

FT 膜厚量測技術分析

楊富翔*、田立芬

工業技術研究院 量測中心，儀器與感測技術發展組，先進光學檢測技術發展部

E-mail: FuShiangYang@itri.org.tw, Carol_Tien@itri.org.tw

壹、前言

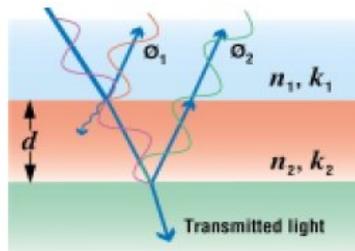
TFT LCD 面板為多層具有圖案的薄膜所組成。面板廠在各段的薄膜製程中，包括 array 段、CF 段以及 cell 段，無論是單層膜或多層膜，或是蝕刻後的圖案，由於各層膜厚會影響到最終面板的影像品質，故皆需仰賴膜厚及圖案型貌檢測設備監控製程品質。針對 CF 的膜層結構，不同的膜層其厚度皆為數 μm ，且因應產線量測速度上之需求，FT 膜厚量測技術是相當合適的方法，本文的研究目的是經由理論及實務分析之方法，探討 FT 膜厚量測法之適用性及相關重誤差因子的分析，由此可提供國內廠商在選購或自行建構 FT 膜厚量測系統時，作為評估適用性及系統設計之參考。

關鍵字：膜厚、誤差分析、FT 膜厚量測

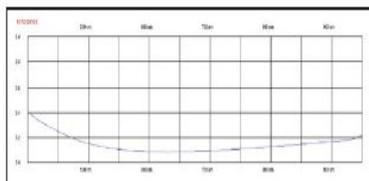
貳、研究方法

一、膜厚量測原理

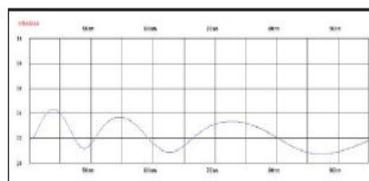
薄膜量測方法是利用光穿過介質會產生相位差，及於介面上會產生反射及穿透之特性，由薄膜兩個界面的光能量產生干涉的現象如圖一所示，可取得反射及穿透光譜如圖二所示，將此光譜經由計算即可經由薄膜的折射率 n 及消光係數 k 求得膜厚值，且可針對膜層特性及量測範圍可選擇不同波段之光譜儀及量測架構。



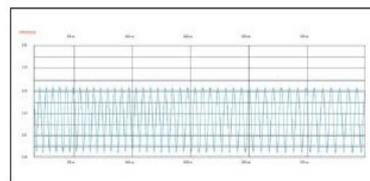
圖一、光經過薄膜反射及透射之示意圖



Measurement of a very thin layer (10 nm)



Measurement of a medium thick layer (500 nm)

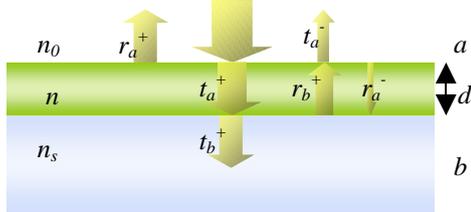


Measurement of a thick layer (100 μm)

圖二、不同厚度之薄膜反射光譜

二、膜厚量測方程式

當光由空氣(折射率 n_0)垂直入射厚度為 d 之薄膜(折射率 n)，薄膜鍍於基材 b (折射率 n_s)上，如圖三所示；Fresnel Equation 可導出各膜層界面的反射率與 n & k 值相關性，其中 r_a^+ (式 1) r_b^+ (式 2) t_a^+ (式 3) t_a^- (式 4) 為介面 a 及 b 的電場反射率及穿透率， δ 為電場經過膜層後之相位差 (式 5)， ρ (式 6) 為整體反射電場， $R(\lambda)$ (式 7) 為整體反射光譜。



$$R(\lambda) = \rho\rho^* = \frac{r_a^{+2} + r_a^{-2} + 2r_a^+r_b^+ \cos 2\delta}{1 + r_a^{+2}r_a^{-2} + 2r_a^+r_b^+ \cos 2\delta}$$

圖三、膜層界面的穿透率/反射率與 n & k 值相關性

$$r_a^+ = \frac{n_0 - n}{n + n_0} \quad (1)$$

$$r_b^+ = \frac{n - n_s}{n + n_s} \quad (2)$$

$$t_a^+ = \frac{2n_0}{n + n_0} \quad (3)$$

$$t_a^- = \frac{2n}{n + n_0} \quad (4)$$

$$\delta = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \right] (n - ik)d \quad (5)$$

$$\rho = r_a^+ + t_a^+r_b^+t_a^-e^{-i2\delta} + t_a^+r_b^+(r_a^-r_b^+)t_a^-e^{-i4\delta} + t_a^+r_b^+(r_a^-r_b^+)^2t_a^-e^{-i6\delta} \dots \quad (6)$$

$$R(\lambda) = \rho\rho^* = \frac{r_a^{+2} + r_a^{-2} + 2r_a^+r_b^+ \cos 2\delta}{1 + r_a^{+2}r_a^{-2} + 2r_a^+r_b^+ \cos 2\delta} \quad (7)$$

三、FT 膜厚量測方程式

基於薄膜量測方程式 (式 7)，使用曲線擬合膜厚演算法可以取得膜厚，一般電場反射訊號為膜層介面多重反射之總合，其方程式如 (式 6)：

因 $r_a^-r_b^+ \ll 1$ 所以

$$\rho \approx r_a^+ + t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-i2\delta} \quad (8)$$

$$R \approx \rho^2 = (r_a^+ + t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-i2\delta})^2 = (r_a^+)^2 + (t_a^+ r_b^+ t_a^-)^2 + 2r_a^+ t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-i2\delta} \quad (9)$$

量測時取得實部訊號方程式如下：

$$R \approx \rho^2 = (r_a^+)^2 + (t_a^+ r_b^+ t_a^-)^2 + 2r_a^+ t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-\frac{4\pi}{\lambda} kd} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n(\lambda)d\right) \quad (10)$$

$$R(\lambda) \approx A + B e^{-\frac{4\pi}{\lambda} kd} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n(\lambda)d\right) \quad (11)$$

$$(r_a^+)^2 + (t_a^+ r_b^+ t_a^-)^2 \equiv A \quad (12)$$

$$2r_a^+ t_a^+ r_b^+ t_a^- \equiv B \quad (13)$$

若以訊號的形式(式 11)分析，厚度 d 與第二項有關，我們可將 $n(\lambda)/\lambda$ 及 2d 視為傅式轉換兩個對應之數學空間，因此可將 $R(n(\lambda)/\lambda)$ 做傅式轉換可取得 2d 取得膜厚資訊，此為使用 FT 膜厚演算法之量測方程式。

基於簡化後的薄膜干涉數學模型，可將原先複雜而無法分析之問題簡化，題供量測誤差要因之理論分析，再與實驗結果進行分析作為研究方法之依據。

參、研究成果

一、數量級分析

以曲線擬合膜厚演算法，因包含擬合的部分，數量級分析相當複雜，所以針對 FT 膜厚演算法量測法進行誤差數量級分析，以下針對主要的誤差來源進行數量級分析。

(一)波長追朔誤差分析:

FT 量測方程式(11)若量測系統的波長追朔誤差若為 $\Delta\lambda$ 時，硬體訊號將轉換如(式 14)表示，其中方程式的改變(式 15)為厚度誤差的關鍵。

$$R(\lambda) \approx A + B e^{-\frac{4\pi}{\lambda} kd} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n(\lambda)d\right) \rightarrow R(\lambda) \approx A + B e^{-\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda} kd} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda} n(\lambda)d\right) \quad (14)$$

$$\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n(\lambda)d\right) \rightarrow \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda} n(\lambda)d\right) \quad (15)$$

$\frac{4\pi}{\lambda} n(\lambda)d$ 為 $R\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)$ 訊號之相位，我們定義為 $\phi\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)$ ，則膜厚可由以下方程式(式 16)表示:

$$d = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial\left[\phi\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)\right]}{\partial\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)} \quad (16)$$

因一般材料 $n(\lambda)$ 變化緩和，所以 $n(\lambda)$ 在微小的波長誤差 $\Delta\lambda$ 下可視為常數，所以厚度 d 可表示成以下方程式(式 17)：

$$d = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial[\phi(\frac{n(\lambda)}{\lambda})]}{\partial(\frac{n(\lambda)}{\lambda})} = \frac{1}{4\pi n} \frac{\partial[\phi(\frac{1}{\lambda})]}{\partial(\frac{1}{\lambda})} \quad (17)$$

引入波長追朔誤之情況 (式 18)

$$d' = \frac{1}{4\pi n} \frac{\partial[\phi(\frac{1}{\lambda})]}{\partial(\frac{1}{\lambda})} = \frac{1}{4\pi n} \frac{\partial[\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda} nd]}{\partial(\frac{1}{\lambda})} = \frac{\partial[\frac{1}{\lambda + \Delta\lambda}]}{\partial(\frac{1}{\lambda})} d = \frac{\frac{1}{1 + \Delta\lambda/\lambda}}{\partial(\frac{1}{\lambda})} d \quad (18)$$

因 $\Delta\lambda/\lambda \ll 1$ 所以

$$\frac{1}{1 + \Delta\lambda/\lambda} \approx \frac{1}{\lambda} [1 - \Delta\lambda/\lambda] = \frac{1}{\lambda} - \Delta\lambda \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \quad (19)$$

$$d' = \frac{d[\frac{1}{\lambda} - \Delta\lambda \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2]}{d \frac{1}{\lambda}} d = \left(1 - \frac{2\Delta\lambda}{\lambda}\right) d \quad (20)$$

由以上分析(式 20)波長追朔誤差將正比於 $-2\Delta\lambda/\lambda$, 其中 λ 我們定義為光譜量測範圍之中心波長。

(二)材料參數追朔誤差分析:

若量測系統的材料參數追朔誤差為 Δn 時, 厚度誤差的關鍵為以下方程式的改變 (式 21):

$$d = \frac{1}{4\pi n} \frac{\partial[\phi(\frac{n}{\lambda})]}{\partial(\frac{n}{\lambda})} \rightarrow d' = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial[\phi(\frac{n}{\lambda})]}{\partial(\frac{n + \Delta n}{\lambda})} \quad (21)$$

由此可分析有材料參數追朔誤差之情況 (式 22)

$$d' = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial[\phi(\frac{n}{\lambda})]}{\partial(\frac{n + \Delta n}{\lambda})} \quad (22)$$

定義 $n' = n + \Delta n$ (23)

$$d' = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial[\frac{4\pi}{\lambda} (n' - \Delta n) d]}{\partial(\frac{n'}{\lambda})} = d - \frac{\Delta n}{n'} d = \left(1 - \frac{\Delta n}{n + \Delta n}\right) d \quad (24)$$

由以上分析材料參數追朔誤差 (式 24) 將正比於 $-\Delta n/(n + \Delta n)$, 其中 n 為正確的材料折射率, Δn 為材料折射率誤差。

(三)探頭架設角度誤差分析

探頭架設角度誤差將影響下方程式的改變 (式 25) :

$$R(\lambda) \approx A + B e^{-\frac{4\pi}{\lambda}kd} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n(\lambda)d\right)$$

$$\rightarrow R(\lambda) \approx A' + B' e^{-\frac{4\pi}{\lambda}k\sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}d} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n(\lambda)\sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}d\right) \quad (25)$$

其中 $\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n(\lambda)d\right) \rightarrow \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n(\lambda)\sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}d\right)$ 為厚度誤差的關鍵,探頭架角度誤差之情況分

析如下 (式 26) :

$$d' = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial\left[\phi\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)\right]}{\partial\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial\left[\frac{4\pi}{\lambda}n(\lambda)\sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}d\right]}{\partial\left(\frac{n(\lambda)}{\lambda}\right)} = \sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}d \quad (26)$$

由以上分析探頭架設角度誤差波長追朔誤差將正比於 $\left(\sqrt{1-\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2} - 1\right)$, 其中 θ 為入射角度誤

差。

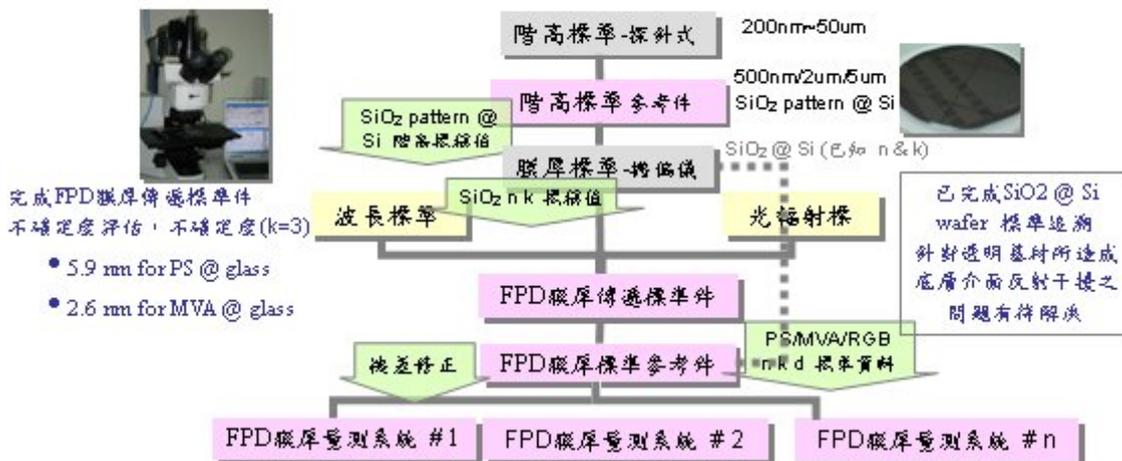
二、實驗驗證

將 FT 膜厚度測法主要誤差數量級分析相關係數總整,並將實際套用量測 PS、MVA 膜層之誤差數量級列於表一,接下來與實驗結果進行比較,以確認理論誤差分析之可用性,圖四為 CMS 發展之線上膜厚檢測設備(含 calibration embedded instrument) 實際驗證圖,以 FPD 膜厚傳遞標準件不確定度評估 PS 及 MVA 分別為 5.9 nm 及 2.6 nm,與誤差分析做比較,PS 及 MVA 的厚度為 2.6 μm 及 1.6 μm 其依誤差分析其不確定度評估為 4.9 nm 及 2.88 nm 相近,因此可驗證誤差分析的數量級是正確,至於自有開發膜厚度測系統 PS 及 MVA 分別為 30 nm 及 6 nm,針對 PS 有較大的誤差,其主要原因可由膜厚度測方程式 $R(\lambda)$ 可看出,我將第一項的係數與第二項系數的比值進行分析如表二。

表一、FT膜厚度測法主要誤差數量級分析表

| 誤差要因 | 誤差相關係數 | 誤差數量級 |
|----------|--|--|
| 波長追朔誤差 | $-\frac{2\Delta\lambda}{\lambda}$ | -0.17% ($\lambda = 600\text{nm}, \Delta\lambda = 0.5\text{nm}$) |
| 材料參數追朔誤差 | $-\frac{\Delta n}{n + \Delta n}$ | -0.19% ($n = 1.54, \Delta n = 0.003$) PS |
| | | -0.18% ($n = 1.61, \Delta n = 0.003$) MVA |
| 探頭架設角度誤差 | $\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2} - 1\right)$ | -0.0068% ($n = 1.5, \theta = 1\text{deg}$) |

| | | |
|------|--|-----------|
| 誤差總合 | $\sqrt{\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sin\theta}{n(\lambda)}\right)^2}-1\right)^2+\left(\frac{\Delta n}{n+\Delta n}\right)^2+\left(\frac{2\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}$ | 0.26% PS |
| | | 0.25% MVA |



完成自有之膜厚量測技術開發及系統測試，規格可達，

- 膜厚不確定度 $\leq 0.03 \mu\text{m}$ ($k=3$) for PS@ glass
- 膜厚不確定度 $\leq 0.006 \mu\text{m}$ ($k=3$) for MVA@ glass

圖四、CMS 發展之線上膜厚檢測設備實際驗證圖

表二、PS 及 MVA 折射率與反射率方程式係數比較

| 材料 | PS | MVA |
|-------|---------|---------|
| n_o | 1 | 1 |
| n | 1.54 | 1.61 |
| n_s | 1.5 | 1.5 |
| A | 0.0453 | 0.0557 |
| B | -0.0534 | -0.1563 |
| B/A | -0.1177 | -0.28 |

針對 B/A 項之絕對值 PS 及 MVA 分別為 0.1177 及 0.28，其代表的意義為反射光譜調制對比度，因此以 MVA 光譜調制對比度高較不受系統雜訊引響，而 PS 光譜調制對比度低所以容易受到系統雜訊引響，導致膜厚量測系統對 PS 誤差放大至 30 nm。

肆、結論與建議

本文針對 FT 膜厚量測法進行誤差來源分析，分析的條件為於量測波段範圍內並無吸收，且折射率變動緩慢，從數量及來分析材料追朔誤差雖然小於 0.2%，可用於低色散及不吸收的材料，但待測材料色散嚴重及吸收係數變異大的情況下，材料追朔誤差將導致無法量測之情況，因此建立正確的材料係數是 FT 膜厚量測首要要務，若材料係數追朔誤差甚小，本文探討之分析方法可適用於相關重要誤差因子的分析，可提供國內廠商在選購或自行建構 FT 膜厚量測系統時，作為評估適用性及系統設計

之參考。另外量測系統之雜訊因子相當重要，未來將針對系統訊雜比於膜厚度測影響進行分析，提供更完整的 FT 膜厚度測分析評估方法。

伍、 參考文獻

[1] A non-contact optical method for measuring the thickness of transparent thin films and coatings”

www.Scalartechnologies.com

[2] Santiago Costantino and Oscar E. Martínez, (2003)“Wide band interferometry for thickness measurement”, OPTICS EXPRESS 2003 Vol. 11, No. 8 pp. 952-957

[3] Jason J. Nichols and P. Ewen King-Smith.(2003) “Thickness of the Pre- and Post-Contact Lens Tear Film Measured In Vivo by Interferometry” Investigative Ophthalmology & Visual Science, January 2003, Vol. 44, No. 1 pp. 68-77

[4] Claudia Pacholski, Marta Sartor, and Michael J. Sailor ,(2005)“Reflective Interferometric Fourier Transform Spectroscopy” *J Am Chem Soc.* 2005 August 24; 127(33)

[5] Qing Xiao, Jiangang Wang, Shaoqun Zeng (2009)*, Qingming Luo, “spectral interferometric method to measure thickness with large range” Optics Communications 282 (2009) 3076–3080