

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

光學常數及相關量之測量方法及應用之研究(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2215-E-009-020-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

計畫主持人：蘇德欽

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 8 月 20 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告
光學常數及相關之測量方法及應用之研究
**Studies on the methods for measuring optical constants and their
related parameters**

計畫編號：NSC90-2215-E-009-077

執行期限：90年08月01日至92年07月31日

主持人：蘇德欽 國立交通大學 光電工程研究所

E-mail：t7503@faculty.nctu.edu.tw

中文摘要

在本計畫中，研究更簡單的光學測量方法來測量金屬的複數折射率和厚度，其方法是利用旋光外差光由待測金屬薄膜的一側射入，光在薄金屬間發生多重反射，接著利用旋光外差干涉術測量光在薄金屬膜內發生多重反射所引入之 p-偏光與 s-偏光間的相位差，代入由 Fresnel 方程所推導的特殊方程組，同時藉由旋轉檢偏板的方式，進而可解出薄金屬膜的複數折射率及其膜厚。由於本方法是利用共光程旋光外差干涉術，因此具有高穩定度、高精確度、不易受外界影響等的優點。

關鍵字：金屬膜、折射率、干涉儀、相位測量。

英文摘要

A circularly polarized heterodyne light beam is incident on a thin metal film, successive reflections and refractions occur at the two sides of the thin film. The phase difference between p- and s- polarizations of the multiple beam interference signal can be measured accurately with an analyzer and the heterodyne interferometry. It depends on the azimuth angle of the analyzer, the complex refractive index and the thickness of the thin metal film. The measured values of phase differences under three different azimuth angles

of the analyzer can be substituted into the special equations derived from Fresnel's equations and multiple beam interference. Hence the complex refractive index and the thickness of the thin metal film can be estimated by using a personal computer with numerical analysis technique. Because of its common path optical configuration and its heterodyne interferometric phase measurement, this method has many merits such as high stability against the surrounding vibration, high resolution, and easy operation.

Key words: Metal film, refractive index, interferometry, phase measurement.

一、緒論

金屬薄膜的複數折射率及其厚度的量測在微電子、光電子及光學上扮演著極重要的角色；目前有許多測量金屬膜厚及複數折射率的方法，但有些方法只能測金屬膜參數的其中一部份[1-5]；而有些方法雖然可以同時量測金屬膜的複數折射率及其厚度[6-9]，但量測方式與光強度有關，因此量測上的靈敏度和解析度容易受到周圍環境及散射光影響。此外，上述之方法亦需改變入射角以求得金屬膜厚及其複數折射率，如此也會造成實驗上的複雜性。有鑑於此，本計畫中，研究出一種簡單的方法測量金屬膜的複數折射率及

厚度。由於本方法是利用共光程旋光外差干涉術，因此光學裝置簡單、操作容易且具有高穩定度、高精確度、不易受外界影響的優點。同時經由實驗結果驗證，與橢圓儀之結果有很高的相似性。

二、原理

旋光外差干涉術的光學架構如 Fig 1 所示，為了方便起見，光沿+z 方向前進，水平方向為 x 軸。與 x 軸夾 45 度之線性偏振雷射光通過快軸與 x 軸夾 0 度的電光晶體 EO，若有一角頻率為 \tilde{S} ，振幅為 EO 半波電壓的鋸齒波電壓信號加於 EO 上，則通過 EO 之後的光線，其 p-與 s-偏光間會有一角頻率差 \tilde{S} 。此光線再經過與快軸在 x 軸方向的四分之一波片 Q 後即成為旋光外差光源。當旋光外差光源以入射角為 θ_0 入射至待測物上，再經由待測物反射通過方位角為 r 的檢偏板之後，最後經由光偵測器 D 接收成為測試信號。此測試光強度可表示為：

$$I_r = |E_r|^2 = I_0[1 + \chi \cos(\tilde{S}t + w)], \quad (1)$$

其中， I_0 及 χ 分別為調制訊號的振幅項與 visibility； w 為經由待測物所引進 p-偏光及 s-偏光間的相位差，其值可表示為：

$$I_0 = \frac{1}{2}(|r_p|^2 \cos^2 r + |r_s|^2 \sin^2 r), \quad (2a)$$

$$\chi = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{I_0}, \quad (2b)$$

$$A = \frac{1}{2}(|r_p|^2 \cos^2 r - |r_s|^2 \sin^2 r), \quad (2c)$$

$$B = \frac{1}{2}(r_p r_s^* + r_s r_p^*) \sin r \cos r, \quad (2d)$$

$$w = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{(r_p r_s^* + r_s r_p^*) \sin r \cos r}{|r_p|^2 \cos^2 r - |r_s|^2 \sin^2 r}\right], \quad (2e)$$

其中， r_p^* 與 r_s^* 代表 r_p 及 r_s 的共軛複數。而 r_p 及 r_s 代表經過待測物多重反射後的 p-及 s-偏

光反射係數，根據 Fresnel 方程式可表示為 [10]：

$$r_p = \frac{r_{01,p} + r_{12,p} e^{i2S}}{1 + r_{01,p} r_{12,p} e^{i2S}}, \quad (3a)$$

$$r_s = \frac{r_{01,s} + r_{12,s} e^{i2S}}{1 + r_{01,s} r_{12,s} e^{i2S}}; \quad (3b)$$

下標 0,1,2 分別代表空氣、金屬膜及玻璃基板； r_{01} 、 r_{12} 及 S 根據 Fresnel 方程可表示為：

$$r_{01,p} = \frac{n_1 \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1},$$

$$r_{12,p} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}, \quad (4a)$$

$$r_{01,s} = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1},$$

$$r_{12,s} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (4b)$$

$$S = \frac{2fd\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}}{\lambda}, \quad (4c)$$

其中， n_0 、 n_1 及 n_2 分別代表空氣、金屬膜及玻璃基板的折射率且 $n_1 = n + ik$ ； d 代表金屬膜的厚度； λ 代表入射光的波長。另一方面，由波形產生器輸入至鎖相放大器中的參考訊號 I_r 可表示為：

$$I_r = \frac{1}{2}[1 + \cos(\tilde{S}t)]. \quad (5)$$

根據(1)及(5)式，將測試訊號 I_t 及參考訊號 I_r 輸入至鎖相放大器中便可以得到經由待測物引進之相位差。由於 r_p 、 r_s 、 r_p^* 及 r_s^* 為 n 、 k 、 d 及 θ_0 的函數，因此，當固定入射角時，同時可以透過改變三個檢偏板方位角來得到三個方程式，接著利用三維牛頓法解此聯立方程式，進而可求出金屬膜的 n 、 k 及 d 。

三、實驗結果

為了驗證本方法之可行性，我們在角解析度為 0.005° 之高解析旋轉平台上 (Model PS-0-90, Japan Chuo Precision Industrial Company) 分別放置 5 種在 BK7 平板玻璃和 BK7 稜鏡上鍍有不同厚度的金薄膜的待測物，其代號分別為 Sample 1~5。此外，本實驗使用 632.8nm 之 He-Ne 雷射作為測試光源，同時電光晶體 EO (Model 4002, New Focus) 則被 1kHz 的鋸齒波和半波電壓為 125V 的信號產生器所調製成為外差光源，鎖相放大器解析度為 0.001° (Model SR-850, Stanford Research System)。在實驗上入射角固定在 50° ，檢偏板 θ 分別調為 50° 、 55° 和 65° ，鎖相放大器記錄之相位值，最後利用個人電腦去分析數值，則實驗結果整理如 Tab. 1 所示，在該表的最右三欄是以橢圓儀 (Model eta, Steag) 所測得的結果。由實驗的結果證實，它們有非常好的對應性。

四、討論

根據 (2e) 式，我們利用數學軟體 "MATHEMATICA" 推得光學常數及厚度之誤差量，其結果可表示為：

$$|\Delta n| = \frac{B_3 C_3 |\Delta m_1| - B_3 C_3 |\Delta m_2| - B_3 C_3 |\Delta m_3| + B_3 C_3 |\Delta m_4| + B_3 C_3 |\Delta m_5| - B_3 C_3 |\Delta m_6|}{-A_3 B_3 C_3 + A_2 B_3 C_3 + A_3 B_3 C_2 - A_4 B_3 C_2 - A_2 B_3 C_3 + A_4 B_3 C_3}, \quad (6)$$

$$|\Delta k| = \frac{A_3 C_3 |\Delta m_1| - A_3 C_3 |\Delta m_2| - A_3 C_3 |\Delta m_3| + A_3 C_3 |\Delta m_4| + A_3 C_3 |\Delta m_5| - A_3 C_3 |\Delta m_6|}{A_3 B_3 C_3 - A_2 B_3 C_3 - A_3 B_3 C_2 + A_4 B_3 C_2 + A_2 B_3 C_3 - A_4 B_3 C_3}, \quad (7)$$

$$|\Delta d| = \frac{A_3 B_3 |\Delta m_1| - A_3 B_3 |\Delta m_2| - A_3 B_3 |\Delta m_3| + A_3 B_3 |\Delta m_4| + A_3 B_3 |\Delta m_5| - A_3 B_3 |\Delta m_6|}{-A_3 B_3 C_3 + A_2 B_3 C_3 + A_3 B_3 C_2 - A_4 B_3 C_2 - A_2 B_3 C_3 + A_4 B_3 C_3}, \quad (8)$$

其中，

$$A_1 = \left| \frac{\partial m_1}{\partial n} \right|; \quad A_2 = \left| \frac{\partial m_2}{\partial n} \right|; \quad A_3 = \left| \frac{\partial m_3}{\partial n} \right|; \quad (9a)$$

$$B_1 = \left| \frac{\partial m_1}{\partial k} \right|; \quad B_2 = \left| \frac{\partial m_2}{\partial k} \right|; \quad B_3 = \left| \frac{\partial m_3}{\partial n} \right|; \quad (9b)$$

$$C_1 = \left| \frac{\partial m_1}{\partial d} \right|; \quad C_2 = \left| \frac{\partial m_2}{\partial d} \right|; \quad C_3 = \left| \frac{\partial m_3}{\partial n} \right|; \quad (9c)$$

因此，在考慮偏振旋轉誤差、偏振混合誤差及相位計本身的誤差等誤差因素，本實驗的

相位誤差量 $|\Delta m_1| = |\Delta m_2| = |\Delta m_3| = 0.03^\circ$ [5]，且將各個待測物由前所述之方法得到的折射率及厚度，如 Tab. 1 所示，分別代入 (6)~(9) 式中，則可分別求出各測試樣本的誤差量如 Tab. 2 所示。

五、結論

在本計畫中，研究出簡單的光學方法，可以同時測量單層金屬膜的複數折射率及其厚度。由於該方法是利用共光程旋光外差干涉術，因此光學裝置簡單、操作容易且具有高穩定度、高精確度、不易受外界影響的優點。

六、參考文獻

1. M. Cathelinaud, F. Lemarquis, C. Amra: Appl. Opt. **41**, 2546 (2002)
2. E. Elizalde, J. M. Frigerio, J. Rivory: Appl. Opt. **25**, 4557 (1986)
3. H. G. Tompkins, T. Zhu, E. Chen: J. Vac. Sci. Technol. A. **16**, 1297 (1998)
4. V. A. Lodi, S. Donati, S. Merlo, D. Beltrami: Appl. Opt. **37**, 5298 (1998)
5. M. H. Chiu, J. Y. Lee, D. C. Su: Appl. Opt. **38**, 4047 (1999)
6. H. Kitajima, K. Hiea, Y. Suematsu: J. Opt. Soc. Am. **70**, 1507 (1980)
7. J. Lekner: J. Opt. Soc. Am. A. **11**, 2156 (1994)
8. E. W. Rogala, H. H. Barrett: J. Opt. Am. A. **15**, 538 (1998)
9. A. B. Djuricic, T. Fritz, K. Leo: Opt. Commun. **166**, 35 (1999)
10. M. Born, E. Wolf: *Principles of optics* 7th ed (Cambridge University Press 1999), ch. 1.

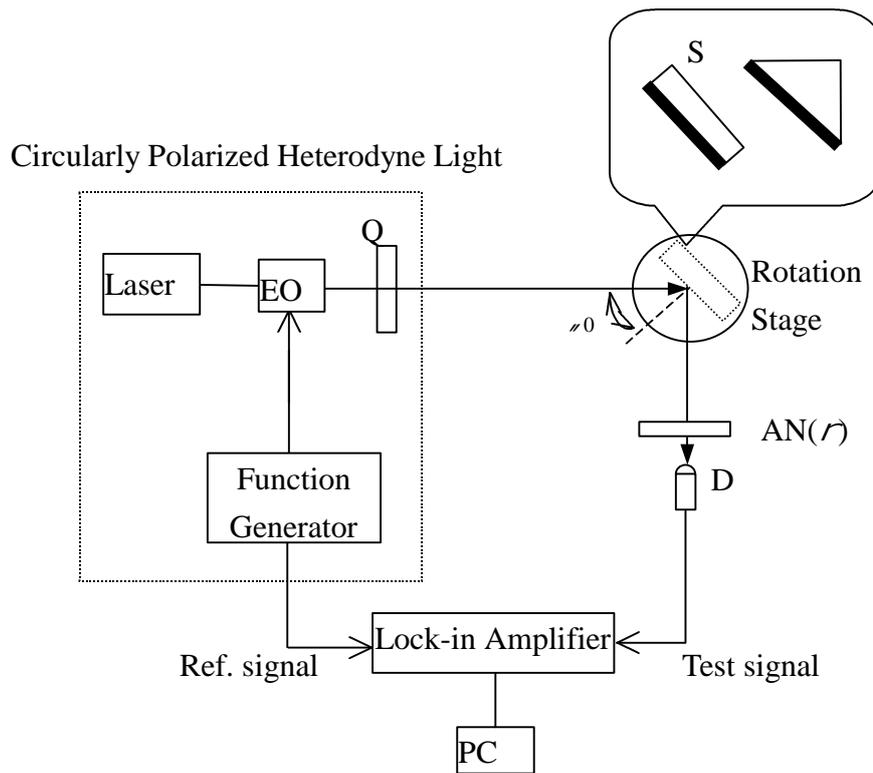


Fig. 1 測量金屬薄膜之複數折射率及厚度

Sample No.	experimental results			reference data		
	n	k	$d(\text{nm})$	n	k	$d(\text{nm})$
1(plate)	0.288	3.536	15.826	0.288	3.543	15.898
2(plate)	0.294	3.574	20.992	0.295	3.573	21.102
3(plate)	0.201	3.562	31.992	0.199	3.560	32.640
4(prism)	0.197	3.563	35.168	0.201	3.561	35.284
5(prism)	0.211	3.596	40.235	0.213	3.599	40.129

Tab. 1 實驗結果與參考值的比較

Sample	$ \Delta n $	$ \Delta k $	$ \Delta d (\text{nm})$
1	1.01×10^{-3}	1.45×10^{-3}	0.05
2	1.81×10^{-3}	2.53×10^{-3}	0.08
3	2.8×10^{-3}	4.09×10^{-3}	0.18
4	1.35×10^{-3}	1.86×10^{-3}	0.23
5	1.43×10^{-3}	3.14×10^{-3}	0.73

Tab. 2 Δn 、 Δk 、和 Δd 等的實驗誤差量