

閃頻影像式橢圓偏光儀／偏光儀

Stroboscopic Illumination Photoelastic Modulated Imaging Ellipsometry/Polarimetry

趙于飛、韓建遠、蔡修銘

Yu-Faye Chao, Chien-Yuan Han, Hsiu-Ming Tsai

閃頻式影像橢圓偏光儀克服電荷耦合元件在傳輸及儲存緩慢的缺點。一般電荷耦合元件至少需要 0.03 秒方能取得一張照片，所以無法擷取光彈調變器 50 kHz 的信號。利用與光彈調變器同頻率的短脈衝光源，在某特定時間放射，即可凍結特定相位，進而取像再轉成橢圓偏光參數而成影像式橢圓偏光儀。本文乃運用此影像式橢圓偏光儀量測一個具有結構的二氧化矽薄膜，以及一油滴沿著矽晶片滑下的過程，藉其厚度的二維分布，以呈現橢圓偏光儀的影像功能。現以同樣的理念實施在偏光儀，稱之為穆勒矩陣影像偏光儀，利用 Lu-Chipman 極化矩陣的分解法，可以減少材料對入射光散射的影響，故用以量測生物介質。在此以偏光儀觀測九官皇冠葉的乾燥過程。

A novel stroboscopic illumination technique is applied in a photoelastic modulated ellipsometry/polarimetry to conquer the slow imaging processing of charge-coupled device camera system and form a fast imaging ellipsometry/polarimetry. The synchronized ultrastable short pulse is used to freeze the intensity variation of the PEM modulated signal. The 2D thickness profile of a static patterned SiO₂ thin film on silicon substrate and the drainage behavior of matching oil on silicon wafer were studied by this imaging ellipsometry. In addition to the ellipsometry, a Mueller matrix polarimetry is also constructed by the similar technique. The drying process of *Echinodorus uruguayensis* is analyzed by the polarimetry. Lu-Chipman's polar decomposition technique is used to remove the depolarization, which is caused by the multiple scattering in the medium. Under drying process, the variation of linear birefringence of leaf is observed by this imaging polarimetry.

一、前言

早在 1889 年德國物理學家 Drude⁽¹⁾ 已開始利用偏極光來量測薄膜的厚度及折射率，因而奠定了橢圓偏光儀的量測概念。但真正成為精確而又實用的儀器，則是在 1963 年 McCrankin⁽²⁾ 提出對偏光片 (polarizer, P) 及析光片 (analyzer, A) 之偏光角

(azimuth angle of the axis of transmission) 校準技術 (alignment) 之後，再加上 1970 年以後電腦、雷射與偵測器的快速進展，橢圓偏光儀也由單波長的量測技術進而具有了光譜的功能⁽³⁾，故橢圓偏光術除了可以量測薄膜以外，已廣為利用在量測各式材料的光學特性上，如液晶、高分子等異向性材料 (anisotropic materials)。

近來比較省時且又可多樣化的亮比式 (photometric ellipsometry) 橢圓偏光術已超越傳統的歸零式 (null ellipsometry)⁽⁴⁾。由於補波片的相位延遲與波長有關，故轉動析光片的 PSA (polarizer-sample-analyzer) 式橢圓偏光光譜儀發展最早⁽⁵⁾。傳統上多將析光片旋轉一週後，再將所量到的亮度加以傅立葉轉換 (Fourier transform) 或最小二乘法擬合 (least squares fitting) 量測材料的橢圓偏光參數 (ellipsometric parameters)，進而轉換成材料的光學參數，如折射率、膜厚等。這兩種方法在一週中至少需要量測 36 個亮度方能得到較為精確的結果，但 Chao 等⁽⁶⁾ 證明在一週內只用三個亮度，即可量得同等精確度的橢圓偏光參數。根據理論，如旋轉析光片量測的反射亮度，在極座標上的分布圖應該是一個有腰的斜 8，這種分布有三個參數：長軸、短軸及斜角。如果找出這些參數與橢圓偏光參數的關係，則僅須量測三個亮度，便足夠量材料的光學參數。Chao 等人^(7, 8) 以電荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 為偵測器，將此觀念成功地應用在二維影像式橢圓偏光儀 (imaging ellipsometry) 上，但此法不僅受限於機械轉動速度上，且其伴合的噪音也是此法的缺點。

自 Jaspersen⁽⁹⁾ 以光彈調變器 (photoelastic modulator) 取代了傳統橢圓偏光儀的補波片，轉成調變式橢圓偏光儀，不但解決了坊間熟悉因轉動元件所造成的不穩定，也解決了因機械轉動而受限的量測速度。一般光彈調變式橢圓偏光儀多使用兩個鎖相放大器 (lock-in amplifier)，以達到即時 (約每秒 20 組橢圓偏光參數) 量測的功能。光彈調變器的調變頻率為 50 kHz，如果用快速資料擷取卡，也可將反射光儲存後再加以分析，這種事後分析法可以達到 40 μ s 的量測速度⁽¹⁰⁾。若想將之發展成影像式，即使目前市面上一般 CCD 的取像是每秒 30 張，也不可能搭配 50 kHz 的調變機制。所幸快速資料擷取卡具有數位檢波功能 (digitized waveform)，可將反射波記錄後再分析，發現光彈調變橢圓偏光儀中的反射波型在時域 (temporal) 上的分布與空間 (spatial) 在各析光角分布類同，故如何攝取某些特定相位，便成為該快速調變系統中須突破的問題。

普通物理課本中，為了量測自由落體運動，常用連續閃光拍攝，並記錄自由落下的球，利用此球在不同時間所在的位置來證明自由落體運動，如取自網路的圖 1⁽¹¹⁾。這種利用連續閃光照運動的想法便成為閃頻技術的觀念來源。既然光彈調變器的調變速度遠快於 CCD 的取像速度，本研究團隊將傳統橢圓偏光術之連續照射模式改變為閃頻照射模式 (stroboscopic illumination)，使得光源與光彈調變器的調變頻率相互配合形成同步 (synchronous) 照射模式，進而將光彈調變式橢圓偏光儀擴展成具備影像式偵測的能力。

二、光彈調變器

光彈調變器為此橢圓偏光儀的關鍵元件，它可以調變入射光的偏振態。在發明之初其名稱為雙折

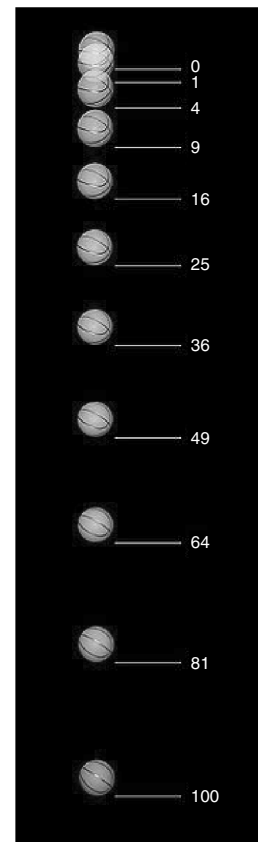


圖 1. 每秒閃 20 次取之自由落體運動。(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Falling_ball.jpg)

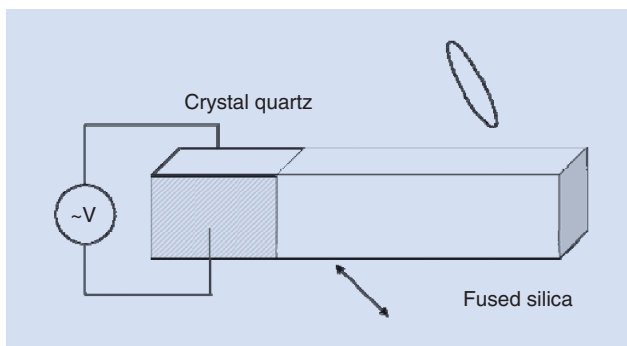


圖 2. 光彈調變器之主要結構—壓電光學晶體。

射調制器 (birefringence modulator)，原來是希望將其應用在旋光色散 (optical rotary dispersion)、法拉地旋轉 (Faraday rotation)、由應力所引起的雙折射變化 (strain-induced birefringence) 的量測，後經多位學者如 Jaspersen 與 Schnatterly⁽⁹⁾ 之持續研究改進，至今已發展成為光學量測系統中重要的光學調變元件。相較於其他種類的光學調變元件，光彈調變器具有無機械振動、入射孔徑大、調制頻率高且穩定、驅動電壓低 (幾伏特到幾十伏特)、功率消耗低、適用波長範圍寬 (根據所使用光學材料的不同，可以從紫外到遠紅外光) 等優點，故以偏振調制技術為基礎的量測研究能廣泛地應用在許多領域上。

光彈調變器通常由兩個部分組成，主要結構是如圖 2 所示的壓電 (piezoelectric) 光學晶體，通常為融石英 (fused silica) 或是氟化鈣 (calcium fluoride) 所組成之光學晶體。另一部分是產生共振的驅動器 (driver) 與換能器 (transducer)，並且在晶體兩端鍍上電極，當驅動器輸出高頻的高壓電場至光學晶體上，使之產生雙折射的變化，此現象即光彈效應

(photoelastic effect)。當一偏極光通過光彈調變器時，則互相垂直的兩偏振分量之相位延遲 Δ_p ，其調制如下式

$$\Delta_p = \delta_0 \sin(\omega t) + \delta_i$$

其中 δ_0 為調變振幅 (modulation amplitude)，其大小由外加電壓來控制， ω 為調變的頻率，而 δ_i 為靜態相位延遲 (static retardation)，是石英晶體膠著時所產生殘餘應力的結果。圖 3 為一調變振幅為半波長 (0.5λ , $\delta_0 = \pi$) 在不同時間的偏振態。如何攝取所需的偏振態便成為本研究的主題。

三、橢圓偏光儀的基本機制

橢圓偏光儀基本上是利用反射光對於入射光偏極態的轉變以反推介質的光學特性。由於最普通的偏極態是橢圓，一般熟知的線偏 (linear polarized light) 及圓偏 (circular polarized light)，僅是橢圓 (elliptical polarized light) 的特例，故量測此偏極態的儀器稱為橢圓偏光儀，而其反推光學特性的方法則純屬物理模式的設定。一個橢圓偏光儀包含軟硬體兩項方算完整。我們覺得描述此儀器量測觀念最好的是 J. A. Woollam 網站的說明，我們翻譯成圖 4 來說明橢圓偏光儀的基本機制。

橢圓偏光參數 Ψ 及 Δ 的定義是 $\tan\Psi e^{i\Delta} = r_p/r_s$ ，其中 r_p 及 r_s 分別代表平行與垂直於入射面的反射率，在設定的理論模式下，可以用這兩項參數量來推斷光學參數。早期偵測器唯有眼睛，而眼睛僅能分辨明暗，故在系統中有一延遲片

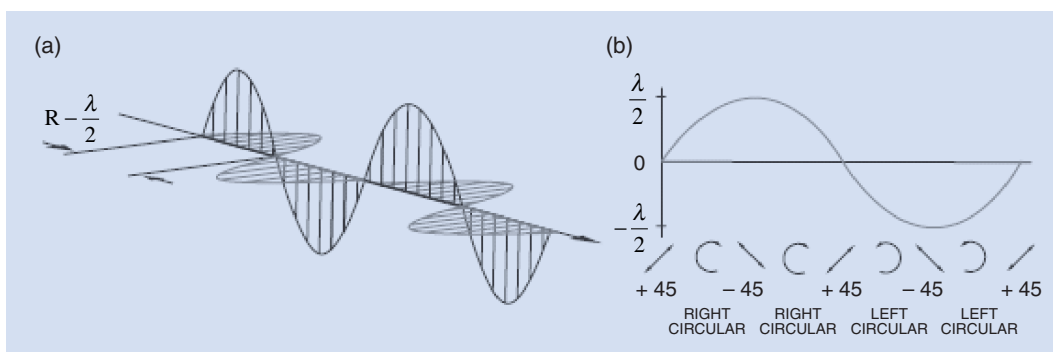


圖 3. (a) 調變振幅為半波長，(b) 各時段的偏振態⁽¹²⁾。

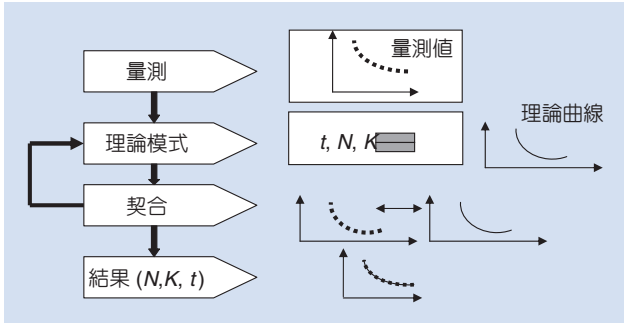


圖 4. 橢圓儀的基本運作機制。

(compensator, C)，經過繁雜的亮度分析，亮度最低的 P 及 A 的相位角可以測定 Ψ 及 Δ 。傳統橢圓偏光儀有 PCSA 或 PSCA 兩種方法，主要看延遲片放在待測物之前或後而定。在 1990 中期光彈調變器取代了延遲片，故可製成一無機械轉動的橢圓偏光儀，並大大地提升了它的量測速度。

1. 閃頻影像式橢圓偏光儀⁽¹²⁾

圖 5 為光彈調變式橢圓偏光儀架構圖，當 $P = -45^\circ$ ， $A = 45^\circ$ ，且 $\delta_0 = \pi$ 時，偵測器 (detector) 所測得的亮度應為：

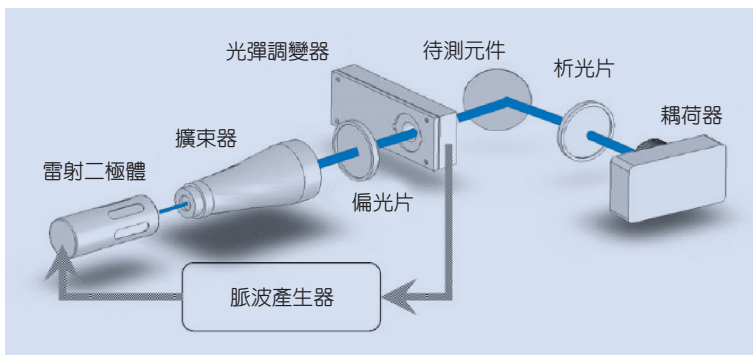
$$I = \frac{I_0}{2} [1 - \sin 2\Psi \cos(\Delta - \pi \sin \omega t)]$$

如 $\omega t = 0^\circ$ $I = \frac{I_0}{2} [1 - \sin 2\Psi \cos \Delta]$

$$\omega t = 90^\circ \quad I = \frac{I_0}{2} [1 + \sin 2\Psi \cos \Delta]$$

故 $I' = \frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{I_{90^\circ} + I_{0^\circ}} = \sin 2\Psi \cos \Delta$

且同理 $I'' = \frac{I_{210^\circ} - I_{30^\circ}}{I_{210^\circ} + I_{30^\circ}} = \sin 2\Psi \sin \Delta$



橢圓偏光參數可以用這四個時間的亮度換算出，可見下式

$$\Delta = \tan^{-1} \left(\frac{I''}{I'} \right)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\sqrt{(I')^2 + (I'')^2} \right)$$

若將偵測器換成 CCD，並將光束擴張，利用光彈調變器的原始相位 (initial phase) 為指引 (trigger) 所閃爍的短脈衝，可以在適當的時間放射 (即 $\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 及 210°)，利用此四個影像可得二維橢圓偏光參數圖，再換算成光學參數，即成為影像式橢圓偏光儀。

2. 閃頻影像式橢圓偏光儀之應用

為了量測一個具有結構的薄膜，以確認此影像式橢圓偏光儀的功能，即用閃頻照射模式量測一個僅蝕刻部分的二氧化矽 (SiO_2) 薄膜晶圓，晶圓事先經過標準的 RCA 步驟清洗，藉以去除晶圓上的塵粒、有機物與金屬離子污染，之後將晶圓置放在 $800 - 1000^\circ\text{C}$ 的爐管中，形成約 50 nm 二氧化矽薄膜，之後在晶圓上塗上一層 L 型光阻層，透過硬烤與 UV 曝光，再利用 BOE (buffer oxide etch) 蝕刻溶液 (100 nm/min)，去除未被光阻覆蓋的二氧化矽薄膜，最後利用丙酮將光阻移除，而留下具有圖形化的二氧化矽晶圓。

圖 6 為閃頻橢圓偏光儀所量測的二氧化矽薄膜。利用四張照片可以量出晶圓的二維橢圓偏光參數分布，後經薄膜光學運算可得薄膜厚度，圖 6 左上角為照相機拍攝的實際圖形與右上角為一橫切面

圖 5.

光彈調變橢圓偏光儀架構圖。

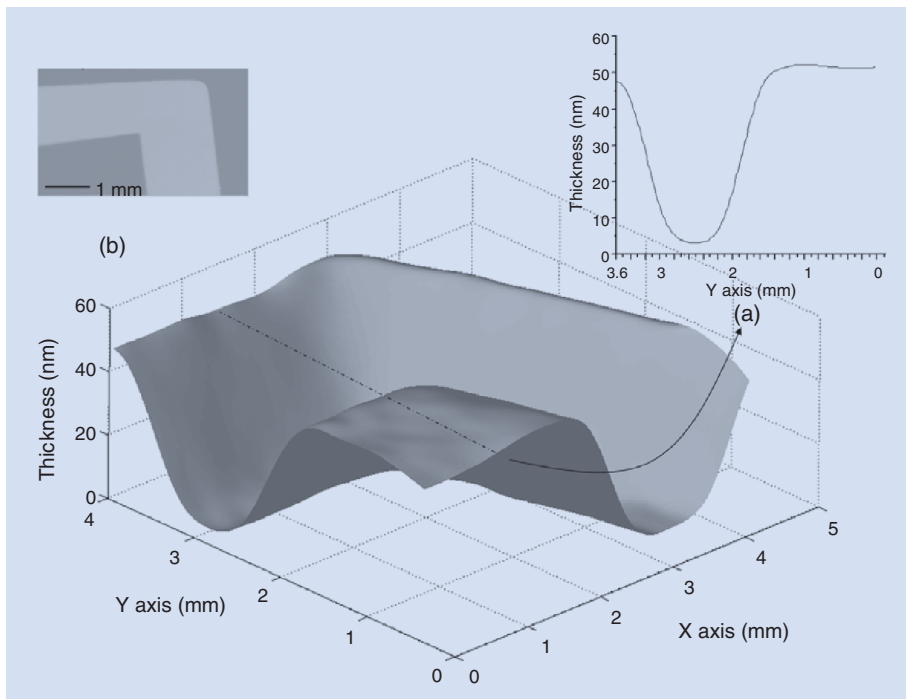


圖 6. 部分蝕二氧化矽薄膜，(a) 橫切面上厚度與位置的變化，(b) 照相機拍攝的實際圖形。

上厚度與位置的變化。我們也利用光譜式反射儀 (spectroscopic reflectometer AM-001C) 量測二氧化矽薄膜上幾個位置的厚度，厚度分布約為 48 nm – 50 nm，與本實驗量測的厚度相同。CCD 的取像及儲存每張需要 3.2 秒，一組橢圓偏光參數則需 13 秒，我們將顯微鏡中的匹配油 (matching oil) 滴在晶圓表面，觀察它落下的動態變化。將 2 μ L 的油滴輕輕附著在直立的矽晶圓表面，每 30 秒取一組，每組有四張照片，分別控制短脈衝於上述四個時段閃爍及取像，再將這四張照片換算其厚度，請見圖 7 中油滴由於重力的關係漸漸向下流動擴散，其二維橢圓偏光參數 Δ 與油膜厚度變化。由於本實驗所使用的電荷耦合元件取像速度為 0.3 Hz，但是一幅圖像的傳輸與儲存時間需 3 秒，而算出一組橢圓偏光參數需要四個光強度影像，所以目前需 13 秒才能完全擷取出一組橢圓偏光參數。但是只要使用更快速擷取與儲存能力的電荷耦合元件，其量測速度也可大幅提高，顯示本系統的量測速度還有發展潛力。

四、偏光儀

近年來使用偏極光的概念來檢測生物組織已更加廣泛，這是因為生物組織內的結構大多是異向性 (anisotropy)。若使用非偏極化光 (unpolarized light) 去觀測，會因為生物組織的高散射特性而無法取得其結構的資訊。舉例來說，膠原蛋白 (collagen) 及其他纖維組織 (fibrous tissue) 均具有定向結構 (oriented structure)，且在變異中其結構和功能均顯示相當程度的改變。因此發展非侵入式檢測以量測組織中結構應為當務之急。然而，渾濁介質 (turbid medium) 的多重散射會使得原來有偏極特性的入射光失去極化 (depolarized)，其去極化的程度則決定在介質中顆粒的濃度、大小與形狀等。因此傳統的史托克斯偏振量測術 (Stokes polarimetry) 並不適用渾濁介質的量測。如果去極化效應可以被估計或分離，則偏極光檢測的靈敏度會相對地增強。

穆勒矩陣 (Mueller matrix) 是一個 4×4 的矩陣，習慣用來表示光學元件的傳導矩陣，這個矩陣具有樣本的偏光特性：光學的線性雙折射及吸收、圓偏振的雙折射及吸收 (circular birefringence and dichroism)，其去極化 (depolarization) 等均同時存在穆勒矩陣上。所幸 Lu-Chipman⁽¹³⁾ 於 1996 年提出的極化矩陣分解法 (polar decomposition)，可以將穆

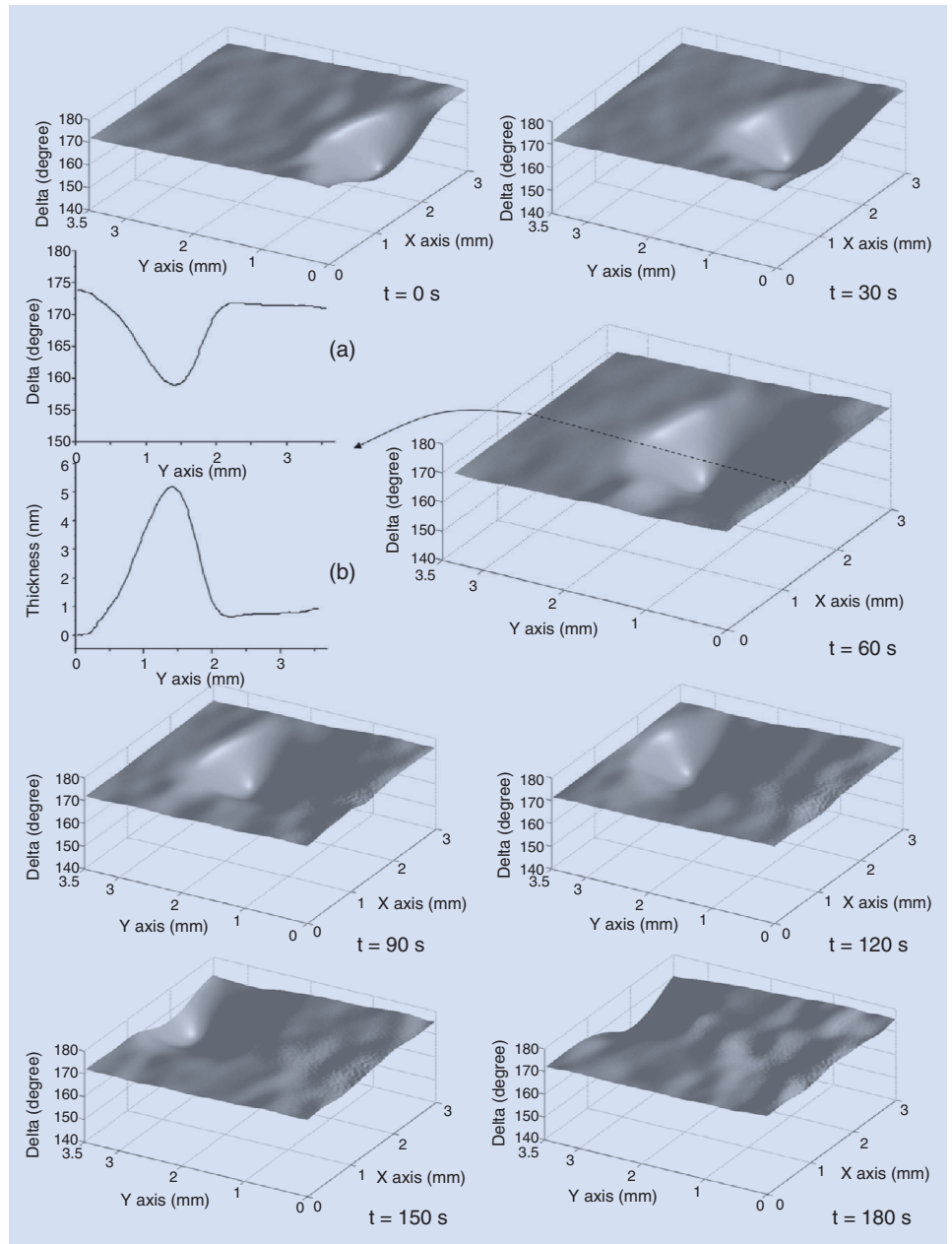


圖 7. 油膜之橢圓偏光參數 Δ 值與厚度隨時間變化分布圖。

勒矩陣中的去極化矩陣 (M_{Δ})、延遲矩陣 (M_R) 及衰減矩陣 (M_D) 一一分解開來。我們也利用這個技術去分析複雜的生物組織結構，這個演算法的最終矩陣 M 分解為三個基底矩陣所組成，關係式如下，

$$M = M_{\Delta} M_R M_D$$

Lu 並將原始混合的訊號中分離出個別獨立的訊息。我們了解如何去分解穆勒矩陣後⁽¹⁴⁾ 將之發展為影像式偏振量測術。

1. 穆勒矩陣影像式偏振量測術

傳統的穆勒矩陣影像式偏振量測術 (Mueller matrix imaging polarimetry) 是由雷射光源、兩個固定的偏光片、兩個可旋轉的延遲片以及一個耦合器所組成。藉由改變兩個延遲片與偏光片的相對相位角，使用四個不同的入射偏極態，並以四個不同的解析偏極態，測量出穆勒矩陣的 16 個矩陣單元 (element)。但此傳統的穆勒矩陣偏振量測術需轉動兩個延遲片十五次，轉動元件的次數愈多，愈容易造成波束偏離 (beam deviation)，進而產生量測的誤

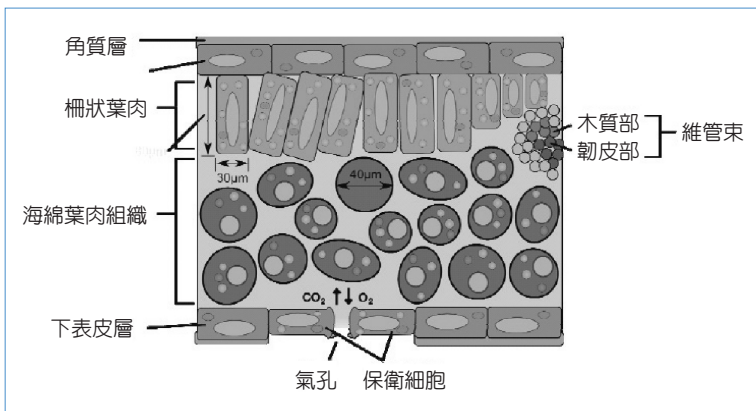


圖 8. 葉脈剖面圖 (http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Leaf_anatomy.svg)。

差。因此我們將閃頻式技術應用在光彈調變式影像橢圓儀，不僅降低轉動的次數 (從原來的十五次減至七次)，也減少時間的耗損，並提升了影像式即時量測的可行性。

2. 穆勒矩陣影像式偏振量測術之應用⁽¹⁵⁾

目前初步研究的生物組織是「觀察九官皇冠葉 (*Echinodorus uruguayensis*) 的乾燥過程」，藉由觀察植物的乾燥過程，作為研究生物組織動態變化的起步。圖 8 為葉脈 (vein) 的剖面圖，其中葉脈為維管束 (vascular bundle) 結構，而這些管束狀纖維組織具線性雙折射的光學特性。然而在葉片中的海綿葉肉組織 (spongy mesophyll) 與氣泡 (gas vacuoles) 等則會對入射造成多重散射，因而產生去極化效應，這樣的組織作用如同渾濁介質環境一般，將葉脈的管束狀組織訊息包覆於內。閃頻式穆勒矩陣偏振量測術系統的配置如圖 9 所示，我們使用光彈調變器取代了其中傳統的四分之一波片 (quarter wave plate)，減少了量測穆勒矩陣時所需旋轉元件的次

數，並在第一個偏振片前設置擴束器 (beam expander)，不僅可以減少量測時偏振像差 (polarization aberration)、增加量測偏振態的準確性，還可增加量測的面積。更重要的是，入射的光強與面積大小成反比，可以降低對組織樣品的熱破壞。經過擴束器後，雷射光強到達待測樣品時，平均光強已經降低至小於 0.5 mW。

將九官皇冠葉片放置室溫下，觀察其自然乾燥的過程。由於葉片乾燥速度緩慢，因而採取每半小時量測一次訊號。圖 10 為九官皇冠葉片在各時段之相位延遲 (phase retardation) 分布，左行為未經矩陣分解的量測結果，雖可大致上分辨葉脈與葉片的區域，但這訊號同時伴隨著多重散射以及葉脈雙折射的訊號。在經過矩陣分解之後，如圖 10 右行，可以很清楚地看到原本被渾濁介質所產生多重散射影響的影像，不僅是葉脈，連葉片上原有的細節資訊，也經由矩陣分解後而量測到。

在乾燥的過程中我們可以發現葉脈的線性雙折射的值愈來愈高，這是因為在乾燥的過程中，管束

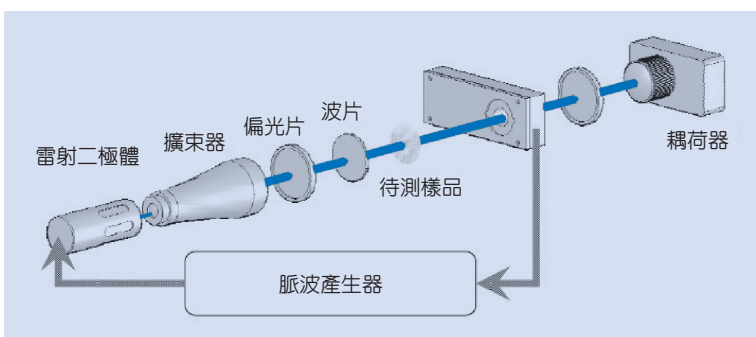


圖 9. 閃頻式穆勒矩陣偏振量測術系統的配置。

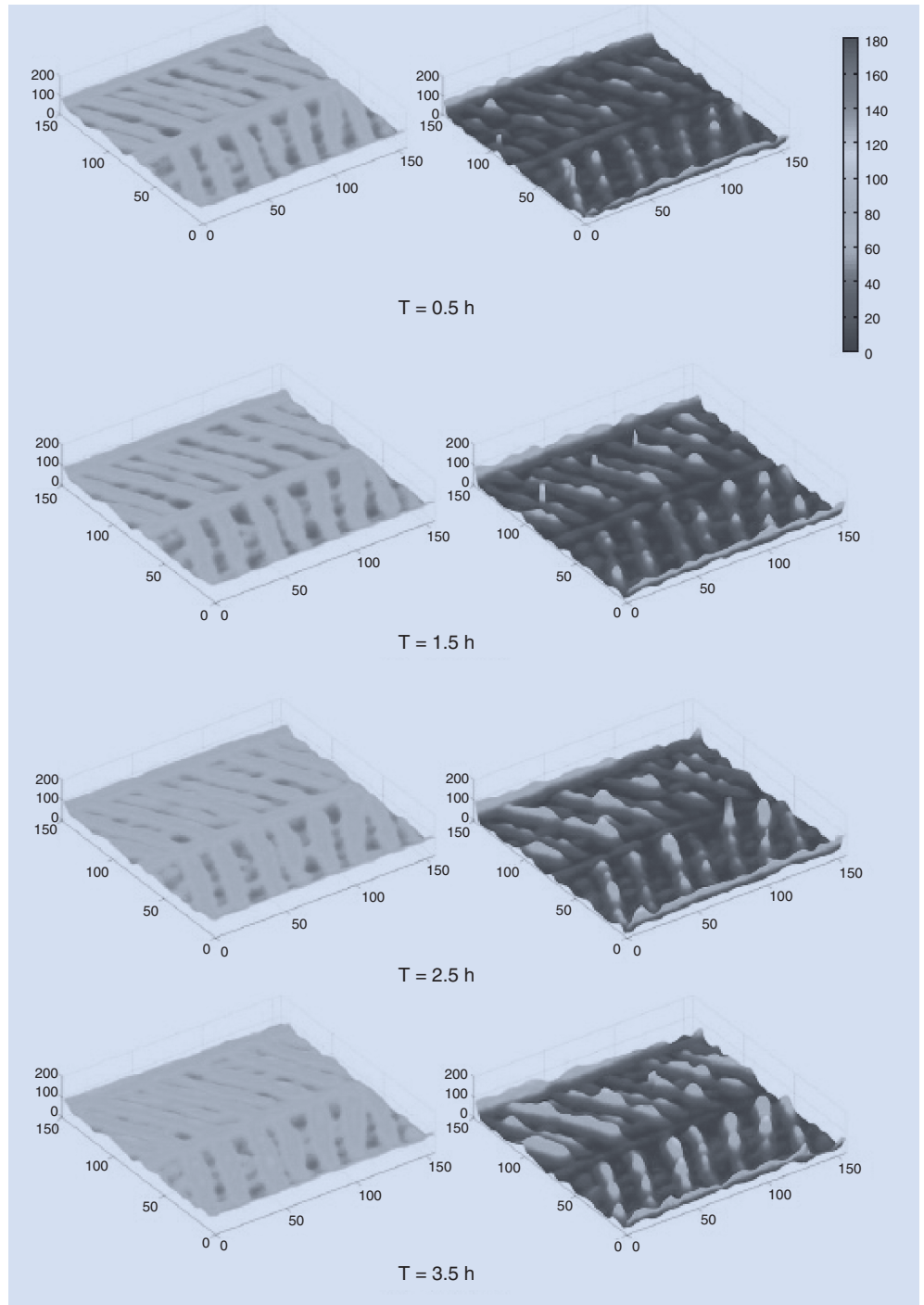


圖 10.
九官皇冠葉的乾燥過程，葉子在各時段之相位延遲的分布。(左) 未經矩陣分解的量測結果，(右) 矩陣分解之後的量測結果。

纖維的結構更加緊實、密度增加，使得觀測到的線性雙折射增高，而這樣的現象可藉由觀察葉片上的數值得到證實。過程中葉片上的線性雙折射並不會因為乾燥的時間長短而有大量的改變，這便可說明海綿葉肉組織含水的成分並不會影響量測。也就是說，矩陣分解成功可將多重散射的去極化效應與生

物組織結構的資訊分離，因此，藉由著量測這樣的組織樣品，不僅可以驗證偏極光檢測生物組織的可行性，與傳統穆勒矩陣偏振量測術相較，筆者所研發的閃頻式穆勒矩陣偏振量測術具有更適合進行即時檢測的功能。

五、結論

影像式橢圓偏光儀在二十一世紀開始應用在生醫檢測上⁽¹⁶⁾，多為近歸零式⁽¹⁷⁾或PSArot⁽⁷⁾，前者量測的厚度必須侷限在它的線性關係，因為 Ψ 為零，僅能以 Δ 佐證，故須有嚴格的背景校正，但其厚度正比於亮度，所以相當快。後者採取連續轉度，則穩定性差且慢。

閃頻影像式橢圓偏光儀則克服了電荷耦合元件在傳輸及儲存緩慢的缺點，又無需轉動元件，若電荷耦合元件傳輸及儲存有進一步的改善，則閃頻式影像橢圓偏光儀也可以改進。最近人們因見於此種有限次數量測法的發展，已開始討論最佳取樣理論⁽¹⁸⁾，這也是本研究在未來發展潛力無窮之處。

參考文獻

1. P. Drude, *Annalen der Physik.*, **272**, 532 (1889).
 2. F. L. McCrackin, E. Passaglia, R. R. Stromberg, and H. L. Steinberg, *J. of Res. of Natl. Bur. Std.*, **67A**, 363 (1963).
 3. International Conference on Ellipsometry (1963, 1968, 1975, 1979, 1983) to International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (1993, 1997, 2003, 2007).
 4. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, 3rd, North-Holland (1992).
 5. Sopra of France and J. A. Woollam of USA.
 6. Y. F. Chao, W. C. Lee, C. S. Hung, and J. J. Lin, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **31**, 1968 (1998).
 7. Y. F. Chao and K. Y. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 1111 (2005).
 8. K. Y. Lee and Y. F. Chao, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, L1015 (2005).
 9. S. N. Jaspersen and S. E. Schnatterly, *Rev. Sci. Instrum.*, **40**, 761 (1969).
 10. Y. F. Chao and C. Y. Han, *Sensors and Actuators B*, **121**, 490 (2007).
 11. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Falling_ball.jpg.
 12. C. Y. Han and Y. F. Chao, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 023107 (2006).
 13. S. Y. Lu and R. A. Chipman, *J. Opt. Soc. Am.*, **A13**, 1106 (1996).
 14. T. H. Tsai, H. M. Tsai, and Y. F. Chao, *OSA's 92nd Annual Meeting (Frontiers in Optics 2008)*, Rochester, NY, USA, October, 19 (2008).
 15. H. M. Tsai, T. H. Tsai, K. Y. Li, and Y. F. Chao, *International Conference on Laser Applications in Life Sciences '08*, Taipei, Taiwan, Dec. 4 (2008).
 16. A. Eing and M. Vaupel, *Imaging Ellipsometry in Biotechnology*, www.nanofilm.de (2000).
 17. H. Arwin, R. Jansson, and S. Welin-Klintström, *J. Coll. Int. Sci.*, **156**, 377 (1993).
 18. D. S. Sabatke, M. R. Descour, and E. L. Dereniak, *Opt. Lett.*, **25**, 803 (2000).
-
- 趙于飛女士為美國衛斯理昂大學物理博士，現任國立交通大學光電系教授。
 - 韓建遠先生為國立交通大學光電博士，現任國立聯合大學光電系助理教授。
 - 蔡修銘先生為國立陽明大學生醫光電碩士，現任國立交通大學光電博士候選人。
 - Yu-Faye Chao received her Ph.D. in physics from Wesleyan University, Connecticut, USA. She is currently a professor in the Department of Photonics at National Chiao Tung University.
 - Chien-Yuan Han received his Ph.D. in photonics from National Chiao Tung University. He is currently an assistant professor in the Department of Electro-Optical Engineering at National United University.
 - Hsiu-Ming Tsai received his M.S. in biophotonics from National Yang Ming University. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Photonics at National Chiao Tung University.