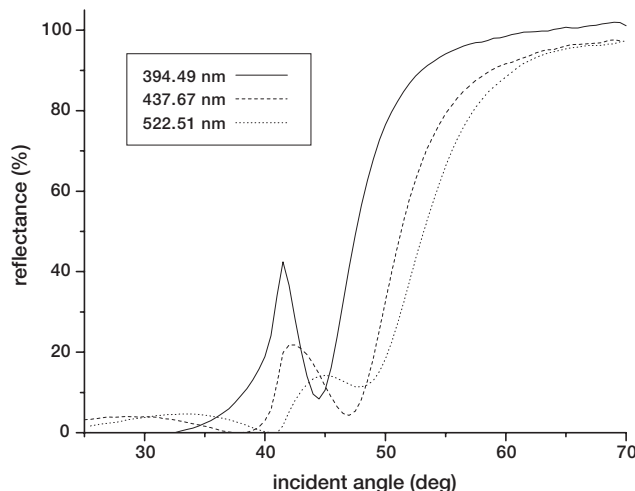


圖 10. 以 S 偏極光入射在不同薄膜厚度之 ATR 曲線。

差異可達 30%，最主要的原因為 P 偏極光所看到薄膜中的孔隙率較 S 偏極光來得大，所以其有效的消光係數較小，造成透射率較 S 偏極光高。

2. 全反射衰減曲線

將鋁奈米柱陣列薄膜耦合到高折率材料稜鏡，量測偏極光在「稜鏡／非均向鋁膜／空氣」系統的全反射衰減曲線 (attenuated total reflection, ATR)。當以 P 偏極光入射時，在薄膜厚度為 394.49 nm、437.67 nm 及 522.51 nm 的 ATR 曲線如圖 9 所示；全反射角之後的反射率分別在 43.38° 、 46.07° 及 47.44° 時有最小值存在，反射率分別為 43.97%、4.65% 及 0.40%。當以 S 偏極光入射時，在薄膜厚度為 394.49 nm、437.67 nm 及 522.51 nm 的 ATR 曲線如圖 10 所示；全反射角之後的反射率分別在 44.14° 、 46.62° 及 47.65° 時有最小值存在，反射率分別為 10.57%、5.90% 及 11.43%。

3. 介電質般的干涉現象

在「稜鏡／非均向鋁薄／空氣」系統下量測 ATR 曲線，不管是以 P 偏極光或者是 S 偏極光入射，都會有全反射衰減現象。在共振點下優化 ATR 曲線，可得到的鋁奈米陣列薄膜之有效光學常數。當薄膜的厚度為 394.49 nm 時， P 偏極光的消光係數 (index of extinction) 小於 S 偏極光的消光係數。

圖 11 與圖 12 為利用優化出來的光學常數，分別在不同厚度的共振角下，以 S 偏極光與 P 偏極光入射「稜鏡／非均向鋁膜／空氣」系統的反射光反射情形。因為非均向金屬膜具有消光係數 κ 的存在，由圖可知第一道、第二道反射光的強度遠大於第三道反射光，所以反射率被前兩道反射光所決定。不管是以 P 偏極光或者是 S 偏極光入射，在共振角下前兩道光都會有破壞性的干涉，而造成反射率最小值的產生，所以鋁奈米柱陣列在「稜鏡／鋁／空氣」系統中具有介電質般的干涉行為。

4. 表面電漿共振行為

式 (1) 為以 P 偏極光入射「稜鏡／非均向鋁膜／空氣」系統的反射係數，假設 $|F|$ 為反射係數分

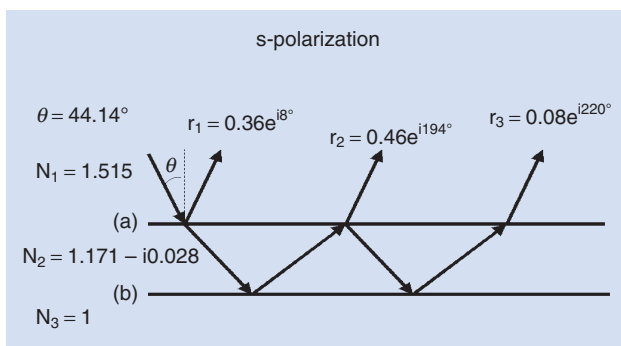


圖 11. S 偏極光在薄膜厚度為 394.49 nm 的反射示意圖。

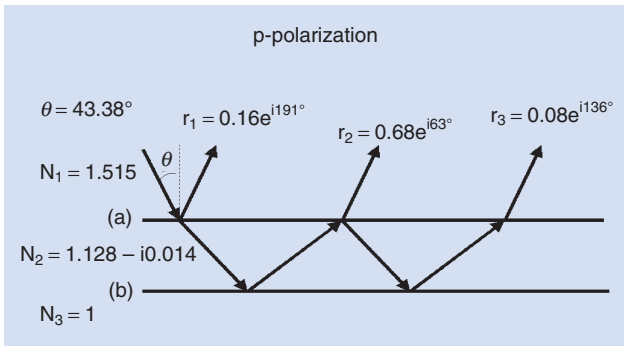


圖 12. P 偏極光在薄膜厚度為 394.49 nm 的反射示意圖。

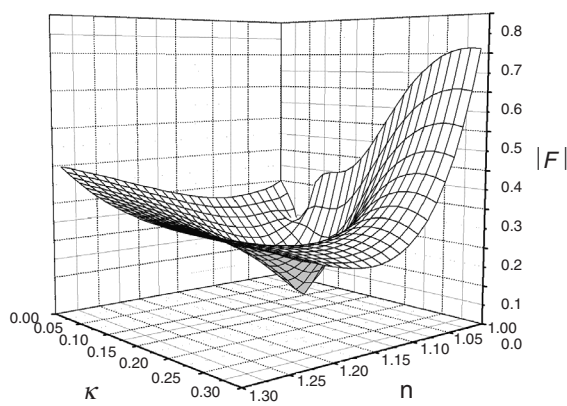


圖 13. $|F|$ 在共振角 43.38° 的收斂情形。

母項的絕對值，則當 $|F|$ 為零時滿足表面電漿共振條件。圖 13 為薄膜厚度 394.49 nm、 P 偏極光的共振角為 43.38° 時，反射係數分母項的絕對值與光學常數的關係分布。由圖可知，當光學常數為 $1.128 - i0.014$ 時，可收斂至 0.0034，所以鋁奈米柱陣列在「稜鏡／鋁／空氣」系統中具有如金屬般的表面電漿共振行為。

$$r_{123}^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p e^{2ik_2d}}{1 + r_{12}^p r_{23}^p e^{2ik_2d}} \quad (1)$$

四、利用「稜鏡／均向薄膜／非均向膜 MgF_2 ／空氣」多層膜組態調制反射光的橢圓率

寬帶反射型橢圓率的波域與強度由雙層薄膜的鍍膜參數所決定，製鍍以稜鏡 (isotropic cover

medium)／均向薄膜 (isotropic thin film)／非均向薄膜 (anisotropic thin film)／空氣 (isotropic substrate)，材料氟化鎂 (MgF_2) 以物理沉積法 (PVD) 斜向熱蒸鍍於玻璃基板上。如圖 14 所示，薄膜座標軸定義 (1, 2, 3)，柱狀傾角 φ ，入射光波與 z 軸角度稱為入射角 α ，入射光波與反射光波的平面稱為入射平面為 $y-z$ 平面，柱狀薄膜沉積平面為 2-3 平面，入射平面與柱狀沉積平面所夾的角度稱為沉積平面角 δ 。沉積角度為基板的法線與蒸鍍源的夾角 θ_v ，第一層為 0° ，第二層為 66° 。蒸鍍速率第一層 5 nm/s，第二層 0.6 nm/s。微觀結構以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察如圖 15 所示。量測採用 PSA (polarizer-sample-analyzer) 的橢圓儀架構，利用旋轉分析板 (rotating analyzer)，入射為 P 偏振光，量出反射光含有 S 偏振光與 P 偏振光兩者成分，求得橢圓傾角 θ_p 與橢圓率 $e^{(23)}$ 。

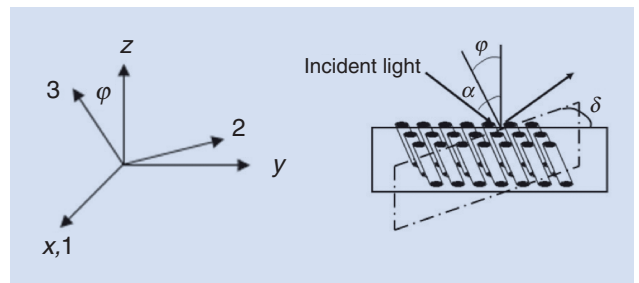


圖 14. 系統的空間座標 (x, y, z)，非均向薄膜三軸座標 (1, 2, 3)。

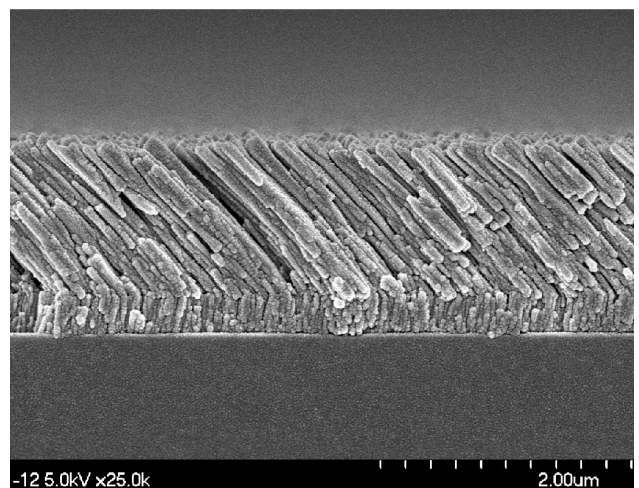


圖 15. 雙層 SEM 圖。

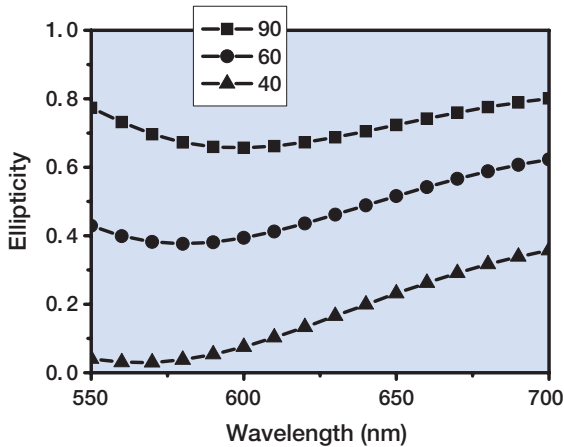


圖 16. 橢圓率變化圖，均向折射率為 1.363。

1. 均向 MgF_2 折射率對於反射光橢圓率曲線之影響

在「稜鏡／均向 MgF_2 ／非均向 MgF_2 ／空氣」系統下，旋轉非均向層 (MgF_2) 的沉積平面角 (the deposition plane angle δ)，可以調制各個波長反射光的橢圓率 (ellipticity)。當沉積平面角 δ 從 90° 旋轉到 0° 時，橢圓率會線性下降至 0，此時隨波長橢圓率曲線的平整度，主要為均向層 MgF_2 的折射率 (index of refraction) 所決定。圖 16 係入射光為 P 偏振光時，反射光的橢圓率隨波長 550 nm 至 700 nm 在 $\delta = 90^\circ$ 、 60° 及 40° 的變化情形；其中入射光入射角 (incident angle α) 為 59.45° ，入射介質層 (稜鏡) 的折射率為 1.515，均向薄膜 (MgF_2) 的折射率為 1.362、厚度 303.4 nm；非均向 MgF_2 的三個主軸 (principle axis) 折射率 n_1 、 n_2 及 n_3 分別為

1.314、1.312 及 1.330，薄膜厚度為 1560.8 nm、 $\varphi = 39.1^\circ$ 。當 $\delta = 90^\circ$ 時，波長在 550 nm 與 700 nm 的橢圓率大小分別等於 0.67 及 0.78；當 $\delta = 60^\circ$ 時，波長 550 nm 與 700 nm 的橢圓率差距達 0.23，此時橢圓率曲線並不平滑；當沉積平面角為 40° 時，橢圓率大小的差距更達 0.31。為了增加曲線的平整度，必須提高均向層的折射率。

2. 非均向層 MgF_2 對於反射光橢圓率曲線之影響

固定均向層參數，調制非均向層 MgF_2 光學常數以優化寬帶反射型橢圓率。一、調制厚度，找尋寬帶反射型橢圓率之適合的厚度範圍。橢圓率隨入射角、厚度，以中心波長 600 nm 作圖 17，找出在入射角 $\alpha = 58^\circ$ 、厚度在 800 nm—1200 nm，隨著厚度改變能維持高的橢圓率，再固定入射角 $\alpha = 58^\circ$ 對橢圓率隨厚度、波長作圖，如圖 18 所示。為了設計 550 nm—700 nm 波段的高橢圓率，則選定非均向層厚度 1000.6 nm，橢圓率在旋轉沉積平面角 $\delta = 90^\circ$ 、 50° 、 60° 時會明顯下降。

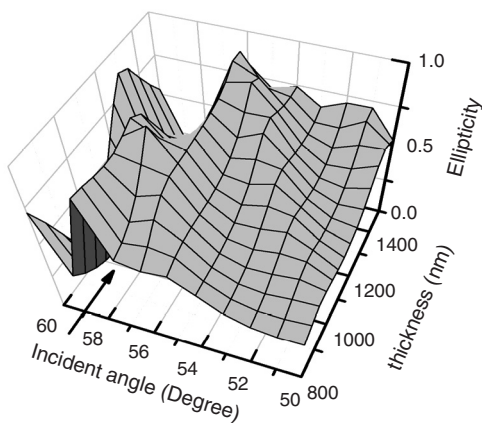


圖 17. 橢圓率對 α 及波長關係圖找出適當 α 。

五、結論

利用方位角掃描技術製鍍出氟化鎂的單層柱狀薄膜，基板的來回運轉改善了自我遮蔽效應的不均勻造成的扇形擴張現象。在實驗上製鍍了有相同柱狀傾斜角不同孔隙率的薄膜和有相同孔隙率不同柱

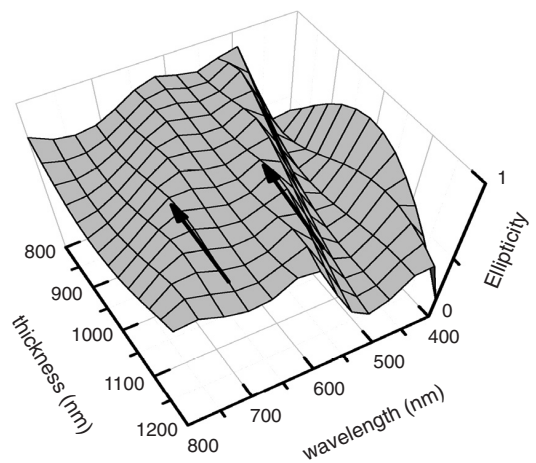


圖 18. 選定 500—700 nm 則厚度設計 1000 nm。

狀傾斜角的薄膜，驗證掃描角的引入，使得柱狀傾斜角和孔隙率能分開控制，並且透過光學量測驗證沉積角與掃描角的搭配能調制薄膜的光學常數。

以斜向角度沉積法製鍍的鋁奈米柱陣列薄膜，當 P 偏極光與 S 偏極光在波長為 632.8 nm 時的透射率差異可達 30%，以 Kretschmann 組態 (稜鏡/非均向鋁膜/空氣) 量測偏極光的全反射衰減曲線。 S 偏極光與 P 偏極光在斜向入射時有介電質般的干涉現象，而 P 偏極光在共振角下具有金屬般的表面電漿波。藉著 S 偏極光與 P 偏極光在全反射衰減曲線上的靈敏度，可以求得薄膜的光學常數。

在「稜鏡/均向/非均向 MgF_2 /空氣」多層膜組態下，當旋轉非均向薄膜的沉積平面時，若提高均向層折射率，可使橢圓曲線平穩下降。當柱狀傾角為 40° 時，降低非均向層的三個主軸折射率，可拓寬橢圓率曲線之波域，在應用上可作為調制反射光之偏極態的光學元件。

參考文獻

1. D. A. Gish, G. K. Kiema, M. O. Jensen, and M. J. Brett, *Materials Research Society Symposium Proc.*, **836**, 131 (2005).
 2. S. R. Kennedy and M. J. Brett, *Appl. Opt.*, **42**, 4573 (2003).
 3. S. R. Kennedy, *et al.*, *Photon. Nanostruct.*, **1**, 37 (2003).
 4. K. Kaminska and K. Robbie, *Appl. Opt.*, **43**, 1570 (2004).
 5. J. J. Steele, *et al.*, *Sensor Actuat. B-Chem.*, **120**, 213 (2006).
 6. A. C. V. Popta, M. M. Hawkeye, J. C. Sit, and M. J. Brett, *Opt. Lett.*, **29**, 2545 (2004).
 7. A. Kundt, *Ann. Phys. Chem.*, **27**, 59 (1886).
 8. H. König and G. Helwig, *Optik.*, **6**, 111 (1950).
 9. L. Holland, *J. Opt. Soc. Am.*, **43**, 376 (1953).
 10. D. O. Smith, *J. Appl. Phys.*, **30**, 2645 (1959).
 11. T. G. Knorr and R. W. Hoffman, *Phys. Rev.*, **113**, 1039 (1959).
 12. J. M. Nieuwenhuizen and H. B. Haanstra, *Philips Tech. Rev.*, **27**, 87 (1966).
 13. G. W. Mbise, G. A. Niklasson, and C. G. Granqvist, *J. Appl. Phys.*, **80**, 5361 (1996).
 14. T. Otti, G. A. Niklasson, P. Svedlindh, and C. G. Granqvist, *Thin Solid Films*, **307**, 245 (1997).
 15. J. Lintymer, N. Martin, J.-M. Chappe, P. Delobelle, and J. Takadoum, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 269 (2005).
 16. Y. Takeda, N. Takeuchi, T. Fukano, and T. Motohiro, *Appl. Surf. Sci.*, **244**, 209 (2005).
 17. Y. Zhao, S. Shanmukh, Y. Liu, S. B. Chaney, L. Jones, R. A. Dluhy, and R. A. Tripp, *Proc. of SPIE*, **6324**, 6324M (2006).
 18. S. B. Chaney, Z.-Y. Zhang, and Y.-P. Zhao, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 053117 (2006).
 19. I. Hodgkinson and Q. H. Wu., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **17**, 2928 (1999).
 20. Y.-J. Jen and C.-Y. Peng, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 041128 (2006).
 21. Y.-J. Jen and C.-L. Chiang, *Opt. commun.*, **265**, 446 (2006).
 22. Y.-J. Jen, C.-Y. Peng, and H.-H. Chang, *Optics Express*, **15**, 4445 (2007).
 23. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, Amsterdam: North-Holland, **8** (1999).
-
- 任貽均先生為國立中央大學光電科學博士，現任國立台北科技大學光電工程學系教授兼系主任。
 - 游竟維先生為國立台北科技大學光電工程研究所博士班學生。
 - 林佳鋒先生為國立台北科技大學光電工程研究所博士班學生。
 - Yi-Jun Jen received his Ph.D. in optics and photonics from the Institute of Optical Sciences of the National Central University. He is currently a professor and the chairman in the Department of Electro-optical Engineering at National Taipei University of Technology.
 - Ching-Wei Yu is a Ph.D. student in the Department of Electro-optical engineering at National Taipei University of Technology.
 - Chia-Feng Lin is a Ph.D. student in the Department of Electro-optical engineering at National Taipei University of Technology.