

精密光學鍍膜的監控技術

Thickness Monitoring for Precise Optical Interference Coatings

李正中

Cheng-Chung Lee

精密光學薄膜的製鍍，需要精確的膜層厚度監控才能完成。本文陳述了五種膜厚監控方法：計時監控法、石英震盪監控法、傳統光學監控法、光學導納軌跡監控法，以及反射係數相位擷取監控法，並分析各種方法的優點與缺點。計時監控法與石英震盪監控法簡單便宜，但無法知道鍍上去薄膜的折射率，因此精密光學薄膜一般會以光學鍍膜的監控來完成。導納軌跡監控法具有視覺識別效果，容易做膜厚誤差補償，而且不需另加硬體，在傳統的光學監控機台加上軟體即可完成，因此容易實現。反射係數相位擷取監控法是非常精確的監控方法，但必須要有一組干涉儀及陣列偏振相位 CCD 相機，因此機台的總價位比傳統光學鍍膜機要高一些，但比加裝橢圓偏振儀要簡單、精確，所佔空間小，對振動不敏感且便宜。

High quality thin film optical filters need high precision film thickness monitoring during the deposition. There are several methods can do the thickness monitoring, named as time-counting monitoring, quartz-oscillation monitoring, traditional optical monitoring, optical admittance loci monitoring and phase-extraction monitoring. Each method has its advantage and disadvantage. Since no information about refractive index of the depositing thin film can be provided by time-counting monitoring or quartz-oscillation monitoring, optical monitoring is preferred if an optical filter needs film thickness controlled very precisely during the deposition, although time-counting monitoring and quartz-oscillation monitoring are cheaper and simpler. Optical admittance loci monitoring has an advantage of visual control so that it has a better error correction mechanism. Besides it can be applied on a traditional optical coating machine by the implantation of software without any additional hardware. Phase-extraction monitoring is the most precise monitoring method, it needs the installation of an interferometer and a camera with polarization array, however, it is vibration insensitive, compact and cheaper than using ellipsometer and having much better performance than an ellipsometric system.

一、前言

光學薄膜 (optical thin films) 雖然難以讓人清楚看見它是什麼樣的重要物件，但大多數的人都知道光學薄膜常常會是光電元件或光電系統中的關鍵角色，有了光學薄膜的產品其功能會增強，因而價值

會高很多，有時甚至若沒有光學薄膜，光電元件或光電系統就失去它的功能。這是因為光學薄膜通常不會是一個獨立產品，而是光電元件或光電系統中的輔助或成其功者。因此光電科技的發展能有今日的傲人成果，光學薄膜是扮演著不可或缺的隱藏貢獻者。

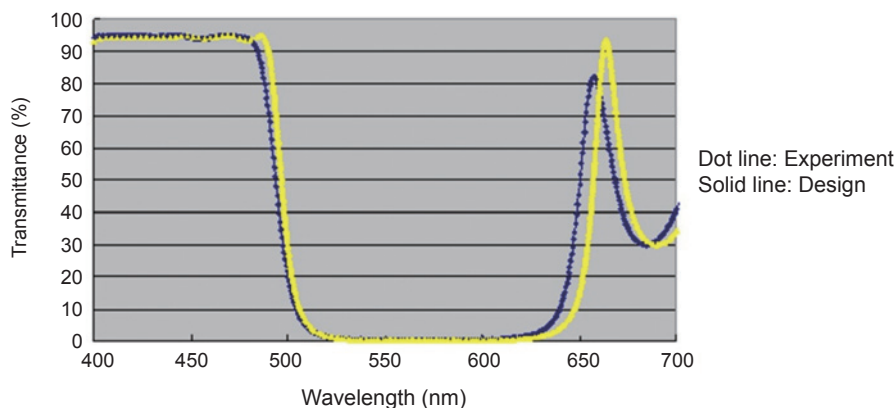


圖 1. 實驗結果與設計光譜比較，藍色線為實際製鍍所量到的光譜，而黃色線則是原本的設計光譜。

其實光學薄和其他科技一樣，需要有嚴謹的科學理論基礎、精密的工程技術、細緻的製作與檢測步驟，再依問題所在提出解決方法，才能做好各種鍍膜的設計 (filter design)、製鍍 (coating process)、膜厚監控 (thickness monitoring) 與檢測 (measurement and testing)。其中膜厚監控是製鍍過程中如何完美地達到設計理論值的關鍵步驟，至為重要。因此本文將對如何監控 (monitoring) 每一層薄膜厚度使其達到預設值，提出現行的各種方法作一概要性的陳述。以下對於鍍膜的膜堆 (stack) 不管多少層統稱為光學濾光片 (optical filter)，對於鍍膜時每一層的厚度監控簡稱為鍍膜監控。

二、鍍膜監控方法概論

光學濾光片的鍍膜監控，早期因鍍膜後其反射光之顏色會起變化而有目視法的提出，但這種監控法誤差很大，而且顏色不容易正確地定義，因此精密的光學鍍膜已不採用目視法。當今常用的鍍膜監控有三種方法：(1) 計時監控法、(2) 石英震盪監控法及 (3) 光學監控法。其中光學監控法依其演進又可分為傳統光學監控法、光學導納軌跡監控法以及反射係數相位擷取監控法。以下將先分別陳述此三種方法的要義。

1. 計時監控法

在鍍膜過程中，若鍍膜速率及薄膜光學常數 (optical constant，即折射率 (refractive index, n) 與消光係數 (extinction coefficient, k)) 不變，則計時監控法是一個符合經濟效益而且對一般薄膜設計還算

精準的方法。做法是事先做個實驗，算出鍍出的薄膜物理厚度 (physical thickness, d) 與時間的關係，並算出該薄膜的光學常數 (n & k)，然後將這些資料輸入電腦建成為該鍍膜機的鍍膜參數，然後將設計的每一層薄膜的厚度也輸入電腦，製鍍時依序計算鍍完每一層所需時間即可。這種監控方法對於用熱蒸鍍 (thermal evaporation) 的鍍法不容易成功，通常較適用於濺鍍 (sputtering) 製程，主要原因是濺鍍速率比熱蒸鍍速率慢很多，停鍍點比較容易掌控。但在膜層數很多及膜層非常薄或非常厚，或膜堆有些波段其相位 (phase) 必須很嚴謹的光學濾光片，即使採用濺鍍製程，此計時監控法也容易出錯。因為膜層很薄時其光學常數對於製鍍時的鍍膜參數 (如真空度、氧與水的分壓、溫度、鍍膜靶材表面狀況等) 很敏感，往往並非是一個常數，而當膜層很厚及膜層數很多時靶材表面已變形，開始事先輸入電腦的薄膜物理厚度與時間的關係已有偏移，折射率也有可能與原先預設值不一樣，因此會造成誤差。

圖 1 是用 Ta 及 Si 當靶材充適當氧氣濺鍍成 Ta_2O_5 及 SiO_2 薄膜，以計時監控法製鍍短波通濾光片的例子。此濾光片的規格為 400–488 nm： $T > 97\%$ 、512–639 nm： $T < 4\%$ 、 $T = 50\%$ at 496 nm、 $T = 90\%$ at 491 nm、 $T = 10\%$ at 506 nm， $\lambda_T = 90\% - \lambda_T = 10\% = 15$ nm。當 Ta_2O_5 濺鍍速率為 0.3 nm/s)、 SiO_2 濺鍍速率為 0.3 nm/s 時， Ta_2O_5 及 SiO_2 薄膜在 560 nm 的折射率分別為 2.15 與 1.46。依此設計濾光片，總共需 21 層才能滿足規格的要求，如表 1 所示，最薄的膜層 45.97 nm，最厚的膜層 101.36 nm，這樣的設計算是很好鍍。圖 1 中藍色

表 1. 短波通濾光片設計範例。

Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)	Lock
Substrate	Glass	1.51803	0.00000			
1	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.19103780	73.30	No
2	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.31905701	82.99	No
3	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25693142	98.58	No
4	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25518952	66.37	No
5	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.26416690	101.36	No
6	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25141466	65.39	No
7	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25000000	95.92	Yes
8	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25000000	65.02	Yes
9	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25000000	95.92	Yes
10	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25000000	65.05	Yes
11	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25000000	95.92	Yes
12	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25000000	65.02	Yes
13	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25000000	95.92	Yes
14	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25000000	65.02	Yes
15	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25000000	95.92	Yes
16	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25373852	66.00	No
17	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25807684	99.02	No
18	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.25233935	65.63	No
19	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.25929927	99.49	No
20	Ta ₂ O ₅ (msl)	2.15304	0.00031	0.26074256	67.82	No
21	SiO ₂	1.45953	0.00000	0.11981956	45.94	No
Medium	Air	1.00000	0.00000			

線為實際製鍍所量到的光譜，而黃色線則是理論設計光譜，可以看出實際製鍍的結果與設計值略有誤差，例如截止帶較窄，在 656 nm 波位上的穿透率偏低，而與所訂的規格亦略有差異，400 – 481 nm : T > 93%、512 – 633 nm : T < 4%、T = 50% at 494 nm、T = 90% at 484 nm、T = 10% at 504 nm， $\lambda_T = 90\% - \lambda_T = 10\% = 20 \text{ nm}$ 。有經驗者一看就知道實驗上鍍出的折射率與事先輸入的折射率不一樣。經分析知道是因為實際製鍍時膜層折射率比原先設定的 2.15 與 1.46 較低所導致。但計時監控法就是沒辦法看出在製鍍時膜層折射率是否有變化。

2. 石英震盪監控法

石英晶體監控法⁽¹⁾是利用石英晶體振動頻率 f 與其質量成反比的原理，而使得鍍上膜厚 Δd 後其

振動頻率減少 Δf ，因此可由 Δf 反求出 Δd 值。但因一般膜質與石英不同，所以當膜鍍到某一定厚度後，振動頻率不全然由於石英本身的特性而致使 Δd 與 Δf 間不再有線性關係。商用機器之設計有顯示使用壽命期的指示，因此鍍到某膜厚後知道必須更換石英片，例如 6 MHz 的石英監控器可用 Δf 約為 100 kHz，所以當其頻率降到 5.9 MHz 時就不再使用了，因此鍍很厚的膜堆如紅外光濾光片很少使用它。利用石英監控器還有一個缺點，即其厚度顯示不穩定，而且對介電質膜只能顯示其物理厚度，而不知其折射率。因此，一般做精密之光學鍍膜時，其顯示之厚度大多只作為參考，倒是可以利用它來做鍍膜速率的控制，因此石英監控器上都有鍍膜速率的顯示。使用石英監控器的另一個好處，因其輸出為電訊號，所以很容易用來做製程的自動控

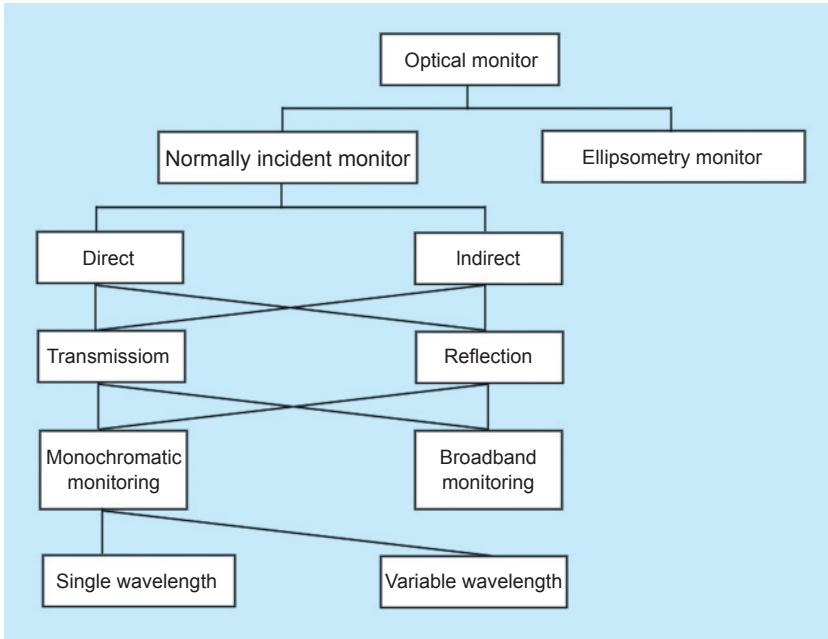


圖 2. 光學監控的種類。

制。對於厚度誤差不是很嚴格的濾光片，可以很便宜地利用此來做自動製程鍍膜機。另外鍍金屬膜時以石英晶體監控亦比後面將陳述的光學監控要方便而且精確。

3. 傳統光學監控法

所謂光學監控就是利用鍍膜時薄膜的穿透光或反射光信號來判別每一層膜的停鍍點。若入射光為斜向光，則可利用橢圓偏振儀原理取得任何時刻鍍上去薄膜的折射率、消光係數與厚度，可以說是一種很精確的監控方法。但工程上斜向光的光學系統比較難架設，若角度稍有變化答案就不一樣，也就是既貴又敏感，所以不普遍被採納。通常監控系統的入射光都是垂直入射，這又分為直接監控 (direct) 與間接監控 (indirect)、單波長監控 (single wavelength) 與多波長 (variable wavelength or monochromatic monitoring) 與廣波域監控 (broadband monitoring)，信號取自穿透光 (transmission) 或反射光 (reflection)，如圖 2 所示。所謂直接監控是指監控片本身就是產品，若不是則稱為間接監控。間接監控法可以將產品放在監控片旁邊，面積可以很大，亦即產量較多。

以下就先討論垂直入射光單一波長的光學監控法。此法是利用光學監控記錄紙 (sheet) (目前大多

已改用計算機紀錄)，紀錄 T 或 R 隨膜厚成長的變化，稱之為光學監控紀錄圖 (runsheet)，此紀錄圖可供鍍膜當時及鍍膜後分析每一層鍍得精確與否、同一材料鍍久後折射率還一樣否，以及做為日後鍍同樣設計之濾光片時的參考範本。

光學監控方法傳統上有兩種：極值法 (turning point monitoring method) 和定值監控法 (level monitoring method)。前者是利用膜厚增加時，其反射率和穿透率會跟著起變化，當反射率或穿透率走到極值點 (turning point) 時可知所鍍膜之光學厚度 nd 為監控波長 λ_0 的四分之一的整數倍。此法簡單容易識別，很多濾光片的設計以四分之一波膜為主，因此用極值法來監控非常方便。但極值法之誤差大，因為當反射率或穿透率在極值附近變化很緩慢，亦即光學膜厚增加 Δnd 很多， ΔR 或 ΔT 才起一點點變化。所以鍍四分之一波膜時，例如鍍窄帶濾光片，常過了四分之一波位才停鍍，稱為過四分之一波位法 (overshot)，也就是讓監控信號稍微超過極值才停鍍。

為補救極值法的缺點，可改用定值監控法 (level monitoring method)，其先決條件為監控光源之光強度穩定度要很好或利用調制方法使其不穩定量消除，光通過的視窗不可被鍍到而影響光強度。此法是利用停鍍點不在監控波長之四分之一波位，

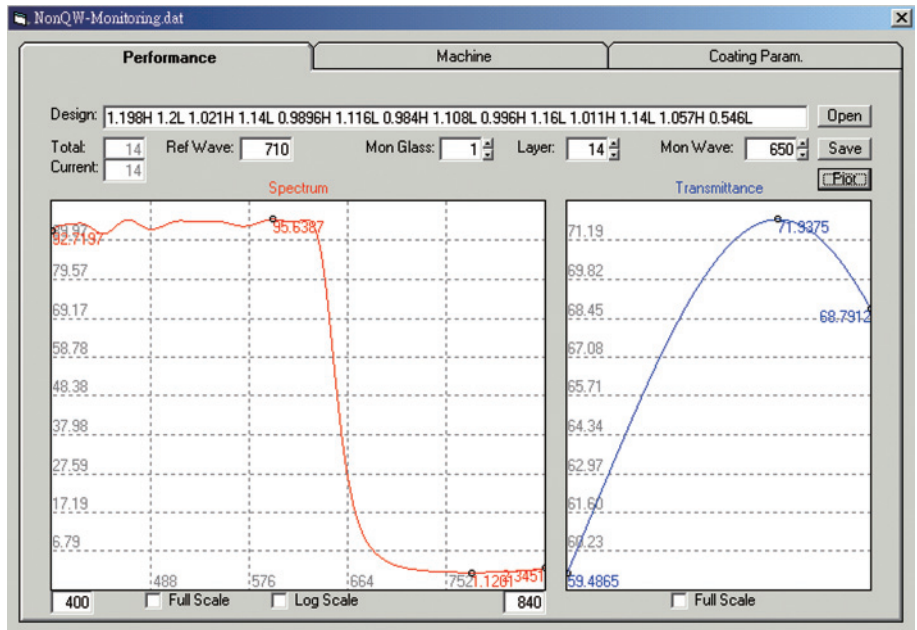


圖 3.
鍍多層膜時可隨膜層改變而調整監控波長 (Mon Wave)。

可能的話選擇之監控波長 λ_1 要能使反射率 (或穿透率) 超過極值 (如此可校正所鍍膜之折射率)，並接近八分之三波位，亦即靈敏度高的地方，然後經由電腦計算在 λ_1 時該總膜厚之反射率 (或穿透率) 為多少，此值即為停鍍之定值點。此法可鍍多層膜，但若膜層數太多就很難達到靈敏度高的定值點，此時可改換使用其他波長 λ_2 當監控波長。因此監控用之光接受器前需裝數片波長不同的監控窄帶濾光片，或用一單光儀以轉動光柵角度選取任一監控波長 λ_i ，此時每要鍍一層前可先經由電腦快速計算選那一波長其反射率 (或穿透率) 定點值為最佳值，而選取後之波長即為監控波長。因此整個濾光片的完成可能需要使用到幾個不同的監控波長。

由於定值監控法需先知道薄膜的折射率 n ，才可計算出定點之反射值 (或穿透值)，因此當所鍍之薄膜折射率與輸入電腦之折射率不同時必須及時地做類比修正⁽¹⁾。

以上所述之光學監控法對某一波長可以得到理論上的設計值，對於其他波長則因欠缺訊息而不知，再者其他波長之膜折射率因色散關係也不同，因此有寬光譜掃描監控法 (broadband monitoring)⁽²⁾ 的提出。此監控受光器為一光譜儀，並可快速掃描所鍍出膜層之光譜，利用電腦將之與理論設計比較，若有所誤差則立即計算下層膜厚應如何修正，每一層鍍膜前並可選擇以何波長當主監控誤差較

小，如此一邊鍍一邊隨時修正，使整個波域之平均誤差值減至最小⁽³⁾。在鍍多層膜時，可隨膜層改變而調整監控波長，以使信號明顯易辨別。如圖 3 所示，原設定之監控波長為 710 nm (Ref Wave)，但到第 14 層時改為 650 nm (Mon Wave) 後信號變化會較易辨別。

三、光學導納軌跡監控法

薄膜成長之導納軌跡，除了有視覺上容易辨識之膜成長軌跡圖外，還有明確的起始點、終止點 (例如欲使反射率 = 0，則停鍍點終止在 (1, 0) 點) 以及停鍍點。若終止在實數軸上，可知道導納虛數值 = 0、相位為 180° 或 0° 。因此我們可以利用導納軌跡圖來做光學監控，稱為光學導納軌跡監控法 (optical admittance loci monitoring)⁽⁴⁻⁸⁾。圖 4 為四層抗反射膜之導納軌跡圖⁽⁶⁾，理論設計由起始點 A (A 點為基板之座標 $(n_s, 0)$)，鍍完第一層後終止在 b 點，然後鍍第二層終止在 c 點，由 c 到 d 為第三層，最後第四層終止在空氣之導納值 E 點 (1, 0) 上，所以反射率為零。但實際上鍍完第一層後終止在 B 點，穿透率誤差 $\Delta T = 0.002\%$ ，這是由於鍍時膜之折射率變大了，此不易由光學監控紀錄圖 (runsheet) 看出，如圖 5 所示，但可由導納軌跡圖判斷出來，如圖 4 右邊之放大圖所示。對導納值做

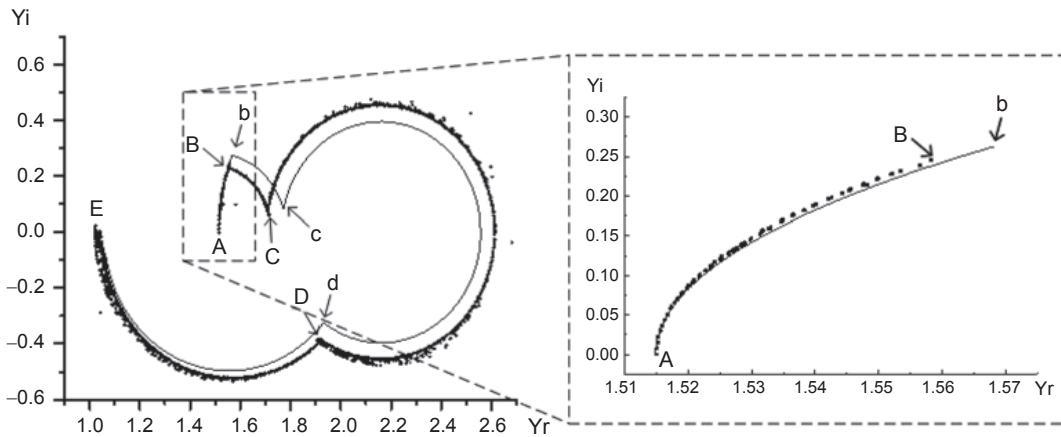


圖 4. 四層抗反射膜 G/H'L'2H''L''/Air 之導納軌跡圖，細實線為理論預設軌跡，點線為實驗軌跡⁽⁶⁾。

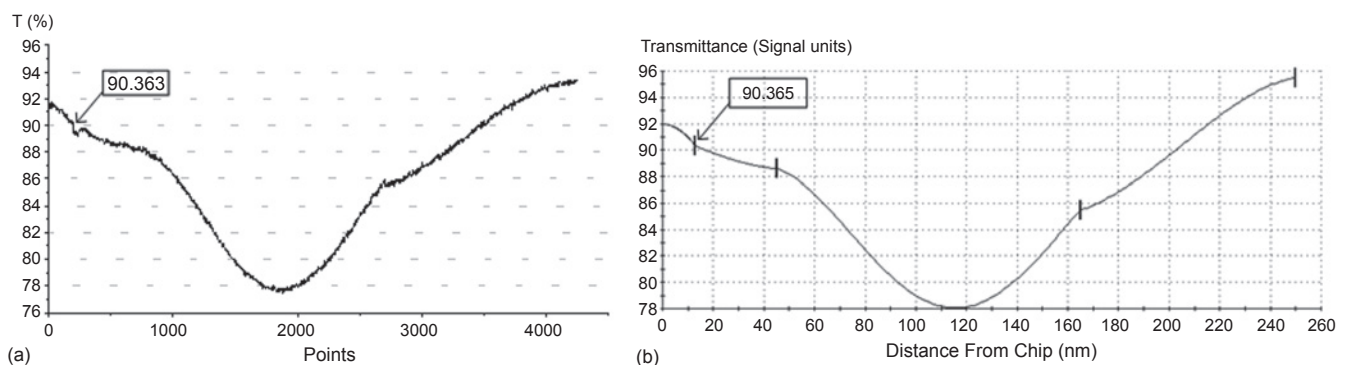


圖 5. 四層抗反射膜 G/H'L'2H''L''/Air 之光學監控紀錄圖 (runsheet)，(a) 實驗曲線，(b) 理論模擬曲線⁽⁶⁾。

點調整得第二層停在 C 點，再以 C 為起點畫出 H 材料的導納軌跡，及以目的點 E 為起點畫出 L 材料的導納軌跡，兩軌跡交叉在 D 點即是第三層的停鍍點，第四層停鍍在 E。經過對導納值做點調整後鍍得的反射光譜圖如圖 6 中之粗線 (ARM)，比用定值監控法 (虛線 runsheet) 光學成效要好⁽⁶⁾。

窄帶濾光片的設計以四分之一波膜為主，因此用極值法來監控非常方便，並且後層有補償前層厚度誤差的功能，稱為自我補償 (self compensation)^(9,10)。但如前一節所說，極值法膜厚誤差比較大，鍍後之中心波位只能接近理想值，而且半高寬會變寬，這是由於窄帶濾光片空間層 (spacer) 及其兩邊之反射膜堆的反射率由於膜厚有誤差而與理論值有所差異，兩邊之反射膜堆的反射率也不相等所致。這個缺點可用利用導納軌跡監控法來修正，說明如下。

由於利用導納軌跡比其他方法容易識別在鍍膜時膜之折射率的變化，因此我們對於下一層膜之修正會更精確。以鍍窄帶濾光片為例，假設由導納

軌跡知道上一層停鍍點不是在四分之一波厚的位置，亦即非在導納圖的實數軸上，而是在 (α, β) 點上， $\beta \neq 0$ ，若現在要鍍的膜之折射率是經過修正

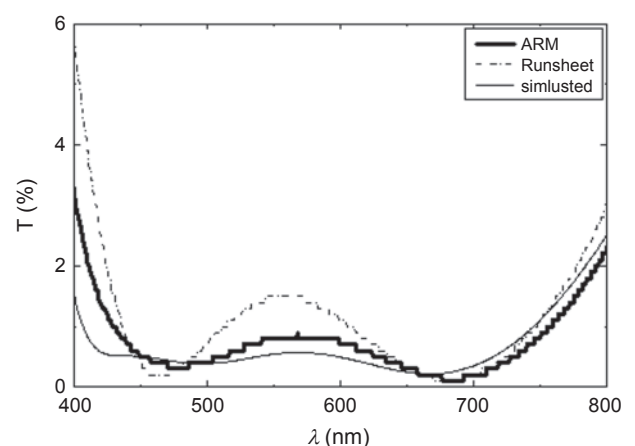


圖 6. 四層抗反射膜 G/H'L'2H''L''/Air 用不同監控法之光譜比較：粗線 (ARM) 為用光學導納軌跡監控法；虛線 (Runsheet) 為用定值監控法；細實線為理論光譜⁽⁶⁾。

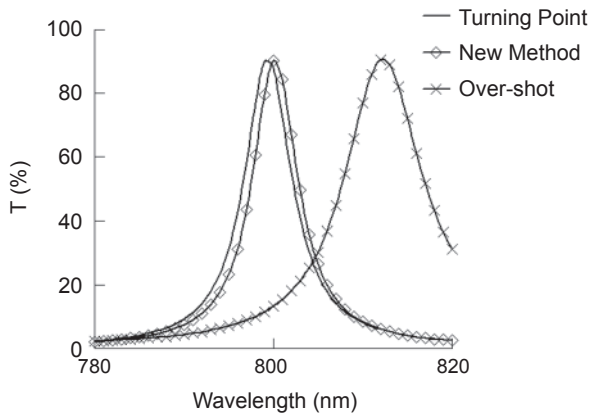


圖 7. 三種方法鍍窄帶濾光片的實驗比較：導納補償法 (圓圈點曲線)、極值法 (實線) 和過四分之一波位法 (× 線)⁽⁷⁾。

後值，設其為 n ，則可以推算出所須補償膜厚 δ_c ，如公式 (1) 所示⁽⁷⁾，如是每一層膜若有誤差都可由下一層精確地補回。

$$\delta_c = \tan^{-1} \left[\frac{1}{2\beta n} \left(n^2 - \beta^2 - \alpha^2 \pm \left| n^4 + 2\beta^2 n^2 - 2n^2 \alpha^2 + \beta^4 + 2\beta^2 \alpha^2 + \alpha^4 \right|^{1/2} \right) \right] \quad (1)$$

依據公式 (1) 之補償量及選用較靈敏的監控波長，可鍍出接近理論設計之濾光片，如圖 7 中之圓圈點曲線。圖 7 是三種方法製鍍窄帶濾光片的比較光譜，理論上中心波位在 800 nm，半高寬 5.85 nm。可以看出此導納補償法鍍出的窄帶濾光片，中心波位正好為理論設計值 800 nm 上，而且半高寬比極值法 (turning point, 實線) 和過四分之一波位法 (overshot, × 線) 要窄，亦即更接近理論值。

導納軌跡監控法不需另加硬體，在傳統的光學監控機台加上軟體即可完成，因此容易實現。

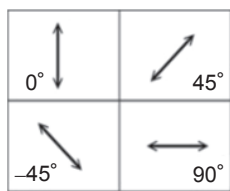


圖 8. CCD 鏡頭前之四個相位各差 90° 的偏振片⁽¹¹⁾。

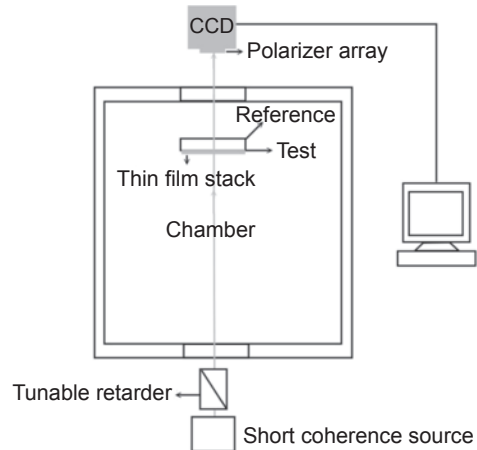


圖 9. 在一般鍍膜機加裝擷取相位之 Fizeau 干涉儀⁽⁸⁾。

四、反射係數相位擷取監控法

鍍膜中若能及時取得任一時刻膜堆的反射係數之相位移 ϕ ，再配合上述之導納軌跡資訊，鍍膜誤差會更小，這對於精密之鍍膜很重要。膜堆的相位移 ϕ 可利用四步相位移法獲得。但是要在鍍膜進行中即時取得膜堆的相位移 ϕ ，機台不能有震動。為防止機台有震動的影響，並順利取得任一時刻膜堆的相位移 ϕ ，可參照 Kimbrough 及 Wyant 等人提議，在干涉儀中取信號的 CCD 鏡頭前裝有四個相位各差 90° 的偏振片，如圖 8 所示⁽¹¹⁾，如此一次即可擷取四個相位的干涉信號，不必分四次取信號。

圖 9 是在一般鍍膜機加裝一上述擷取相位之 Fizeau 干涉儀⁽⁸⁾，基板兩面構成 Fizeau 干涉儀，亦即基板背面反射的光當參考光 (reference)，鍍膜面 (thin film stack) 反射光為待測光，可調相位延遲片 (tunable retarder) 是用來調整修正補回因基板厚度所造成的參考光與待測光的光程差 (亦即相位差)。為了避免基板面三次以上反射光及其他光學元件面之反射光的干擾，光源的相干長度很短，一般會選用光強穩定之半導體雷射 (LD)。因此不必移動任何元件，即可瞬間一次取得四個相位：0°、45°、90° 及 -45° 的干涉信號強度 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 及 I_{-45} ，於是可得鍍膜進行中任一時刻膜堆的反射係數 ρ_{sf} 之相位移 ϕ_{sf} ，如公式 (2)：

$$\phi_{sf} = \cos^{-1} \left(\frac{I_{+45} - I_{-45}}{2\sqrt{I_0 I_{90}} |\rho_{sf}| |\rho_{sa}|} \right) - 2s + \Gamma \quad (2)$$

其中， s 及 Γ 分別為 0° 與 90° 偏振光經過基板及相位延遲片 (retarder) 之相厚度差，這相厚度差在鍍膜前即可先經由調整相位延遲片確定 ρ_{sf} 及 ρ_{sa} 分別為膜面與參考面之反射係數。如是能在鍍膜過程中的任一時刻獲得膜堆的反射係數之相位移，再配合第三節所述的導納軌跡資訊，就可以使鍍膜誤差隨時修正回來，而完成更精密之鍍膜。

反射係數相位擷取監控法如上所述是很精確的監控方法，但必須要有一組干涉儀及陣列偏振相位 CCD 相機，價位比傳統光學鍍膜機要高。

五、討論與結論

精密光學濾光片的製作需要精確的膜層厚度監控，鍍膜監控可採用計時監控法、石英震盪監控法或光學監控法。計時監控法與石英震盪監控法簡單便宜，但無法知道製鍍上去的薄膜之折射率，因此精密光學薄膜一般會以光學監控法 (包括傳統光學監控法、光學導納軌跡監控法以及反射係數相位擷取監控法) 來完成。

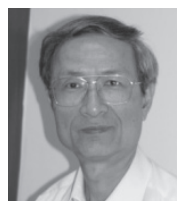
本文所述之五種方法皆適合於間接監控，也可用於直接監控，視產品而定。但若是窄帶濾光片，則一定要採直接監控，以傳統光學監控法或光學導納軌跡監控法或反射係數相位擷取監控法來做，且監控波光之半高寬必須小於產品之窄帶濾光片之半高寬的二分之一以下甚至四分之一以下，才能得到良好的成果。如果監控波長半高寬太寬，則在過了空間層 (spacer) 後，非中心波長的光強漸漸大於中心波長附近的信號，而使穿透率的變化變得不正常，嚴重時會使信號往上或往下之走向相反⁽¹²⁾，而造成停鍍點有嚴重誤差，無法完成濾光片的製鍍。

導納軌跡監控法除了可於視覺上容易辨識膜成長之軌跡外，還有明確的起始點與終止點，此外利用導納軌跡比其他方法容易識別在鍍膜時膜之折射率的變化，因此我們對於下一層膜之修正會更精確，而使鍍出的濾光片比較接近理論設計。導納軌跡監控法可在傳統的光學監控機台加上軟體即可完成，經濟實用。

鍍膜中若能及時取得任一時刻膜堆的反射係數之相位移，再配合導納軌跡資訊，則可以使鍍膜誤差及時獲得正確的修正，這對於精密之鍍膜有很大的助益，但需加裝一組干涉儀及陣列偏振相位 CCD 相機，因此機台的總價位比傳統光學鍍膜機要高一些，但比加裝橢圓偏振儀要簡單、精確、所佔空間小、對振動不敏感，而且便宜。

參考文獻

1. 李正中, 薄膜光學與度膜技術, 第 12 章, 第六版, 台北: 藝軒圖書出版 (2009).
2. B. Vidal, A. Fornier, and E. Pelletier, *Appl. Opt.*, **18**, 3851 (1979).
3. B. Vidal and E. Pelletier, *Appl. Opt.*, **18**, 3857 (1979).
4. Y. R. Chen, "Optical Monitoring of Thin-Film Through Admittance Diagram", MS Thesis, National Central University, Taiwan (2004).
5. B. Chun, C. K. Hwangbo, and J. S. Kim, *Opt. Express*, **14**, 2473 (2006).
6. C. C. Lee and Y. R. Chen, *Opt. Express*, **16** (9), 6119 (2008).
7. C. C. Lee and K. Wu, *Optics Letters*, **32** (15), 2118 (2007).
8. C. C. Lee, K. Wu, S. H. Chen, and S. J. Ma, *Opt. Express*, **15** (26), 17536 (2007).
9. H. A. Macleod, *Appl. Opt.*, **20**, 82 (1981).
10. H. A. Macleod and E. Pelletier, *Opt. Acta*, **24**, 907 (1977).
11. B. Kimbrough, J. Millerd, J. Wyant, and J. Hayes, *Proc. SPIE*, **6292**, 62920F (2006).
12. C. C. Lee, C. C. Kuo, and S. H. Chen, *Appl. Opt.*, **45**, 1344 (2006).



李正中先生為美國亞歷桑那大學光學博士，現任國立中央大學理學院院長及光電講座教授、中興大學薄膜講座教授、中央大學薄膜技術中心主持人、OSA 台灣分會主席、OSA 及 SPIE 中央大學學生分會指導教授、SPIE 及 OSA Fellow。

Cheng-Chung Lee received his Ph.D. in optical sciences from the University of Arizona, USA. He is currently Dean of College of Science and a chair professor of National Central University, a chair professor of National Chung Hsing University and the director of the Thin Film Technology Center of NCU. He is the chairman of OSA Taiwan Section and the advisor of NCU SPIE and OSA Student Chapter. He is a Fellow of both SPIE and OSA.