

薄膜蝕刻圖案的多波長橢偏影像對比研究

王浩偉*, 謝易辰

*明志科技大學, 機電工程研究所, 光電檢測實驗室

E-mail: hwwang@mail.mit.edu.tw

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: ichhsieh@itri.org.tw

摘要

本文提出創新的多波長影像橢偏方法。裝置採偏振器-相位補償器-樣品-檢偏器的架構, 以多波長可調雷射的投光設計, 加上偏振及相位元件多波長調整的新方法, 凸顯消光與非消光區域間的多波長影像對比。此方法特徵在於可掃描觀測多個波長的橢偏影像, 藉著特徵波長的選擇, 凸顯多層膜結構的缺陷影像對比。可針對薄膜蝕刻圖案缺陷, 進行高影像對比之辨識檢測。較現有白光照明法、偏光影像法、光譜式橢偏影像方法, 可分析更多膜材種類與層數。

關鍵字：橢偏、影像對比、多波長、消光

壹、前言

薄膜光學檢測是薄膜製程中不可或缺的工具, 隨著薄膜應用的廣泛, 膜質種類及膜層數目逐漸增加, 傳統薄膜影像對比檢測方法如白光(White Light)影像檢測[1]、偏光(Polarized Light)影像檢測[2]常無法提供足夠影像對比(Image Contrast)。後來雖有單波長及光譜式的影像橢偏(Imaging Ellipsometry)檢測技術[3-7]發展出來, 此方法對高反射多層金屬薄膜或透明多層介電薄膜檢測, 可提供較高的影像對比。但待測薄膜的折射率與厚度為波長的函數, 既有影像橢偏檢測技術並沒有嚴格考慮多波長的影響, 因而無法對複雜的薄膜蝕刻圖案得到最佳影像對比。本文針對此, 提出多波長影像橢偏方法來解決此問題。以 Fresnel 方程及 Jones Matrix 薄膜偏光數學模型數值模擬, 配合雙旋轉元件的多波長橢偏影像實驗, 驗證分析多波長下, 薄膜蝕刻圖案不同位置間影像對比與橢偏反射光信號的關連。

貳、模擬方法與結果

我們採用偏振器-相位補償器-樣品-檢偏器(Polarizer-Compensator-Sample-Analyzer, PCSA)架構, 利用消光(Null)原理, 以偏振器方位角 P 及相位補償器相位角 δ_C 兩元件參數為變數, 在特定膜材被消光形成全暗畫面時, 去顯示其他區域膜材非消光狀態時的橢偏影像, 來凸顯出消光及非消光區域間的影像對比, 以下將對整個可見光波段作模擬計算。

我們以BK7基板、 Si_3N_4 與Cr膜所構成的薄膜蝕刻圖案當成樣品, 如圖1所示, area 1~3各區域有不同膜層組合。

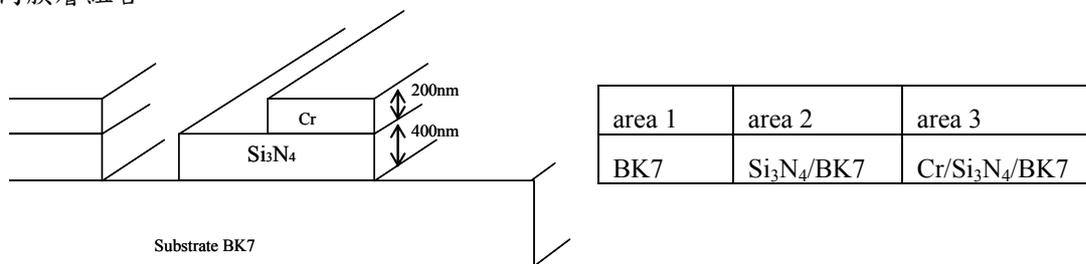


圖 1: 薄膜蝕刻結構

在某一波長 λ 下, 選擇特定區域做消光 (此處以 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 為例), 入射光通過PCSA後的輸出電場可用如下Jones Matrix [8]表示

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos^2 A & \cos A \sin A \\ \cos A \sin A & \sin^2 A \end{bmatrix}}_{\text{A term}} \underbrace{\begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}}_{\text{S term}} e^{\frac{-i\delta_c}{2}} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_c}{2} + i \sin \frac{\delta_c}{2} \cos 2C & i \sin \frac{\delta_c}{2} \sin 2C \\ i \sin \frac{\delta_c}{2} \sin 2C & \cos \frac{\delta_c}{2} - i \sin \frac{\delta_c}{2} \cos 2C \end{bmatrix}}_{\text{C term}} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos P & 0 \\ 0 & \sin P \end{bmatrix}}_{\text{P term}} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)

公式(1)中的 r_p 、 r_s 分別為P波與S波的複數Fresnel係數，P為偏振器的方位角，A為檢偏器的方位角，C與 δ_c 為相位補償器的方位角與相位角，此處光入射電場 E_x 、 E_y 令為 1 V/m^2 以方便計算。若我們假設 $A=45^\circ$ 及 $C=0$ ，(1)式可化簡成

$$\frac{r_p}{r_s} = \tan(-P) e^{-i\delta_c} \quad (2)$$

公式(2)中的 r_p 及 r_s 可由單介面Fresnel反射係數 r_{ij}^p 、 r_{ij}^s 所組合[9]，如下(3)式

$$\frac{r_p}{r_s} = \frac{\frac{r_{12}^p + r_{23}^p e^{-i2\beta}}{1 + r_{12}^p r_{23}^p e^{-i2\beta}}}{\frac{r_{12}^s + r_{23}^s e^{-i2\beta}}{1 + r_{12}^s r_{23}^s e^{-i2\beta}}} \quad (3)$$

公式(3)中 r_{ij}^p 、 r_{ij}^s 的下標代表光線從介質i入射到介質j， β 代表相位厚度(phase thickness)，為膜厚/光波長/膜折射率/光入射角(d, λ, n, ϕ)的函數。一般來說在製程的線上檢測中，薄膜複數折射率n與膜厚d的數值為已知，所以此處膜厚d以圖1數值代入，而薄膜複數折射率n則利用Scientific Computing International公司的Film Wizard Software得到。若對於如區域3之多層膜模擬， r_p 及 r_s 可藉由迭代 r_{23} 項來擴充計算， r_p 及 r_s 兩者均為波長 λ 的函數。此處光入射角 ϕ 假設為Pseudo-Brewster的60度。經由這些假設，(3)式中 r_p 及 r_s 可計算得到，代入(2)式後可再計算得到 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 全暗時對應的P及 δ_c ，此處解得的P及 δ_c 如同 r_p 及 r_s 均為 λ 的函數。

在此消光時的(P, δ_c)條件下，跟著重新計算非消光區域如BK7及 $\text{Cr}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 的橢偏反射光強度。先把 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 全暗時的(P, δ_c)結果代回(1)式，並以(3)式重新計算非消光區域的 r_p 及 r_s 數值，也代回(1)式。最後(1)式等號左邊的電場計算結果將不為零，即計算出非消光區域1和3的電場值。如此我們可藉所計算得到的消光與非消光區域電場值，預估在整個可見光波段下，膜層不同區域彼此間的影像對比。

模擬計算結果如圖2及圖3所示， $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 消光時的(P, δ_c)隨波長而改變，其他兩非消光區域BK7及 $\text{Cr}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 的橢偏反射光信號亦隨波長而改變。值得注意的是，BK7的曲線在特徵波長427 nm及584 nm處有極大值， $\text{Cr}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 的曲線在特徵波長485 nm處有極大值。意味在這些特徵波長下BK7及 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 的橢偏反射光信號會漏光到偵測器，而與全暗的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 產生明顯對比。實驗中如能鎖定這些特徵波長去量測橢偏反射光信號，消光區域與非消光區域間將可得到最大對比，此方法有利於薄膜蝕刻結構的缺陷檢測。

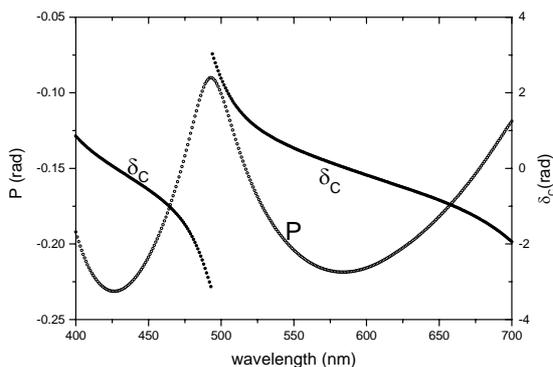


圖 2: 在 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 消光條件下的P(λ)與 $\delta_c(\lambda)$ 模擬

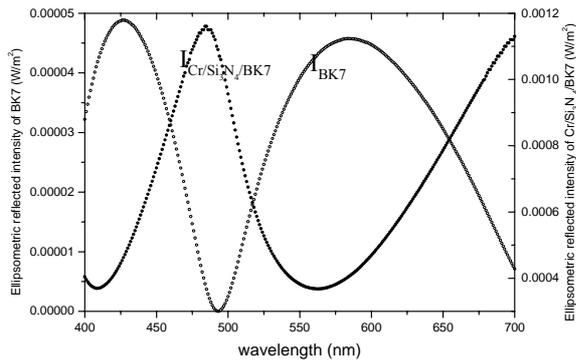


圖 3: 在 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 消光條件下的 BK7 與 $\text{Cr}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 橢偏反射強度模擬

叁、實驗方法與結果

實驗光路如圖 4，可分為打光及影像擷取兩大部分，相對夾角為 120° 。在打光部分，多波長可調 He-Ne 雷射光先經空間濾波器及準直鏡，將高斯雷射光束做擴束、準直、強度均勻化後，再入射偏振器及相位補償器。偏振器我們選擇格蘭-湯普生(Glan-Tompson)偏振器，以馬達旋轉到圖 2 計算的 $P(\lambda)$ 。相位補償器我們選擇液晶相位可變延遲器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)，以不同電壓驅動 LCVR 使光帶有圖 2 計算的 $\delta_c(\lambda)$ 信息，過程中 LCVR 的 C 一直維持 0° 。最後此調制後 $(P(\lambda), \delta_c(\lambda))$ 信息光，再利用物鏡聚焦在薄膜樣品上。在影像擷取部份，則使用物鏡及管鏡(Tube Lens)將橢偏反射影像放大，光路中置入固定角度 $A=45^\circ$ 的格蘭-湯普生檢偏器，使消光與非消光信號區分出來，最後成像在電荷耦合元件(CCD)上而得到對比影像。

實驗結果如圖 5，分別在 543 nm、594 nm、604 nm、612 nm、633 nm 五個波長下，取得 Bk7 的橢偏反射率，此比例已對雷射光入射強度、實驗系統波長響應做過歸一化。從圖中可看出 BK7 的橢偏反射率隨波長起伏，在 594 nm 處有極大值，此趨勢與圖 3 的模擬結果接近。但目前受限於實驗所用的雷射光源，僅有五個波長可利用，取樣點太少以致於圖 5 極大值 594 nm 與圖 3 極大值 584 nm 有差距，未來尚需擴大實驗波長範圍，方可進一步做整個可見光範圍的理論實驗比對。

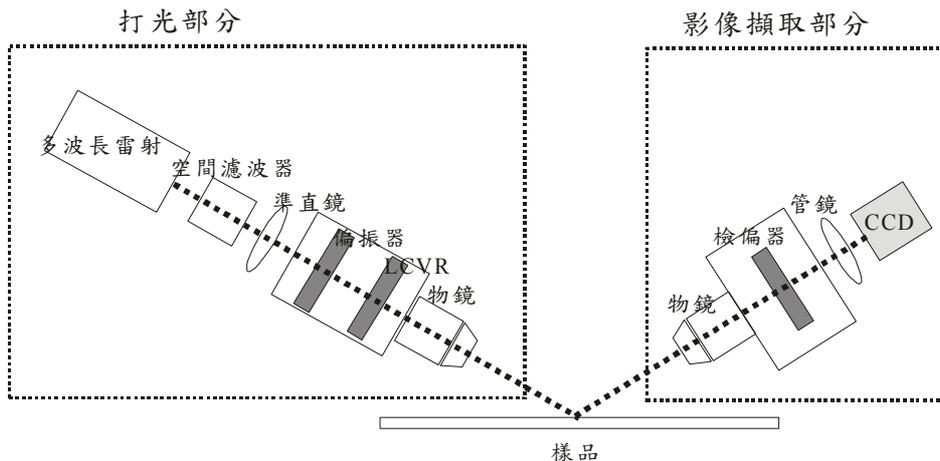


圖 4: 實驗光路

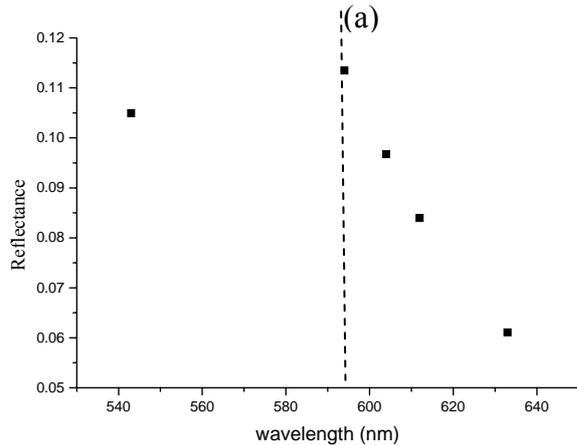


圖 5: 在 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BK7}$ 消光條件下的 BK7 橢偏反射比例

肆、結論與建議

根據我們的模擬與實驗，初步驗證薄膜蝕刻圖案橢偏對比可由特徵波長的選擇來加強，影像對比可較光譜式影像橢偏方法更加明顯。既有方法因使用濾光片，過濾後的光譜帶寬仍很大，造成只有波長中心點的光滿足消光條件，偏離中心波長的光都會造成漏光，使得消光不完全，降低了與非消光區域的對比，而本實驗使用多波長可調雷射，已克服此缺點。且既有方法將調變元件分散在打光及影像擷取兩部份，系統架設複雜，而本實驗以調整偏振器方位角及相位補償器相位角的新方法，把調變元件集中在打光部分，可使系統更模組化。惟光源多波長數目不足，後續打光部分的改良與大光譜範圍的比對驗證工作仍將持續進行。

誌謝

本研究經費來源承蒙國科會計畫(NSC 96-2218-E-131-003)贊助，在此表示莫大謝意。

參考文獻

- [1] <http://www.kubotek.com>
- [2] H. Chen, L. B. Wolff, 1998, "Polarization Phase-Based Method For Material Classification In Computer Vision", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 28, No. 1, pp. 73-83
- [3] R. F. Cohn, J. W. Wagner, and J. Kruger, 1988, "Dynamic imaging microellipsometry: theory, system design, and feasibility demonstration", *App. Opt.* Vol. 27, No. 22, pp. 4664-4671
- [4] P. Boher, O. Thomas, J. P. Piel, and J. L. Stehle, 2004, "A new multiple wavelength ellipsometric imager: design, limitations and applications", *Thin Solid Films*, 455-456, pp. 809-818
- [5] E. Adachi, H. Yoshimura, K. Nagayama, 1995, "Color ellipsoscope for real-time imaging of nonometer-scale surface phenomena", *Appl. Opt.* Vol. 34, No. 4, pp. 729-731
- [6] M. Finarov, 1994, "Method And Apparatus For Automatic Optical Inspection", US Patent 5333052
- [7] B. Y. Jung, D. C. Lim, K. G. Kim, "Thin-film inspection method and device", US Patent 6940604
- [8] H. G. Tompkins, E. A. Irene, 2004, *Handbook of Ellipsometry*, Noyes Data, USA
- [9] H. G. Tompkins, W. A. McGahan, 1999, *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry*, John Wiley & Sons, USA