

# 橢圓偏光儀量測速度的發展

## The Development of Data Acquisition Speed in Ellipsometry

趙于飛、王夢偉、莊俊逸、韓建遠

Yu-Faye Chao, Meng-Wei Wang, Chun-I Chuang, Chien-Yuan Han

橢圓偏光儀基本上是利用反射光相對於入射光偏極態的轉變，以反推介質的光學特性。為了測量變化中的材料，如電漿蝕刻薄膜、真空鍍膜過程的沉積速率和厚度、加溫中的晶體以及高分子的感光過程，對橢圓偏光儀測量速度的改進已成為近年來業界研究的主要目標。本實驗室從簡式到線上即時監控的橢圓偏光儀的研究已有十多年。從將補波片換成光彈調變器，我們將快速資料擷取卡裝置在系統中。最近所提出的記錄後分析法，已可在  $20 \mu\text{s}$  測量一組橢圓偏光參數。

Utilizing the polarization changes by reflection, ellipsometry can extract the physical properties of a medium. For measuring the dynamic changes when a material is under heating, etching, deposition, exposure to light, *etc.* The measuring speed becomes one of the major targets for developing in ellipsometry. This laboratory started to measure a static thin film by measuring three intensities at specific positions of analyzer through a simple PSA configuration. Later, we employed the photo-elastic modulator to substitute the quarter wave plate in a PCSA configuration for establishing the real time/in situ monitoring the etching process in a plasma etching chamber. In stead of using lock-in amplifier, we installed a DAQ system in our own laboratory. By post flight analysis technique, we are able to measure the ellipsometric parameters in  $20 \mu\text{s}$ .

### 一、前言

橢圓偏光儀是利用入射光和反射光在偏極態的改變來量測材料的光學參數，如膜厚、折射率等。在 1975 年後半導體工業中，已將橢圓偏光儀當成標準配備，以確認膜厚的準確。依橢圓偏光儀的運作機制，可分成歸零 (null) 及亮度 (photometric) 兩式。前者主要是「尋找」最暗時析光片與偏光片的偏光角所在的位置；後者則依亮度的分布特質，再推算想量測的光學參數。在「簡式到線上即時監控

的橢圓偏光儀」<sup>(1)</sup> 文中，我已將其基本原理作了敘述，在此不再贅述。

在橢圓偏光儀中僅量測兩項參數： $\Psi$  與  $\Delta$ ，其定義如下

$$\tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s}$$

其中  $r_p$  及  $r_s$  分別代表平行與垂直於入射面的反射率 (reflection coefficient)，如圖 1。在正確的理論模式下，此二參數如果量得愈準確，則所能推斷的

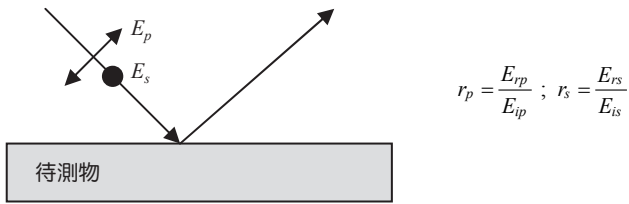


圖 1. 反射面的定義。

光學參數愈準確。一般商用橢圓偏光儀的要求是此二參數的誤差值不得大於 0.02 度 (由於環境條件的要求太嚴, 現已放鬆到 0.1 度, 以達各頻譜的量測)。如要討論其量測速度發展, 應先就其量測方法的發展來談。

## 二、量測方法的發展

### 1. 歸零式橢圓偏光儀 (Null Ellipsometry)

由於眼睛對明暗對比極為敏感, 所以橢圓偏光儀發展最早的是歸零式量法。一般的架構是: 偏光片 (polarizer)、1/4 波長補波片 (quarter wave plate)、待測物 (sample) 及析光片 (analyzer)。以特定光波 (針對 1/4 波長補波片) 入射後, 將補波片的光軸放在 45° 處, 找出最暗的偏光片及析光片的方位角, 分別以  $P$  與  $A$  即可測量出  $\Psi$  與  $\Delta$  (見附錄: 關係式<sup>(1)</sup>)。利用自動回饋尋找的方法, 在 1976 年<sup>(2)</sup> 已可達到 30 ms 取一組值, 並達到 0.1° 的準確值。而在影像 (imaging) 橢圓偏光儀上, Arwin<sup>(3)</sup> 於 1993 年在入射角接近 Brewster angle 時量  $\Delta$  值, 如初值校正得宜, 則可直接反推膜厚, 此法量測速度則純由電荷耦合元件 (CCD) 的畫面更新率 (frame rate) 決定, 在對灰階 (gray level) 要求不高的情況下, 現在應可達到 0.1 s。

表 1. 三個亮度量法所量出的橢圓偏光參數。

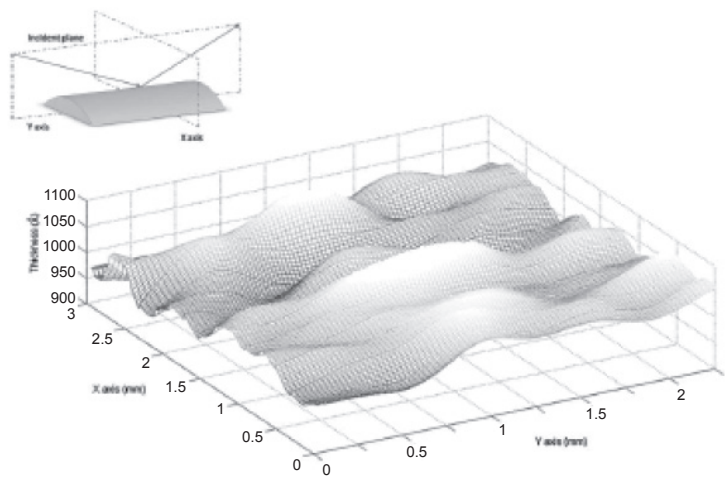
Experiment	$\Psi$ (deg)	$\Delta$ (deg)	Thickness (nm)	$\alpha$ (deg)	$\beta$ (deg)
1	71.172	86.742	129.89	0.993	-1.229
2	71.175	86.745	129.93	1.000	-1.234
3	71.169	86.754	129.85	0.968	-1.231
4	71.171	86.727	129.88	0.991	-1.241
Mean	71.171	86.741	129.88	0.988	-1.233
Standard deviation	0.003	0.011	0.03	0.011	0.005
Jobin-Yvon ellipsometer			129.3		

### 2. 旋轉元件橢圓偏光儀 (Rotating Element Ellipsometry)

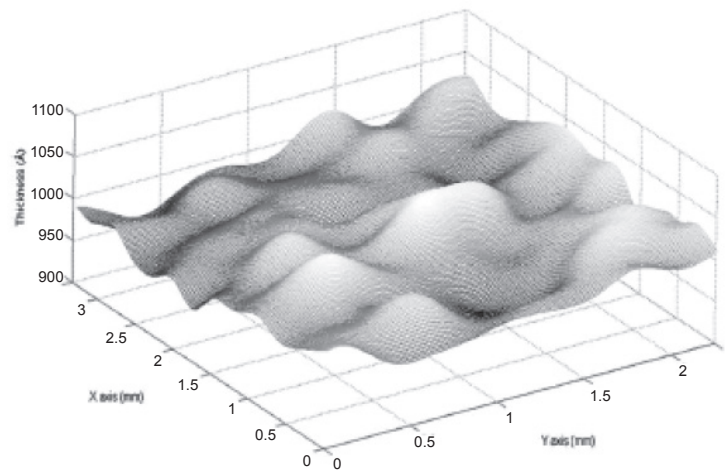
為了實行橢圓偏光儀的光譜 (spectroscopic) 功能, 最初多使用簡式橢圓偏光儀, 其元件僅有: 偏光片 (polarizer)、待測物 (sample) 及析光片 (analyzer)-PSA。有轉偏光片或析光片兩種, 若步進馬達以每秒 10-100 週的速度 (50-5 ms) 旋轉, 光偵測器在擷取其亮度分布後經富氏轉換 (Fourier transform), 即可量出  $\Psi$  與  $\Delta$  (見附錄: 關係式 (2))。由於此種系統有以下盲點: (a) 僅能量  $\cos\Delta$ , 無法判斷  $\Delta$  的正負值; (b) 當  $\Delta$  是 0 或是 180 度時變化率小, 敏感度不夠, 多半會加裝 1/4 波長補波片, 並將其作為旋轉元件<sup>(4)</sup>, 此已廣泛地應用在具偏光特性的光譜儀 (spectroscopic ellipsometry)。本實驗室於 1989 年從事於在一週中僅量測三個亮度之研究<sup>(5)</sup>, 並於 2006 年<sup>(6)</sup> 完成了不用先校準偏光片與析光片, 卻能在事後將  $P$ 、 $A$  偏差算出, 並還原其應有值 (見表 1)。由於需要在  $P = \pm 45^\circ$  時分別量出  $A = 0$ 、60 及 120° 的亮度, 其量測速度並非此法的目的, 但如整合得宜, 應與所有轉動元件橢圓偏光儀相同, 而其對曲面薄膜的量測<sup>(7)</sup> (圖 2) 卻非其他技術可以達成。

### 3. 光彈調變式橢圓偏光儀 (Phase Modulated Ellipsometry)

在 PCSA 橢圓偏光儀中, Jaspersen<sup>(8)</sup> 將光彈調變器取代了其原有的機械轉動元件, 除了可以避免機械轉動所伴合的噪音外, 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 10 組橢圓偏光參數, 見附錄: 關係式 (3))



(a)



(b)

圖 2. (a) 圓柱體上之膜厚平面分布，(b) 同條件下平面上之膜厚平面分布。

量測的功能。此即時監控光彈調變式橢圓偏光儀，筆者在 1999 年曾為國立清華大學建構完成 (見圖 3)。2003 年<sup>(9)</sup> 時曾用快速資料擷取卡 (DAQ) 中的虛擬鎖相放大功能而完成多項監控機制，以每秒 20 組橢圓偏光參數：

- (1) 觀測光儲存材料在照光過程中折射率之改變<sup>(10)</sup> (圖 4)，及雙折射的變化 (圖 5)。
- (2) 觀測光儲存材料在加熱過程中折射率及其結晶結構的變化<sup>(11)</sup> (圖 6 所示)。

但為了達到光彈調變器的量測極限 ( $20 \mu\text{s}$ )，我們也使用了快速資料擷取卡中的數位示波 (digital oscilloscope) 功能，將其波形存在電腦裡，

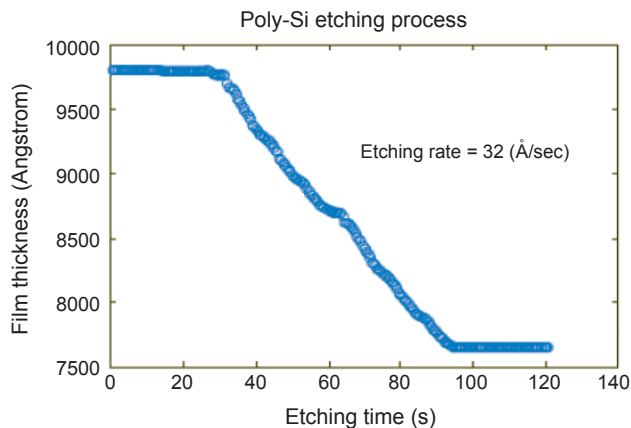


圖 3. 由橢圓偏光參數換算之蝕刻過程。

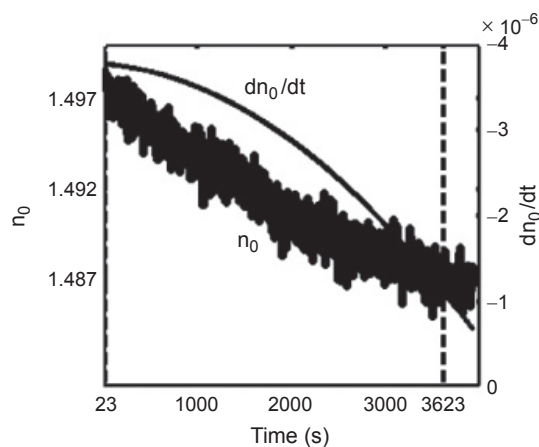
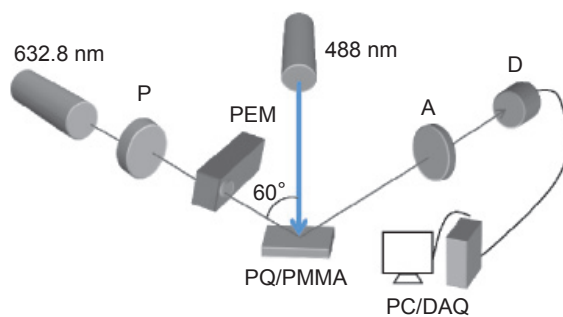


圖 4. 光儲存材料 (PQ/PMMA) 在照光過程中折射率之改變：488 nm 照光光源；632.8 nm 偵測光。

事後再加以分析，如此，已經可以量測液晶在加電壓下的響應時間 ( $\sim \text{ms}$ ) (圖 7)。在影像橢圓偏光儀上<sup>(12)</sup>，我們也推出了閃頻影像式橢圓偏光儀/偏光儀<sup>(13)</sup>，將三個亮度量測時間從半小時縮短為半分鐘，若搭配更快的電荷耦合元件，本系統尚有改進的空間，在此利用表 2 來總結本文。

表 2. 各式橢圓偏光儀之取樣時間。

種類	文獻發表年代	取樣特性	取樣時間	精確度
歸零式橢圓偏光儀	1976	單點	30 ms	0.1°
旋轉元件式橢圓偏光儀	1976	單點	5–50 ms	0.02°
三個亮度橢圓偏光儀	2006	單點/面	5 min/30 min	0.02°
光彈調變式橢圓偏光儀 (二鎖相放大器)	1999	單點	100 ms	0.02°
光彈調變式橢圓偏光儀 (快速資料擷取卡)	2003	單點	50 ms	0.02°
閃頻影像式橢圓偏光儀	2006	面	30 s	0.5°

### 三、結語

本文係為今年 5 月 20 日在國家實驗研究院儀器科技研究中心所開的科技講座：「線上即時監控式橢圓偏光儀」所撰寫。由於此主題與電子月刊 2004 年的文章頗為相似，故以取樣速度發展為主。

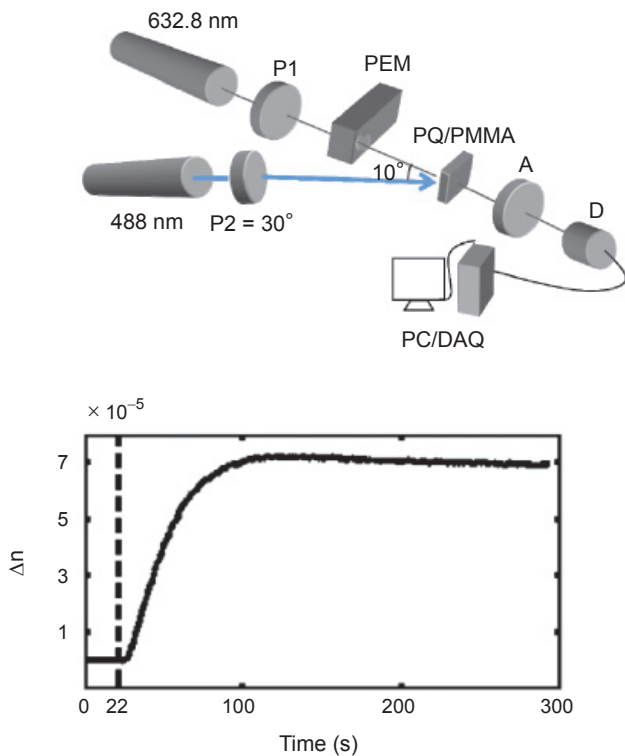


圖 5. 光儲存材料 (PQ/PMMA) 在照光過程中雙折射率之改變：488 nm 照光光源；632.8 nm 偵測光。

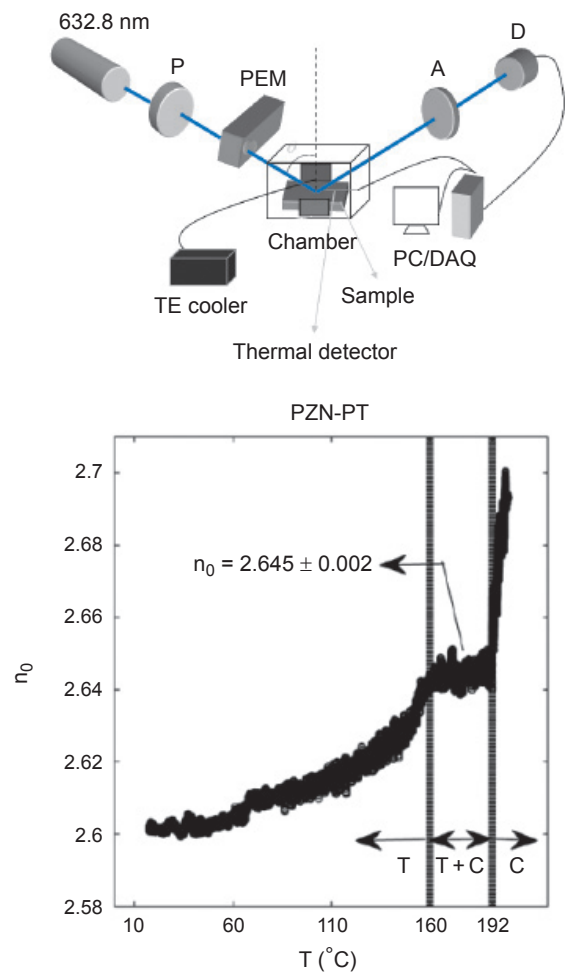


圖 6. 光儲存材料在加熱過程中折射率及其結晶結構的變化：樣品：0.9PZN-0.1PT, Ru: 0.9PZN-0.1PT；溫度由 20 °C 升高至 200 °C。

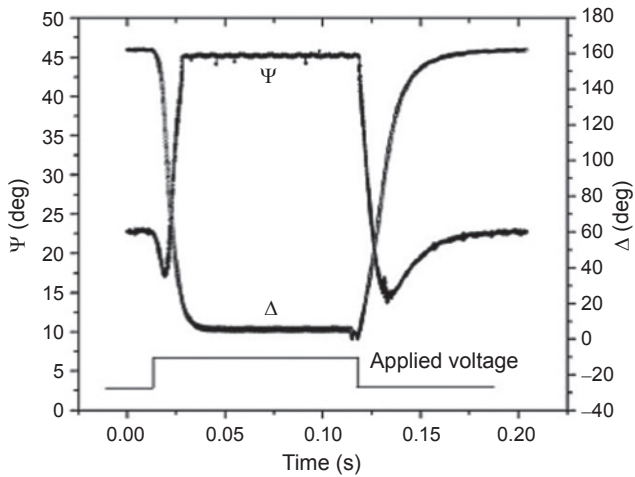


圖 7. 扭轉向列型液晶 (TNLC) 橢圓偏光參數在加電壓的發展圖，所加電壓為方波 (5 Hz) 5 V。

## 附錄：各式橢圓偏光儀之取樣機制

### 1. 歸零式橢圓偏光儀

傳統的歸零式橢圓偏光儀多半是由光源通過偏光片 (P) 及補波片 (C) 後，再經待測元件 (S) 及析光片 (A) 簡稱 PCSA (見附圖 1)。當補波片是 1/4 波長，且其光軸 C 在 45°，在反射光最暗時，所用匹配的 P 和 A 角來反算橢圓偏光參數，主要是當反射光最暗時

$$\tan \Psi e^{i\Delta} = -\tan A e^{-i2(P-\pi/4)} \quad (1)$$

### 2. 亮度式橢圓偏光儀

最簡單的亮度式橢圓偏光儀是由光源通過偏光片 (P) 後，經過待測元件 (S) 及析光片 (A) 簡稱 PSA，即將 PCSA 中的補波片拿掉而成。此架構所量測的亮度為

$$I(P, A) = I_o \left[ \sin^2 P \sin^2 A + \tan^2 \Psi \cos^2 P \cos^2 A \right. \\ \left. + 2 \tan \Psi \cos \Delta \sin 2P \sin 2A \right]$$

將 P 設在 45°，則反射光可簡化成

$$I(A) = I_o \left[ \sin^2 A + \tan^2 \Psi \cos^2 A \right. \\ \left. + 2 \tan \Psi \cos \Delta \sin 2A \right] \quad (2)$$

利用旋轉析光片即可獲得橢圓偏光參數。此法受到機械轉動速度的限制。

### 3. 光彈調變式橢圓偏光儀

光彈調變式橢圓偏光儀是將 PCSA 中的補波片換成光彈調變器 (附圖 2)，藉著其相位的週期變化而輸入各式各樣的偏極態，分析其反射光即可獲得橢圓偏光參數。光彈調變式橢圓偏光儀所反射出的光為

$$I(P = -45, A = 45) = I_o \left[ 1 + \tan^2 \Psi \right. \\ \left. - \tan \Psi \cos(\Delta + \delta) \right] \quad (3)$$

$$\delta = \Delta p = \delta_o \sin \omega t \quad (4)$$

① 利用富氏轉換 (Fourier transform)

當將式 (4) 代入式三必然有以下兩式

$$\cos(\delta_o \sin \omega t) = J_0(\delta_o) + 2J_2(\delta_o) \cos(2\omega t) \\ + 2J_4(\delta_o) \cos(4\omega t) + \dots$$

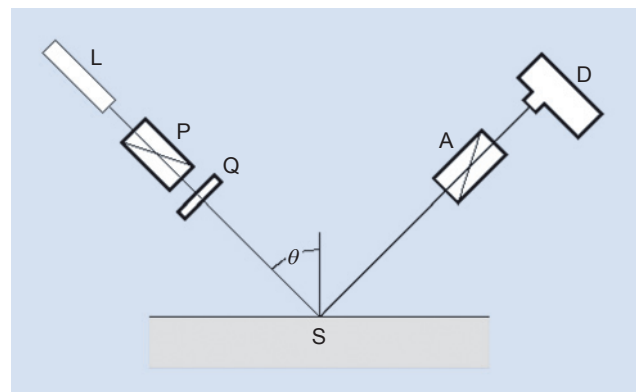
$$\sin(\delta_o \sin \omega t) = 2J_1(\delta_o) \sin(\omega t) \\ + 2J_3(\delta_o) \sin(3\omega t) + \dots$$

在 DC，一倍頻及二倍頻所量測得的亮度則分別為

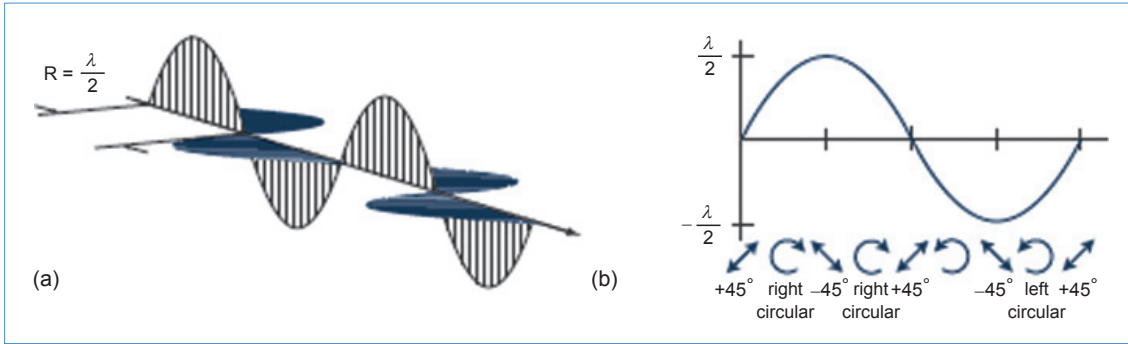
$$I_{dc} = 0.5 I_o \sec^2 \Psi$$

$$\frac{I_{1f}}{I_{dc} J_1(\delta_o)} = -\sin 2\Psi \sin \Delta$$

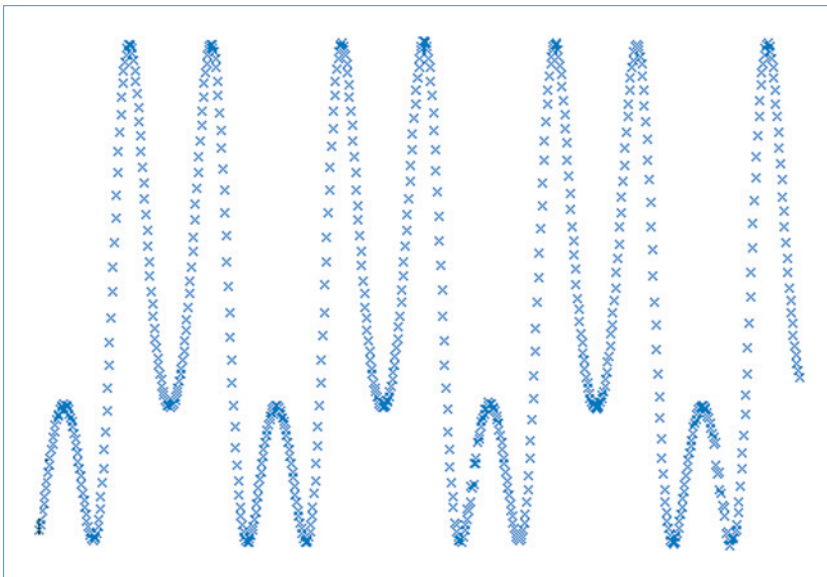
$$\frac{I_{2f}}{I_{dc} J_2(\delta_o)} = -\sin 2\Psi \cos \Delta$$



附圖 1. 歸零式橢圓偏光儀。



附圖 2. 光彈調變器的振幅為半波長在各時段所產生的偏極態。



附圖 3.  
反射光的波型。

橢圓偏光參數則可由鎖相放大在 DC 一倍頻及二倍頻所量得的亮度換算得到。

## ② 利用快速資料擷取卡作事後分解法

將反射光的波形分析也可獲得橢圓偏光參數。一般所量得的波形如附圖 3，其波形隨橢圓偏光參數而變化，最近我們已證明分析此數位波形可設計快速影像橢圓偏光儀<sup>(11)</sup>。

## 參考文獻

1. 趙于飛, 電子月刊, 154 (2004, 12).
2. T. Kasai, *Rev. Sci. Instrum.*, **47**, 1044 (1976).
3. H. Arwin, S. Welin-Klintström, and R. Jansson, *J. Colloid Interface Sci.*, **156**, 377 (1993).
4. D. E. Aspnes and P. S. Hauge, *J. Opt. Soc. Am.*, **66**, 949 (1976).
5. Y. F. Chao and W. F. Hsieh, *Appl. Opt.*, **30**, 4012 (1991).
6. Y. F. Chao, K. Y. Lee, and Y. D. Lin, *Appl. Opt.*, **45**, 3935 (2006).
7. C.-Y. Han, Z.-Y. Lee, and Yu-Faye Chao, *Appl. Opt.*, **48**, 3139 (2009).
8. S. N. Jaspersen and S. E. Schnatterly, *Rev. Sci. Instrum.*, **40**, 761 (1969).
9. 柯凱元, 雙波長光彈調變式橢圓偏光儀及波形量測法, 國立交通大學光電所碩士論文 (2003).
10. C.-I. Chuang, Y.-N. Hsiao, S.-H. Lin, and Y.-F. Chao, *Opt. Comm.*, **283**, 3279 (2010).
11. C.-I. Chuang, V. Marinova, S.-H. Lin, and Y.-F. Chao, *Thin Solid Films*, **519**, 2867 (2011).
12. C.-Y. Han and Y.-F. Chao, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 023107 (2006).
13. 趙于飛, 韓建遠, 蔡修銘, *科儀新知*, **30** (5), 75 (2009).



趙于飛女士為美國衛斯理昂大學物理博士，現為國立交通大學光電系榮譽退休教授。

Yu-Faye Chao received her Ph.D. in physics from Wesleyan University, USA. She is a retired honorary professor in the Department of Photonics at National Chiao Tung University



王夢偉先生為國立交通大學光電博士，現任國立交通大學電子系助教  
Meng-Wei Wang received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University.

He is currently a teaching assistant in the Department of Electronics Engineering at National Chiao Tung University.



莊俊逸先生為國立交通大學光電碩士，現任國立交通大學光電研究所博士候選人。

Chun-I Chuang received his M.S. in photonics from National Chiao Tung University. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Photonics at National Chiao Tung University.



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。

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.