

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

捲對捲式濺鍍低輻射膜的精密光學監控系統研發

**Research of optical monitoring system on the roll-to-roll
sputtering system**

計畫編號：1032001INER011

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：李正中

聯絡電話：03-4263918

E-mail address：cclee@dop.ncu.edu.tw

核研所聯絡人員：詹德均

報告日期：103 年 11 月 28 日

目 錄

中文摘要	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	6
一、光學量測系統架設	6
二、光學薄膜基本理論	9
(一) 單界面之反射與透射	12
(二) 單層膜之反射與透射	15
(三) 多層膜之反射與透射	18
(四) 非相干性之反射與透射	19
三、廣波域光學監控系統	20
四、撰寫光學監控程式	20
參、主要發現與結論	22
肆、參考文獻	26

中文摘要

本計畫的目的是在捲對捲式濺鍍系統上架設一套高精密之光學監控系統，利用廣波域之穿透光譜來監控每層鍍製薄膜之光學特性，且在連續製程中分析比對光譜變化可以評估以及即時修正鍍膜參數，發揮光學監控真正效果，提高捲對捲式濺鍍系統之產能以及鍍製高再現性的低輻射薄膜。

關鍵字：捲對捲、濺鍍、光學監控

Abstract

This project aims to develop an optical monitoring system on the roll-to-roll (R2R) sputtering system. A real time broadband optical monitoring combined with a system set up for man-machine interface by LabVIEW software. Its advantage is to monitor optical properties of an individual layer by a broadband transmittance, and we can modify coating parameters by a real-time optical monitoring system to achieve a high production capacity and good reproducibility in the R2R sputtering process.

Keywords: roll-to-roll, sputtering, optical monitoring

作者及所屬單位

李正中^{1,2} 郭倩丞^{2,3} 李孟錡^{1,2} 江承翰^{1,2}

¹ 中央大學光電工程學系 ² 薄膜技術中心 ³ 中央大學能源工程研究所

壹、計畫緣起與目的

低輻射(Low Emissivity, Low-E)薄膜是由單層或多層的金屬和金屬氧化物交互堆疊而成的產品，其優點是同時具備在紅外波段有高反射率以及在可見光波段有高穿透率，近年來被研究應用在隔熱和抗紫外線等用途。在一般的太陽光之能量中，可見光部分不超過 50%，其餘的能量包含紫外線、紅外線其他射線，而 Low-E 薄膜主要是通過金屬和介質膜設計來阻隔太陽光能量中的紅外線與紫外線，而且保持可見光區有良好透光性。所以 Low-E 薄膜透過反射進入室內的熱量，而達到良好的節能效果，且兼具冬暖夏涼的功效，使用在熱帶地區或寒帶地區皆適宜。

目前 Low-E 膜大多都使用真空濺鍍技術來製鍍，如果要大量生產就必須依賴捲對捲式(Roll-to-Roll, R2R)濺鍍系統，其優點有較低的生產成本、低耗能以及高產能。R2R 濺鍍系統在生產過程中最關鍵的步驟之一是膜層品質的控制，在大量的生產過程中必須確保過程穩定性和再現性。所以在鍍膜過程中必須利用光學監控以確保穩定和高品質之薄膜，目前光學監控方式在製鍍光學薄膜的過程中，都是監測光在強度上的變化，也可以說是量測隨薄膜增長的穿透率或反射率變化，此方法又可分為單波長監控和多波長監控。傳統中常用的單波長光學監控法多為極值監控法(Turning Point Monitoring)[1-2]、定值監控法(Level Monitoring)[3]

和多波長之廣波域監控法[4-5]。而在 R2R 濺鍍系統上，利用光學監控來確保過程穩定性和再現性，不屬於即時監控，所以本計畫將利用多波長之廣波域監控法來監控鍍製薄膜的品質。

因此本計畫的目的是在捲對捲式濺鍍系統上利用微型光譜儀架設光學監控系統，並撰寫廣波域監控程式來監控鍍膜過程中樣品的光譜變化，藉由此技術在捲對捲式鍍膜設備中，有效的監控低輻射(Low-E)薄膜整體鍍膜過程以及分析判斷其鍍膜成果，即時調整鍍膜參數，而不需要等到破真空才知道整個鍍膜過程之結果。

貳、研究方法與過程

本研究主要以廣波域監控方法為架構來撰寫監控程式，監控多波長的穿透率變化，建立即時光學監控鍍膜系統，能監控和自動判斷每一層的品质，以輔助人工鍍膜。如果完全依賴人工鍍膜，則不容易即時判斷，造成鍍膜厚度的誤差。記錄鍍膜過程中，廣波域光譜隨時間之變化，藉由此技術可以在捲對捲式鍍膜設備中，有效的監控薄膜整體鍍膜過程以及分析判斷其鍍膜成果，如果有問題可以馬上做修正，提高產能和獲得高品質的 Low-E 薄膜。

一、光學量測系統架設

在 R2R 濺鍍系統上建立廣波域之光學監控系統，必須先架設線上穿透光量測系統，此系統主要分成光源和光譜儀兩個部分，光源是使用 Ocean Optics 公司生產的 DH-2000-BAL，其穩定性高，光源波長範圍包含 230-2500 nm，詳細規格如表 2-1 所示。而光譜儀搭配使用 EMICON MC 系統之光譜儀，其可接收光譜範圍為 200-1100 nm，詳細規格如表 2-2 所示。

表 2-1 Ocean Optics DH-2000-BAL 燈源之規格

Engineering Specifications	DH-2000-BAL
Wavelength Range:	230 - 2500 nm
Nominal Bulb Power:	5 W
Warm-up Time:	25 minutes
Source Lifetime:	1,000 hours
Stability of Optical Output:	<5E-06 peak-to-peak (0.1-10.0 Hz)
Drift of Optical Output:	<0.01% per hour

表 2-2 EMICON MC 系統光譜儀之規格

Specifications	EMICON MC
Number of Channels:	3
Wavelength range:	200-1100 nm
Spectral resolution:	1.4 nm
Signal resolution:	16 bits
Analog out:	8
Connectivity:	USB

光經由光纖導入 R2R 濺鍍系統之腔體中，再經由透鏡會聚光線通過樣品或基板，其穿透光再利用透鏡會聚至光纖，最後由 EMICON 光譜儀接收即時穿透光之光譜訊號，即時穿透光量測系統架構，如圖 2-1 所示。線上穿透光譜量測系統在 R2R 濺鍍系統收料軸之前，是為了避免濺鍍時電漿光的影響，其 R2R 濺鍍系統和線上穿透光譜量測系統之架構圖，如圖 2-2 所示。圖中紅色標記為線上穿透量測系統。



圖 2-1 R2R 之穿透光量測系統設備架構

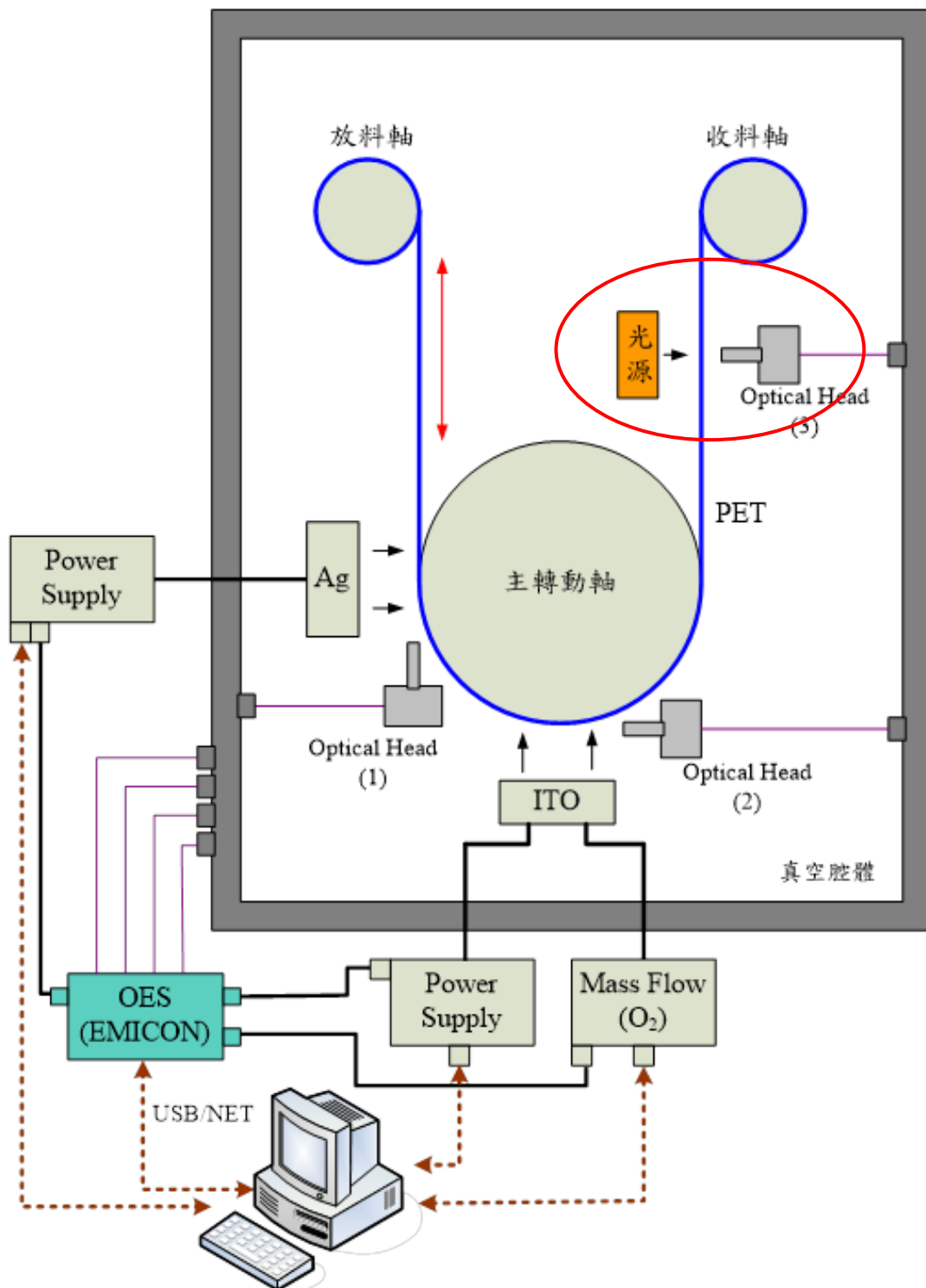


圖 2-2 R2R 濺鍍系統和線上穿透光譜量測系統之架構圖

二、光學薄膜基本理論[6]

光學薄膜的光學表現是基於光波作用之結果。光波皆可被視為電磁波的一種。不同光源的光譜大多不盡相同，但是皆可看成由許多一連串的各單色平面波線性疊加而成。光波在膜層中及界面上的行為表現，可經由了解單色平面波的行為而得到。我們可以由 Maxwell 電磁波方程式開始推導出光波在介質中的行為表現(採用國際系統制 SI units)。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

其中

$$J = \sigma E ; D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P ; B = \mu H = \mu_0 H + M \quad (5)$$

今解上述諸式，即可得平面波方程式。設介電質體中無自由電荷 ρ ，則

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot (\epsilon E) = \epsilon \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \epsilon = 0 \quad (6)$$

$$\therefore \nabla \cdot E = -E \cdot \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} = -E \cdot \nabla (\ln \epsilon) \quad (7)$$

對公式(1)取旋度，並由恆等式 $\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ ，可推導得知

$$\nabla^2 E + \nabla [E \cdot \nabla (\ln \epsilon)] = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{\nabla \mu}{\mu} \times (\nabla \times E) \quad (8)$$

令此方平面波方程式之解為 $E = E(xyz)e^{i\omega t}$

則上式可化為

$$\begin{aligned}\nabla^2 E + \nabla[E \cdot \nabla(\ln \varepsilon)] &= (i\mu\sigma\omega - \mu\varepsilon\omega^2)E - \nabla(\ln \mu) \times (\nabla \times E) \\ &= -\mu\varepsilon_c\omega^2 E - \nabla(\ln \mu) \times (\nabla \times E)\end{aligned}\quad (9)$$

其中

$$\varepsilon_c = \varepsilon - i\frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon \left(1 - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right) \quad (10)$$

於是求得電場的方程式為

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon_c E + \nabla[E \cdot \nabla(\ln \varepsilon)] + \nabla(\ln \mu) \times (\nabla \times E) = 0 \quad (11)$$

同理，消去 Maxwell 中的電場後，可求得磁場之方程式如下：

$$\nabla^2 H + \omega^2 \mu \varepsilon_c H + \nabla[H \cdot \nabla(\ln \mu)] + \nabla(\ln \varepsilon_c) \times (\nabla \times H) = 0 \quad (12)$$

在光頻率中，非磁性光學物質的 μ 值近乎一常數 μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)。今設膜層平行於 oxy 平面，且為正常之非均勻介電質體(即光學常數僅為 z 的函數)，則公式(10)及(11)可簡化為

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon_c E + \nabla \left(E_z \cdot \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial z} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 H + \omega^2 \mu \varepsilon_c H + \nabla(\ln \varepsilon_c) \times (\nabla \times H) = 0 \quad (14)$$

對於均勻介電質而言，(11)式及(12)式可簡化為

$$\nabla^2 G + \omega^2 \mu \varepsilon_c G = 0 \quad (15)$$

式中 $G = E$ 或 H ，其傳遞速度為 $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_c \mu}}$ 。由此可得線偏振單色

平面波

$$G = \hat{a} G_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (16)$$

式中 \vec{k} 為電磁波在介電質中的波向量，表以單位向量 \vec{S} 為 $\vec{k} = k\vec{S}$

$$\hat{S} = \hat{i} \sin \theta + \hat{k} \cos \theta \quad (17)$$

$$\vec{r} = \hat{i}x + \hat{j}y + \hat{k}z \quad (18)$$

\hat{a} 為電磁波振動方向的單位向量。

上述假設介電質為均勻物質，即 ϵ 為常數，則可得

$$K^2 = \omega^2 \mu \epsilon_c = K_0^2 N^2 \quad (19)$$

式中 $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ 為光波在真空中之波數； $\lambda = \frac{c}{\nu}$ 為光波在真空中

之波長。 $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ 為頻率， $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.99798 \times 10^8$ m/s 為光在真空中

中之速度。於是 $N = \sqrt{\mu \epsilon_c} \times c$ 代表介電質之光學常數(optical constant)。N 為一複數，因此可令 $N = n - ik$ 。

由公式(10)推導，可得

$$n^2 = \frac{1}{2} \mu c^2 \left[\sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2} + \epsilon_r \right] = \frac{1}{2} \mu c^2 \left[\sqrt{\epsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} + \epsilon \right] \quad (20)$$

$$k^2 = \frac{1}{2} \mu c^2 \left[\sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2} - \epsilon_r \right] = \frac{1}{2} \mu c^2 \left[\sqrt{\epsilon^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} - \epsilon \right] \quad (21)$$

在光頻率中， $\mu \approx \mu_0$ 非導電介電質之 $\sigma = 0$ ，則 $k = 0$ ，

$n^2 = \mu_0 \epsilon c^2 = \epsilon / \epsilon_0$ 。再將公式(16)表以光學常數 N，則

$$\vec{G} = \hat{a} G_0 e^{-\frac{2\pi k d}{\lambda}} e^{i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n d \right]} \quad (22)$$

式中 $d = x \sin \theta + z \cos \theta$ 是波以相速度 $v = \frac{c}{n}$ 所行走的距離， nd 表示

行走的光學厚度。場強度於是隨行進距離以指數關係衰減，所

以 k 稱為消光係數(extinction coefficient)。n 稱之折射率(refractive index)。

定義 Y 為介電質之光學導納(optical admittance)，或簡稱為導納(admittance)，是在該介電質中磁場強度與電場強度之比，則

$$Y = \frac{H_0}{E_0} = \frac{\omega \epsilon_c}{K} = \frac{\epsilon_c}{\sqrt{\mu \epsilon_c}} = \sqrt{\frac{\epsilon_c}{\mu}} = \frac{\sqrt{\mu \epsilon_c}}{\mu} = \frac{N}{\mu c} = NY_0 \left(\frac{\mu_0}{\mu} \right) \quad (23)$$

在光頻率中，因 $\mu_0 \approx \mu$ ，所以 $Y = NY_0$ 。

上式中 $Y_0 = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$ 為自由空間導納，其值為 $\frac{1}{377} \approx \frac{1}{120\pi}$ 姆歐。為方便起見以此為單位，則介電質之折射率在數值上與其光學導納相等，亦即 $Y=N$ 。

再考慮向量之符號後可得

$$H = Y \left[\hat{S} \times E \right] \quad (24)$$

綜合公式(22)及(24)說明了單色平面波在均勻介電質中的行為。

(一) 單界面之反射與透射

光在行進中遇到不同光學常數之物質時，亦即光遇到有界面時，電磁波必定會受到影響而可能引起反射、透射等現象。磁場的波動行為和電場相當，只是振動方向垂直於電場，磁場對有速度的電子會起作用，但在光頻中，物質之電子大多被拘束住或相較於電磁波的頻率其速度很慢，因此電場之能量效應比磁場大許多，故本文舉電場方程式來做說明。

假設光從介電質 N_0 入射到介電質 N_1 ，其界面在 $Z=0$ 處，如圖 2-3 所示，則

$$\text{入射波為 } \mathbf{E}_0^+ \cdot e^{i[\omega_0 t - \mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{r}]} = \mathbf{E}_0^+ \cdot e^{i\left[\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} N_0 (x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)\right]} \quad (25)$$

$$\text{反射波為 } \mathbf{E}_0^- \cdot e^{i[\omega_r t - \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{r}]} = \mathbf{E}_0^- \cdot e^{i\left[\omega_r t - \frac{2\pi}{\lambda} N_0 (\alpha_r x + \beta_r y + \gamma_r z)\right]} \quad (26)$$

$$\text{透射波為 } \mathbf{E}_1^+ \cdot e^{i[\omega_t t - \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}]} = \mathbf{E}_1^+ \cdot e^{i\left[\omega_t t - \frac{2\pi}{\lambda} N_1 (\alpha_t x + \beta_t y + \gamma_t z)\right]} \quad (27)$$

\mathbf{E}_0^+ 、 \mathbf{E}_0^- 及 \mathbf{E}_1^+ 分別為包含有起始相位之入射、反射及透射電場強度。由於平行於界面的 E 及 H 必須連續，即在 $Z=0$ 處之 E 及 H 為連續值，所以

$$1. \omega_r = \omega_t = \omega_i \quad (28)$$

$$2. \mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{r} = \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r} \quad (29)$$

$$3. N_0 \sin \theta_i = N_0 \alpha_r = N_1 \alpha_t \quad (30)$$

設若 $\alpha_r = \sin \theta_r$ 則 $\theta_r = \theta_i$ 即入射角等於反射角。所以 $N_0 \sin \theta_i = N_1 \sin \theta_t$ ，此即為 Snell's law。此定律對於界面有無吸收皆成立。由第(5)式得知 $(\mathbf{K}_r - \mathbf{K}_0) \cdot \mathbf{r} = (\mathbf{K}_t - \mathbf{K}_0) \cdot \mathbf{r} = 0$ ，表示光波在界面與法線的平面上行進，亦即在 y 方向沒有光波，所以 $\beta_r = \beta_t = 0$ 。

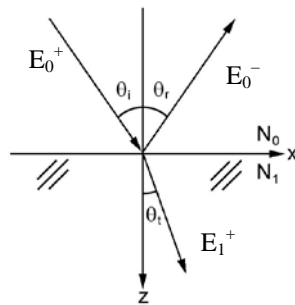


圖 2-3 光波由介電質 N_0 入射到介電質 N_1

考慮光由界面 0 垂直入射界面 1，如圖 2-4。由於平行於界面的電磁場必須是連續的，所以在界面 0 與 1 之交界處滿足下式：

$$E_0^+ + E_0^- = E_1^+ \quad (31)$$

及

$$H_0^+ + H_0^- = H_1^+ \quad (32)$$

但由(24)式，光學導納與電磁場的關係，可化上式為

$$Y_0 E_0^+ - Y_0 E_0^- = Y_1 E_1^+ \quad (33)$$

經由公式(31)和(33)公式推導，可得透射係數(amplitude transmission coefficient)和反射係數(amplitude reflection coefficient)

$$\tau \equiv \frac{E_1^+}{E_0^+} = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} = \frac{2N_0}{N_0 + N_1} \quad (34)$$

$$\rho \equiv \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{Y_0 - Y_1}{Y_0 + Y_1} = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \quad (35)$$

反射率(reflectance)和透射率(transmittance)分別為

$$R = \frac{|Y_0 - Y_1|^2}{|Y_0 + Y_1|^2} \quad (36)$$

$$T = \frac{4Y_0 \operatorname{Re}(Y_1)}{|Y_0 + Y_1|^2} \quad (37)$$

式中 Y_0 及 Y_1 分別為介電質 0 及介電質 1 之光學導納，並設 Y_0 為實數。若介電質 0 與介電質 1 之光學常數分別為 N_0 及 N_1 ，則利用公式(23)，反射率與透射率可分別表達如下：

$$R = \frac{|N_0 - N_1|^2}{|N_0 + N_1|^2} \quad (38)$$

$$T = \frac{4N_0 \operatorname{Re}(N_1)}{|N_0 + N_1|^2} \quad (39)$$

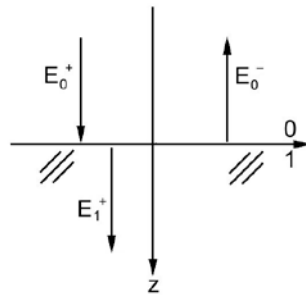


圖 2-4 光波由介電質 0 垂直入射到介電質 1

(二) 單層膜之反射與透射

當在基板 N_s 鍍上如圖 2-5 所示，折射率為 N ，厚度為 d 之單層膜後，薄膜與基板構成兩個界面 a 和 b 。於是入射波由介電質 N_0 入射，經由界面 a 與 b 的反射，會在 a 、 b 界面形成淨電場與淨磁場 E_a 、 H_a 及 E_b 、 H_b 。

由於波的形式為

$$e^{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} N z\right]} \propto e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} N z} = e^{-i\delta} \quad (40)$$

所以當此波行進距離 d 後走了相厚度(phase thickness) δ ，亦即在 z 方向會有一相位差 δ

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N d \quad (41)$$

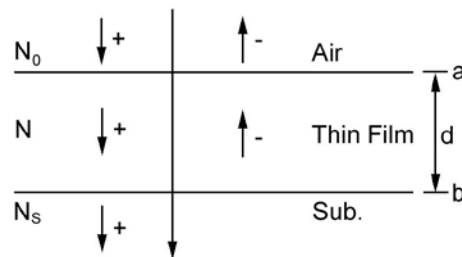


圖 2-5 在基板 N_s 上鍍一層折射率為 N 的薄膜，厚度為 d 。

設平行於界面之電磁場分別以符號 E 與 H 表示，由於沒有自由電荷或傳導電流在介質中，所以它們在界面上必須是連續值，因此可得以下關係式：

在界面 b :

$$\text{靜電場 } E_b = E_{Sb}^+ = E_{1b}^+ + E_{1b}^- \quad (42)$$

$$\text{靜磁場 } H_b = H_{Sb}^+ = H_{1b}^+ + H_{1b}^- \quad (43)$$

$$\text{或 } \eta_S E_b = \eta_S E_{Sb}^+ = \eta E_{1b}^+ - \eta E_{1b}^- \quad (44)$$

在界面 a :

$$\text{靜電場 } E_a = E_{0a}^+ + E_{0a}^- = E_{1a}^+ + E_{1a}^- \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \text{靜磁場 } H_a &= H_{0a}^+ + H_{0a}^- = H_{1a}^+ + H_{1a}^- \\ &= \eta_0 E_{0a}^+ - \eta_0 E_{0a}^- = \eta E_{1a}^+ - \eta E_{1a}^- \end{aligned} \quad (46)$$

η_0 、 η 、 η_S 分別表示入射介電質、薄膜及基板之光學導納。

由於電場在薄膜由界面 a 走到界面 b 有相位差 δ 存在，所以

$$E_{1a}^+ = E_{1b}^+ e^{i\delta} \quad (47)$$

$$E_{1a}^- = E_{1b}^- e^{-i\delta} \quad (48)$$

再經由公式(42)和(44)推導可得

$$E_a = E_b \cos \delta + H_b \left(\frac{i \sin \delta}{\eta} \right) \quad (49)$$

$$H_a = E_b (i\eta \sin \delta) + H_b \cos \delta \quad (50)$$

合併公式(49)、(50)，寫成矩陣行列式

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{\eta} \sin \delta \\ i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ H_b \end{bmatrix} \quad (51)$$

所以矩陣

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{\eta} \sin \delta \\ i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (52)$$

連接了 a、b 兩界面間電磁場的關係。它代表了該單層膜的特性，因此稱之為薄膜之特徵矩陣(characteristic matrix of

the thin film), 簡稱膜矩陣(matrix of thin film)。由式子(45)、(46)得知

$$E_{0a}^+ = \frac{\eta_0 E_a + H_a}{2\eta_0} \text{ 及 } E_{0a}^- = \frac{\eta_0 E_a - H_a}{2\eta_0}$$

因此反射係數

$$\rho = \frac{E_{0a}^-}{E_{0a}^+} = \frac{\eta_0 E_a - H_a}{\eta_0 E_a + H_a} = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad (53)$$

比較(53)與(31)式知 $Y = \frac{H_a}{E_a}$ 相當於鍍膜後的導納 η_E ，亦即可化

兩個界面 a、b 為一個界面，如圖 2-6 所示。將 η_E 以 Y 為代表而稱 Y 為等效光學導納(equivalent optical admittance)。

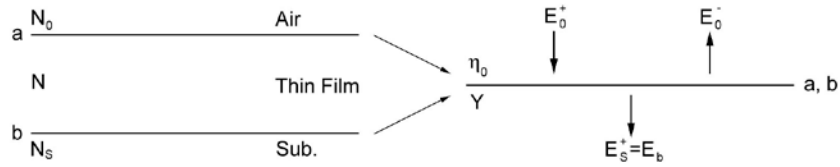


圖 2-6 在基板 N_s 上鍍一層折射率為 N 的薄膜，厚度為 d 。

同理透射係數為

$$\tau = \frac{E_b}{E_{0a}^+} = \frac{2\eta_0 E_b}{\eta_0 E_a + H_a} = \frac{2\eta_0 \frac{E_b}{E_a}}{\eta_0 + Y} \quad (54)$$

若將公式(51)之左右矩陣各除以 E_b ，則 $Y_b = \frac{H_b}{E_b}$ 等值於基板

之導納，而公式(51)可寫成

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{\eta} \sin \delta \\ i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y_s \end{bmatrix} \quad (55)$$

於是等效光學導納(equivalent optical admittance)為 $Y = \frac{C}{B}$

$$\text{反射率為 } R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (56)$$

$$\text{穿透率為 } T = \frac{4\eta_0 \operatorname{Re}(y_s)}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (57)$$

(三) 多層膜之反射與透射

多層膜基本上是單層膜的疊加而已，因此計算多層膜的電磁場行為可以重複利用公式(51)的矩陣方程式，其整組之膜矩陣為其各單層膜的乘積：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E(z_0) \\ H(z_0) \end{bmatrix} &= M_1 M_2 \cdots M_m \begin{bmatrix} E(z_m) \\ H(z_m) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E(z_m) \\ H(z_m) \end{bmatrix} \\ M &= \prod_{j=1}^m M_j = \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \\ \delta_j &= \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j \end{aligned} \quad (58)$$

圖 2-6 之等效界面的觀念也可以應用於此，如圖 2-7 所示，其等效導納為 $Y=C/B$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (59)$$

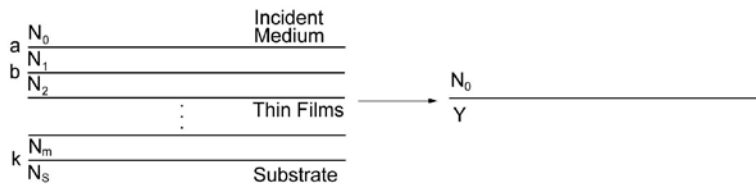


圖 2-7 多層膜矩陣等效示意圖

(四) 非相干性之反射與透射

上述理論都只考慮基板與膜層接觸的一面，而實際上光波會抵達基板之另一面，故會有部份能量再反射回膜層，只不過這些反射回去的光波由於經過很厚(相對於薄膜)的基板，所以與膜層間反射光不起干涉作用，只是強度的相加而已，稱為非相干性(incoherence)反射或穿透。

假設圖 2-8 之 N_s 代表基板之折射率，界面 A 代表基板上
方膜層系統之等效界面，膜系之透射率、反射率分別為 T_A 、
 R_A 。等效界面 B 與界面 A 之意義相同，可為另一鍍膜面亦可
為沒有鍍膜基板面，則整個反射率為 R

$$\begin{aligned}
 R &= R_A^+ + T_A^+ R_B^+ T_A^- [1 + R_A^- R_B^+ + (R_A^- R_B^+)^2 \cdots] \\
 &= R_A^+ + \frac{T_A^+ T_A^- R_B^+}{(1 - R_A^- R_B^+)} \\
 \because T_A^+ &= T_A^-, \text{ 令 } T_A^+ = T_A^- = T_A \\
 \therefore R &= \frac{R_A^+ + R_B^+ (T_A^2 - R_A^+ R_A^-)}{1 - R_A^- R_B^+} \quad (60)
 \end{aligned}$$

同理，求得整個透射率 T 為：

$$\begin{aligned}
 T &= T_A^+ T_B^+ + T_A^+ T_B^+ R_B^+ R_A^- [1 + R_A^- R_B^+ + (R_A^- R_B^+)^2 + \cdots] \\
 &= \frac{T_A^+ T_B^+}{1 - R_A^- R_B^+} \quad (61)
 \end{aligned}$$

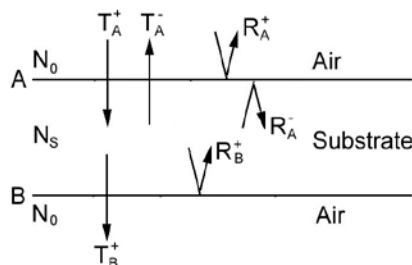


圖 2-8 多基板兩個界面的穿透與反射

三、廣波域光學監控系統

監控程式接收 EMICON 光譜儀之廣波域光譜資訊(T_m)後，利用上述薄膜光學基本理論來計算預計停鍍光譜，入射光源垂直通過薄膜結構，透過多層膜之膜矩陣可計算出穿透和反射率，因為基板並非無限厚，所以必須考慮基板另一面的反射，將多層膜之膜矩陣計算出的穿透和反射率帶入公式(61)，即可得到預計停鍍光譜。其中折射率需考慮色散情形，所以各個波長對應的折射率是不同的，如果是弱吸收或沒有吸收之介電質材料，其折射率會藉由柯西色散公式：

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (62)$$

但如果是強吸收之材料，可以輸入材料折射率和消光係數對應波長之值。藉由量測的 T_m 和計算的 T ，廣波域光學監控程式就可以計算會計算出 Error 函數之值，亦為量測和理論穿透光譜之差異。利用 Error 函數來評估鍍膜過程中的穩定性。其 Error 函數如下：

$$Error = \sum_i [T_m(\lambda_i) - T(n_i, d_i, \lambda_i)]^2 \quad (63)$$

四、撰寫光學監控程式

為了在 R2R 濺鍍系統實現架設光學監控，以 National Instrument 公司開發的程式語言 LabVIEW 來撰寫一套廣波域之光學監控程式，其原因是 LabVIEW 擴充性強且容易整合，未來也可以與鍍膜程式作整合。撰寫的光學監控程式是擷取光譜儀得到的廣波域光譜資訊與預期成果作比對，其介面如圖 2-9 所示。介面包含鍍膜資訊、膜層設計資訊和預計停鍍光譜與即時

穿透光譜之比對圖...等資訊。

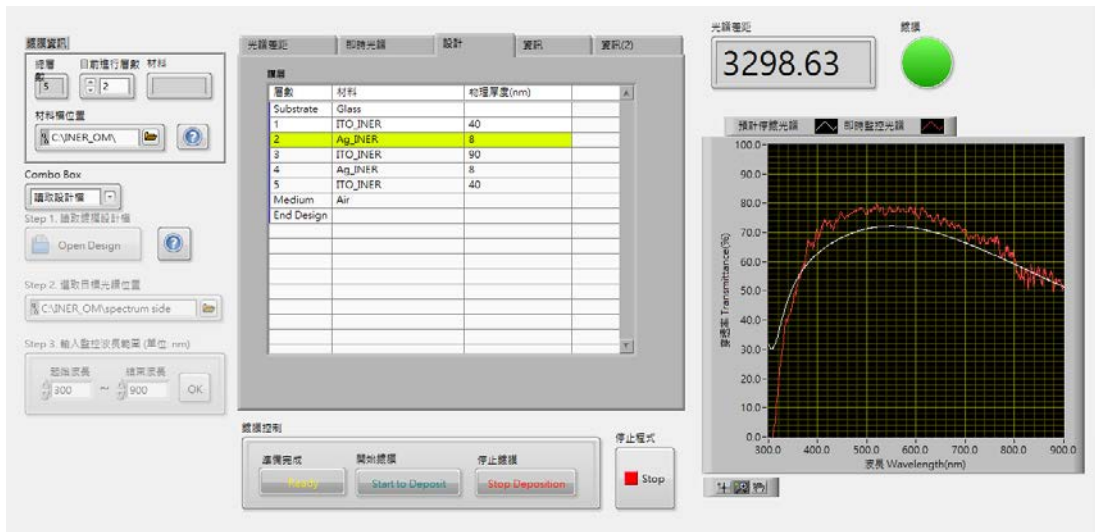


圖 2-9 使用 LabVIEW 撰寫光學監控程式之介面

參、主要發現與結論

本計畫已經完成撰寫廣波域之光學監控程式，也連接 EMICON 光譜儀接受其穿透光譜訊號，並應用在 R2R 濺鍍系統上。此監控程式擷取光譜波長範圍為 300nm - 900nm，監控週期為 1 秒，廣波域穿透光譜可以即時比對每層薄膜依照設計計算出的預計停鍍穿透光譜，如圖 3-1 所示。圖 3-1 顯示各層預計鍍膜光譜(白線)以及即時量測之穿透光譜圖(紅線)。

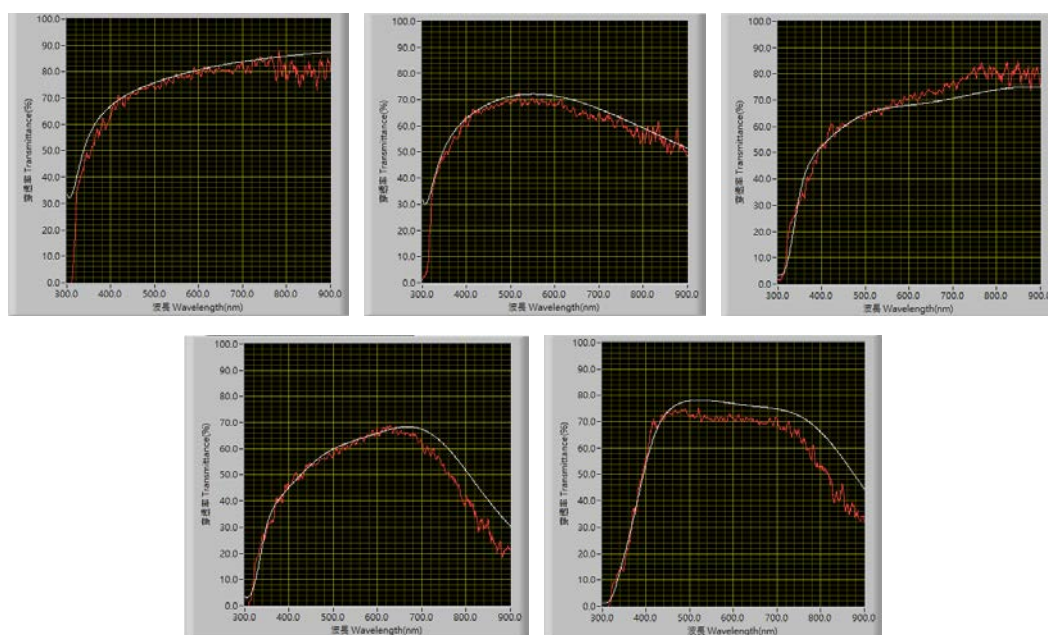


圖 3-1 鍍製 Low-E 薄膜每層實際鍍製穿透光譜與預計停鍍之穿透光譜圖 (依序為第一層至第五層)

在廣波域監控程式中，最重要的功能是如何提供使用者在長製程作正確的判斷確保高產能和高品質的 Low-E 薄膜。此監控程式可以設定一光譜差異值(Error 值)，如果與預計光譜差異(Error 值)大於設定值時，此監控程式中的鍍膜燈會顯示紅色作為警告，

反而言之，光譜差異小於設定值，則顯示綠燈表示監控正進行中，如圖 3-2 所示，左圖是光譜差異值大於設定值，所以圖中燈號顯示紅燈；右圖燈號顯示綠燈表示監控進行中。如此一來，使用者藉此資訊可以馬上作鍍膜參數的調整，在長製程或連續製程中，可以持續即時監控每層鍍製薄膜品質的一致性，且可以紀錄廣波域穿透光譜隨時間的變化來確保 R2R 濺鍍 Low-E 薄膜之高再現性。

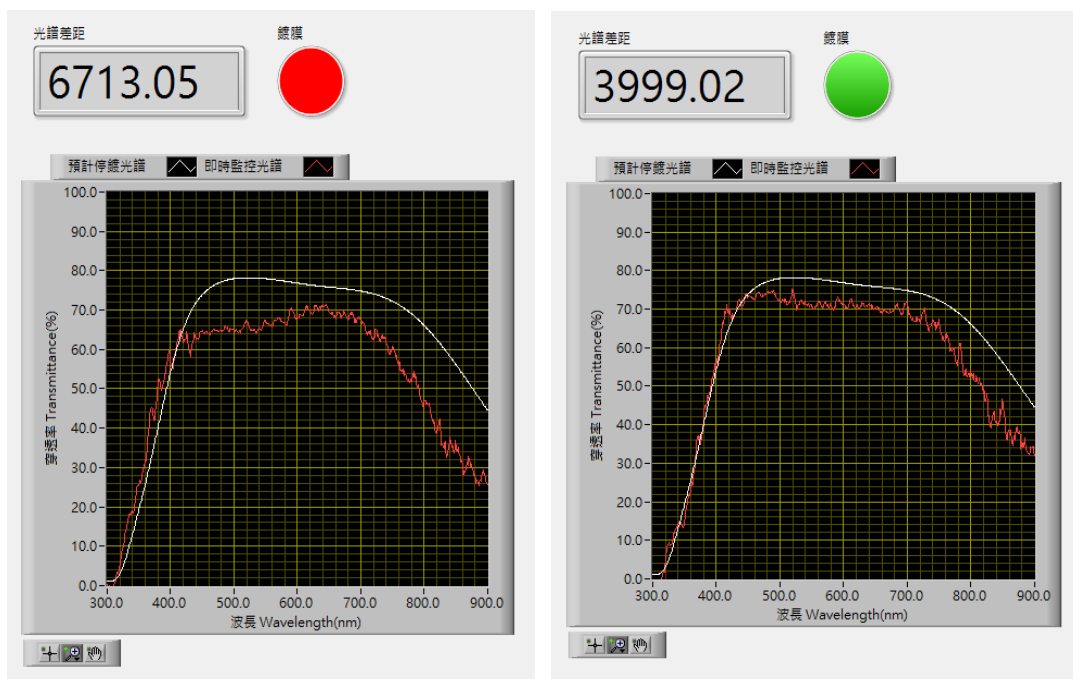


圖 3-2 比對預期鍍膜之穿透光譜，差異大於設定值時鍍膜燈會顯示紅色(左圖)，如果小於設定值則顯示繼續監控的綠燈(右圖)

在測試的過程中發現，實際鍍膜與設計光譜可能會因為當時的鍍膜環境造成差異，因此本計畫在監控程式中的預計停鍍光譜選項，增加讀取預計停鍍穿透光譜，也就是說給監控程式各層穿透光譜檔當作預計停鍍之穿透光譜，如圖 3-3 所示。



圖 3-3 選擇監控方式有讀取預計停鍍穿透光譜和依照設計檔計算預計停鍍光譜兩種監控方式

而程式中也記錄每一秒光譜差異值，除了上述提到的鍍膜警示燈可以提供使用者即時鍍膜狀況，也可以藉由紀錄光譜差異值來評估，長製程或是連續鍍膜的穩定性。

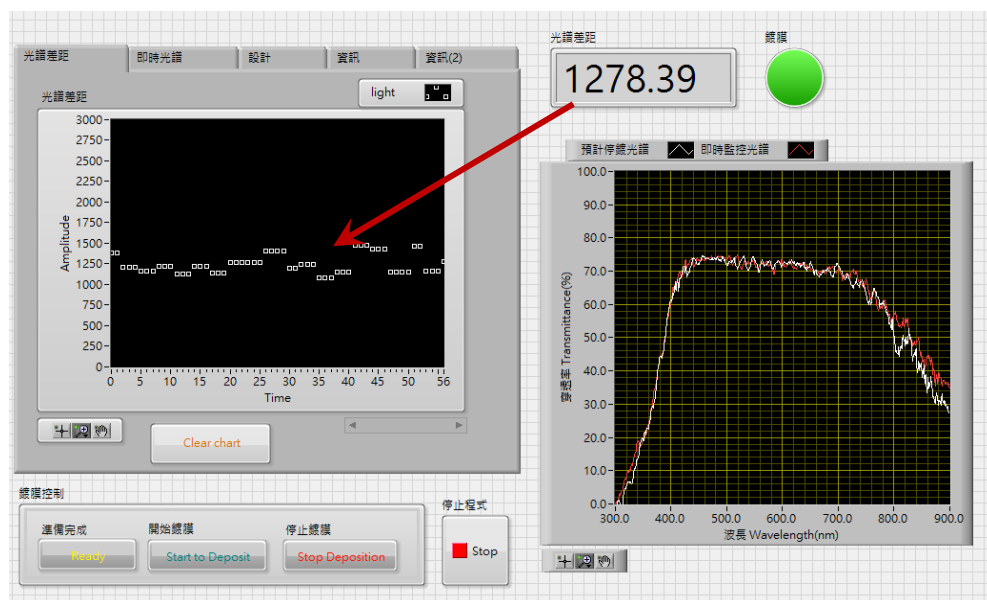


圖 3-5 紀錄光譜差異評估鍍膜過程的穩定性

本計畫架設光學監控系統監控波長為 300 nm - 900 nm，監控週期為 1 秒，是屬於廣波域光學監控系統，可依設計計算和評估每層鍍製行為，也可以輸入預計停鍍光譜，線上即時監控每層薄膜之穿透光譜，同時記錄鍍膜過程中，廣波域光譜隨時間之變化。其光學膜厚監控系統規格如表 3-1：

表 3-1 光學膜厚監控系統規格表

規格	監控波長	300 nm - 900 nm
	波長解析度	1 nm
	訊號解析度	16 bits
	積分時間	100 ms
	穩定度	$< 5 \times 10^{-6}$ peak-to-peak
功能	監控週期	1 秒
	操作介面	LabVIEW (中文版)
	記錄項目	鍍膜過程中，紀錄項目 1. 穿透光譜 2. 鍍膜參數 3. 光譜差異值
	特色	1. 屬於廣波域光學監控 2. 自動/手動選擇監控波長 3. 可預先計算或輸入每層鍍製薄膜之穿透光譜 4. 記錄鍍膜過程中，廣波域光譜、鍍膜參數以及光譜差異值皆可紀錄 5. 操作圖形介面，明瞭易讀

肆、參考文獻

1. B.Bobbs and J.E.Rudisill, “Optical Monitoring of Nonquarterwave Film Thickness Using a Turning Point Method”, Applied Optics, Vol.26, pp.3136-3139, 1987.
2. H.A. Macleod, “Monitoring of Optical Coatings”, Applied Optics, Vol.20, pp.82, 1981.
3. C.J. van der Laan, “Optical Monitoring of Nonquarterwave Stacks”, Applied Optics, Vol.25, pp.753-760, 1986
4. Li Li and Yi-hsun Yen, “Wideband Monitoring and Measuring System for Optical Coatings”, Applied Optics, Vol.28, pp.2886-2889, 1989.
5. B. Vidal, A. Fornier, and E. Pelletier, “Optical Monitoring of Nonquarterwave Multilayer Filters” , Applied Optics, Vol.17, p.1038, 1987.
6. 李正中, “薄膜光學與鍍膜技術” 第七版, 藝軒圖書出版社, 2012.