

# 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組 開發研究

## Multi-Channel Polarization State Generator and Analyzer

翁俊仁、劉達人、張鮮文、黃吉宏

Chun-Jen Weng, Da-Ren Liu, Shian-Wen Chang, Chi-Hung Hwang

本研究提出一種創新架構完成寬頻切換偏振產生及解析功能，用來產生任意偏振或解析任意偏振，在頻寬 400 nm–1600 nm 範圍內，一般至少需要三片偏振片以及三片波片之偏振元件組合，若要將頻寬或偏振明暗比增加，則偏振元件的組合數目則需更多，然透過傳統電動式濾片轉盤切換器是無法勝認此項工作。因此本研究設計一種獨特機構，希望能同時處理 3–6 片偏振片以及 3–6 片波片之偏振元件組合，並指須透過一組高精密旋轉馬達進行切換及旋轉等動作，達成寬頻切換全偏振旋轉之功能。

This work proposes a creative filter wheel with only one precision motor for multi-channel polarization state switching. Any polarization states can be easily switched and orientated by this apparatus for the polarimetric characteristic.

### 一、前言

待測之微奈米光學元件的光學特性常與材質選擇、結構形狀及尺寸大小有相關性，包含寬頻光譜以及偏振特性，以一般顯微鏡僅有影像定性分析並無光譜定量資訊，亦無法進行偏振相關特性之定量測功能，一般商用光譜式橢圓偏光術或光譜式偏光量測技術，則缺乏微奈米尺度定位、顯微放大之功能。一般顯微光譜儀不具備線性偏振與旋光解析功能。因此，目前缺乏一個通用具偏振解析以及寬頻顯微光譜量測儀器平台，本研究主要探討多通道切換寬頻偏振產生及解析模組開發及性能驗證，並將整合於本團隊所開發寬頻顯微光譜

儀之上。本套系統將具備 400 nm–1600 nm 之量測頻寬，且具備線性偏振與旋光解析功能，可量測微奈米樣本之線性二色性 (linear dichroism, LD)、圓二色性 (circular dichroism, CD)、線性雙折射 (linear birefringence, LB)。

許多光學物質對不同偏振狀態之入射光會有不同響應，例如偏振延遲效應 (birefringence effect)，其原因乃因所感受到的折射係數有所不同而造成，將導致入射偏光狀態發生變化，此外光學物質通常具有色散特性，因此其吸收或共振的譜線位置會有所差異，光學物質之折射率也常具有位置相關性 (position dependant)，因此需搭配顯微鏡進行微觀量測，所以本團隊開發一套寬頻偏振顯微光譜量

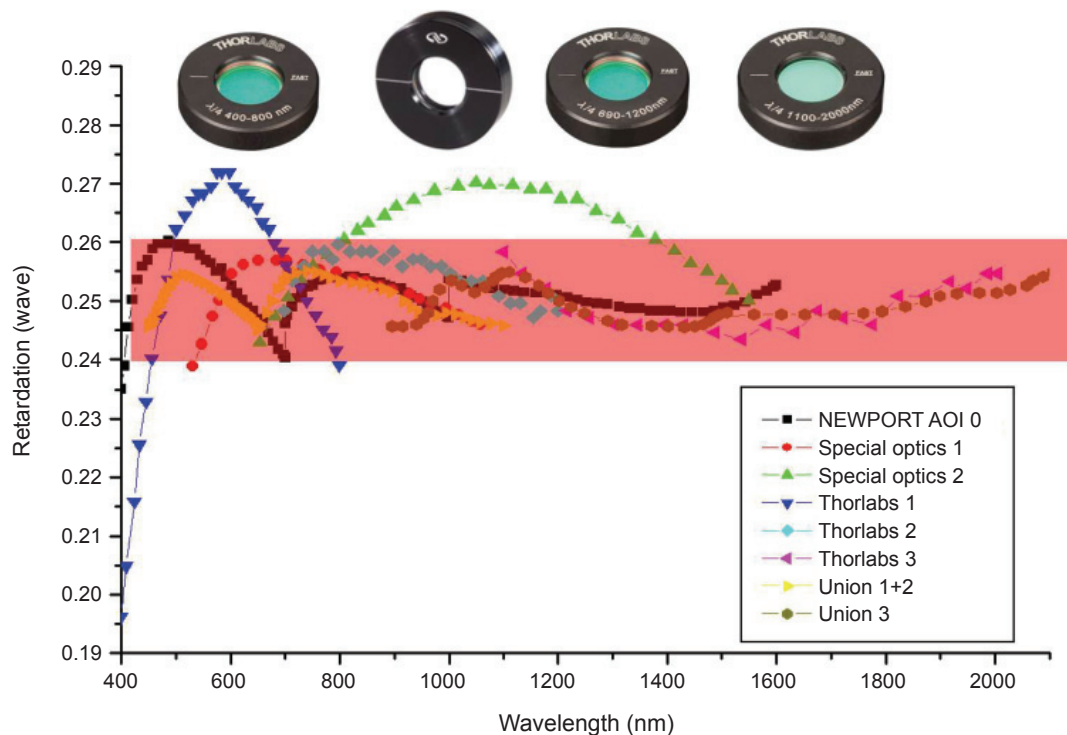


圖 1. 薄片型寬頻波片之性能比較。

測系統來探討此類樣品對於各種偏振狀態光束的響應特性。一般在量測光學元件之偏振或相位的特性時，可以使用很多種量測方式，包含 PEM 偏光儀／液晶偏光儀／橢圓偏光儀／穿透式旋轉波片偏光儀等等，然上述架構大都不適用顯微光路當中，利用顯微光譜量測微奈米光學元件的偏振特性，要完成寬頻偏振產生及解析模組，使用寬頻薄型消色差波片 (achromatic waveplate) 及薄型偏振片 (sheet polarizer) 則是較佳的選擇，其搭配可以用來產生或解析偏振光，這些光學元件通常必須架設在旋轉平台上，藉由精密步進馬達來控制與切換偏振方向或狀態，然而此類的光學元件寬頻色差 (dispersion) 相當嚴重，並無法由單片光學元件構成符合本套系統 400 nm - 1600 nm 之頻寬需求，本研究搜尋目前市面販售之寬頻薄型消色差波片，包含 Newport, Union, Thorlabs 以及 Special optics 公司之產品，其寬頻之性能會至於圖 1 所示，在規格  $0.25\lambda \pm 0.01\lambda$  的要求範圍內，Newport 公司的產品可符合，然需三片之組合才能涵蓋本套系統 400 nm - 1600 nm 之頻寬需求。因此本研究為達成超寬頻譜顯微偏振光譜量測系統與模組 (400

nm - 1600 nm) 開發任務並建立相關偏振量測與校正技術，需自行研發一套獨特切換機構。一般偏振產生單元 (PSG) 與偏振解析單元 (PSA)，其架構係由 1 片偏振片及四分之一波片 (quarter-waveplate, QWP, 簡稱波片) 組合而成，PSG 入射光會先通過偏振片再通過波片，PSA 架構則相反，然而為達到開發獨特寬頻切換偏振產生與解析單元以涵蓋 400 nm - 1600 nm，因應商用模組或元件頻寬之種種限制，然而市面上能選購之薄片型寬頻消色差波片及偏振片，其單一元件使用頻寬亦無法涵蓋 400 nm - 1600 nm 之超寬頻光譜量測需求當中，本研究要完成具備寬頻偏振產生及解析功能之顯微光譜量測功能，用來產生任意偏振或解析任意偏振，在頻寬 400 nm - 1600 nm 範圍內，至少需要三片偏振片以及三片波片之偏振元件組合，若要將頻寬或偏振明暗比增加，則偏振元件的組合數目則需更多，然透過電動式濾片轉盤切換器是無法勝認此項工作。因此本研究設計一種獨特機構<sup>(1)</sup>，希望能同時處理 3-6 片偏振片以及 3-6 片波片之偏振元件組合，並可以透過高精密旋轉馬達進行切換及旋轉等動作，達成寬頻切換全偏振旋轉之功能。

## 二、實驗架構及自動化程式

本研究係使用一種創新光學元件公轉切換 (switch)、自轉可變角度 (rotation) 之光學機構，為可應用於偏振產生與解析應用之光學元件切換與定角度之裝置 (mechanism with component position adjusting function)。本光學機構可安裝不同光學波段之偏振元件，利用電動馬達帶動機構作光學元件之切換，完成切換動作後，電動馬達再帶動齒輪組作光學元件自轉可變偏振角度之動作。此光學機構僅需一組電動高解析度之旋轉馬達，透過馬達之正反轉可來控制元件所有的作動行為。藉由偏振元件切換與自轉可變角度來改變偏振狀態，以此專利技術所開發之偏振模組達成全偏振產生與解析，包含 0 度 / 45 度 / 90 度 / 135 度之線性偏振狀態以及左旋光 (LHCP) / 右旋光偏振狀態 (RHCP)。

一般偏振產生單元 (PSG) 與偏振解析單元 (PSA)，其架構係由 1 片偏振片及四分之一波片 (quarter-waveplate, QWP，簡稱波片) 組合而成，PSG 入射光會先通過偏振片再通過波片，PSA 架構則相反，然而為達到開發獨特寬頻切換偏振產生

與解析單元以涵蓋 400 nm—1600 nm，因應上一章節所述商用模組或元件頻寬之種種限制，本研究有了一項具體的概念，重點就在於如何將多個波段的偏振片與多個波段的波片進行波段切換，在此簡稱元件公轉切換，用以切換不同波段之偏振片及四分之一波片，並旋轉各組偏振片之角度，在此簡稱元件自轉，亦即同時旋轉不同波段之偏振片。重點即在如何用一組電控旋轉馬達搭配設計機構，來切換並旋轉多個波段的偏振片，亦即元件公轉切換及元件自轉功能，其功能示意圖如圖 2 所示，馬達正轉時，帶動多組偏振光學元件進行元件公轉切換，馬達反轉時，帶動多組偏振元件進行元件自轉，利用馬達的正反轉來分別進行公轉切換與元件自轉。

本光學機構提供一具有公轉切換不同波段元件與元件自轉角度功能之動作，且只需利用一個電動馬達即可完成上述之所有動作。其主體包含電動馬達、單向軸承或棘輪組一對、機構本體、齒輪或摩擦輪組、傳動軸。本概念主要是用兩個相對的單向軸承或棘輪裝置，透過馬達之正反轉來控制元件的作動行為。如馬達正轉時為元件切換之動作，其為馬達動力傳給傳動軸再經由單向軸承傳輸動力讓

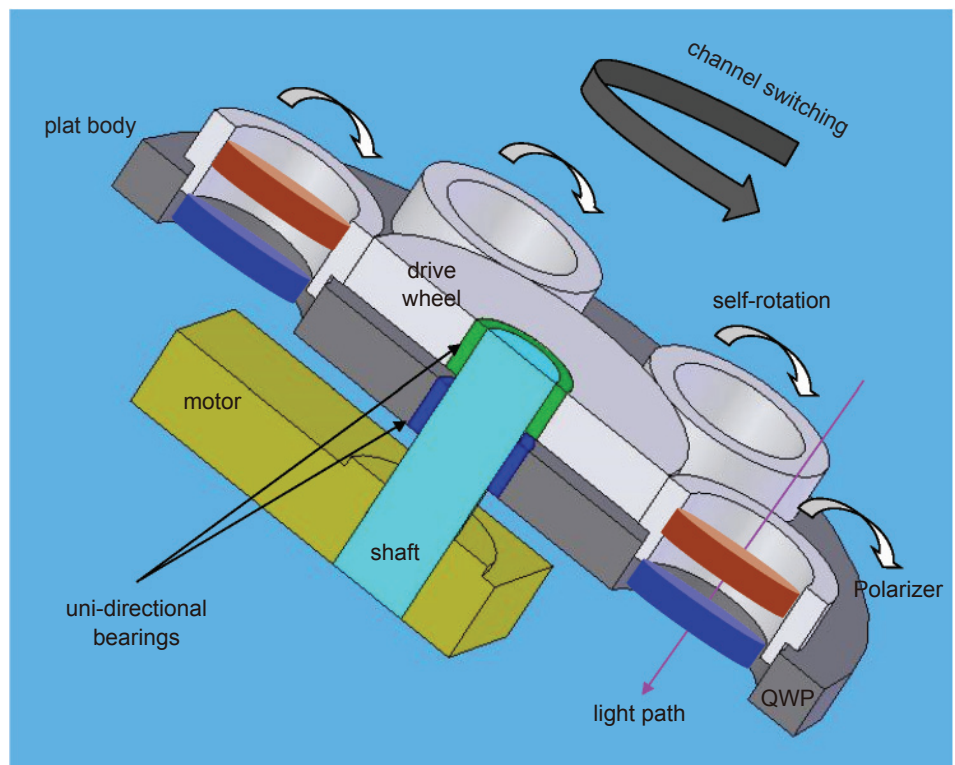


圖 2. 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組之構想圖。



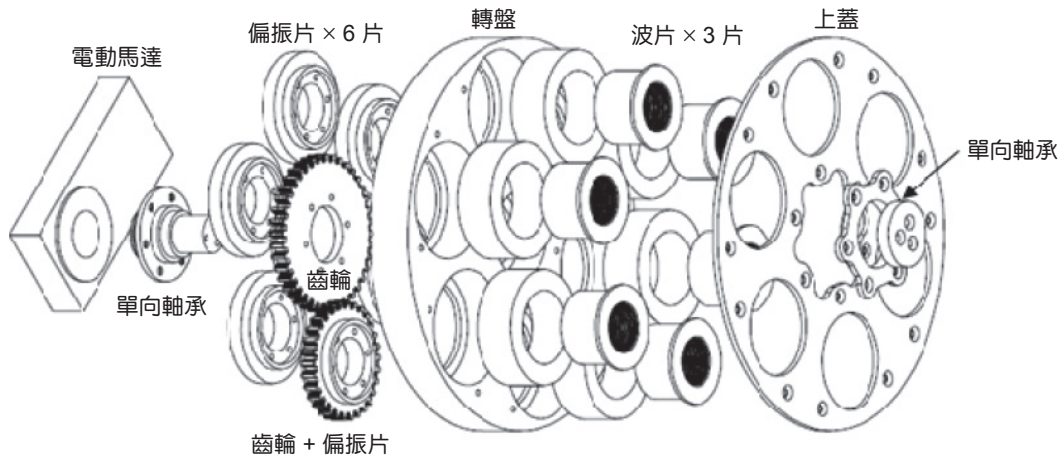
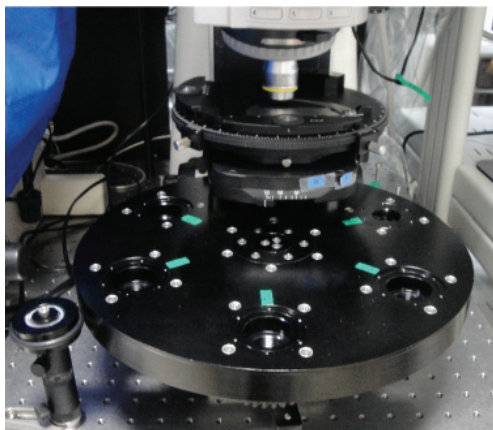


圖 3. 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組機械展開示意圖。

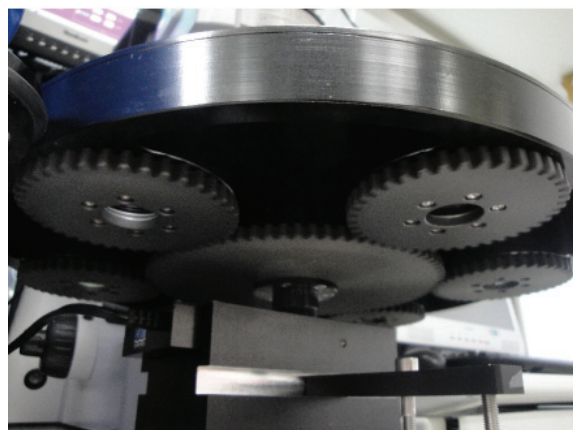
機構本體轉動，而連接齒輪（摩擦輪）的單向軸承為馬達逆轉才會帶動齒輪轉動，因此在馬達正轉時光學元件是不會轉動的，而當光學元件轉到定位時馬達停止正轉，變為逆轉方向去驅動光學元件作同步旋轉定角度之動作，旋轉至使用者所需之角度位置。預計利用 400 nm – 700 nm/700 nm – 1000 nm/1000 nm – 1600 nm 三個波段偏振片與波片整合在一個模組，來涵蓋 400 nm – 1600 nm 之量測需求，預期只利用一個電動旋轉馬達即可完成全偏振變換之功能，其設計概念如機械展開圖 3 所示，本設計係利用馬達之正反轉搭配兩組單向軸承 (uni-direction bearing)，使得本機構內的偏振片與波片具有元件切換與徑向角度旋轉之功能，以達到偏振狀

態之變換。其動作原理係利用電動馬達正轉帶動轉盤機構作元件之公轉切換（切換不同波段之偏振片及波片），完成切換動作後，電動馬達反轉帶動齒輪或摩擦輪組作元件徑向角度自轉之作動（偏振片角度變化來產生不同線性偏振狀態或旋光偏振狀態），實體照片如圖 4 所示。

我們將此一機構模組整合於顯微鏡本套顯微鏡光譜量測系統中，如圖 5 所示，然而由於是機構齒輪組所構成，會有機構間隙之誤差，此部分受限於機械加工之精度，並不容易克服，且齒輪之齒數受限，不容易提升切換角度之提升，幸而可以使用偏振光學加以校正並使用自動化程式設修補這方面的缺陷。



(a)



(b)

圖 4. 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組之照片 (a) 正面照片；(b) 背面照片。

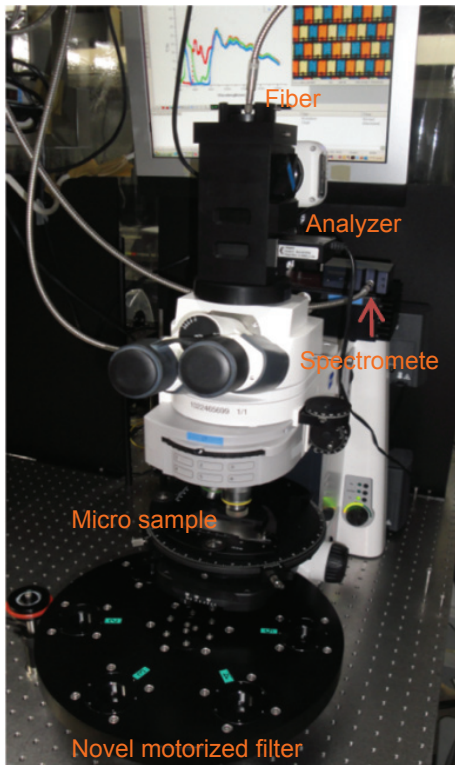


圖 5. 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組整合於本套顯微鏡光譜系統照片。

為完成自動化控制之目的，使用 LabVIEW 操作程式來整合，其介面則如圖 6 所示，可以透過圖形介面完成自動控制公轉切換及自轉旋轉之目的。本裝置主要是用兩個相對的單向軸承或棘輪裝置，透過馬達之正反轉來控制元件的作動行為。如馬達正轉時為元件切換之動作，其為馬達動力傳給傳動軸再經由單向軸承傳輸動力讓機構本體轉動，而連接齒輪 (摩擦輪) 的單向軸承為馬達逆轉才會帶動齒輪轉動，因此在馬達正轉時，光學元件是不會轉動的，而當光學元件轉到定位時馬達停止正轉，變為逆轉方向去驅動光學元件作同步旋轉定角度之動作，旋轉至使用者所需之角度位置。

傳統的電動濾光片切換器 (filter wheel) 可以加載多片濾光片，且不須任何精確對準方位角 (aziuth angle)。然而，極化光學元件 (polarization filter) 需要精確的對準，尤其方位角對準，例如偏振片的透射軸之校準，波片主軸角度之校準。本裝置裝載六個通道，以切換多波段之偏振產生與解析。每個波段通道都包括一個偏振片與相同波段波片，透過調整偏振片及波片用之相對夾角，可以產生任意的偏振狀態，包括線型、圓型和橢圓偏振。

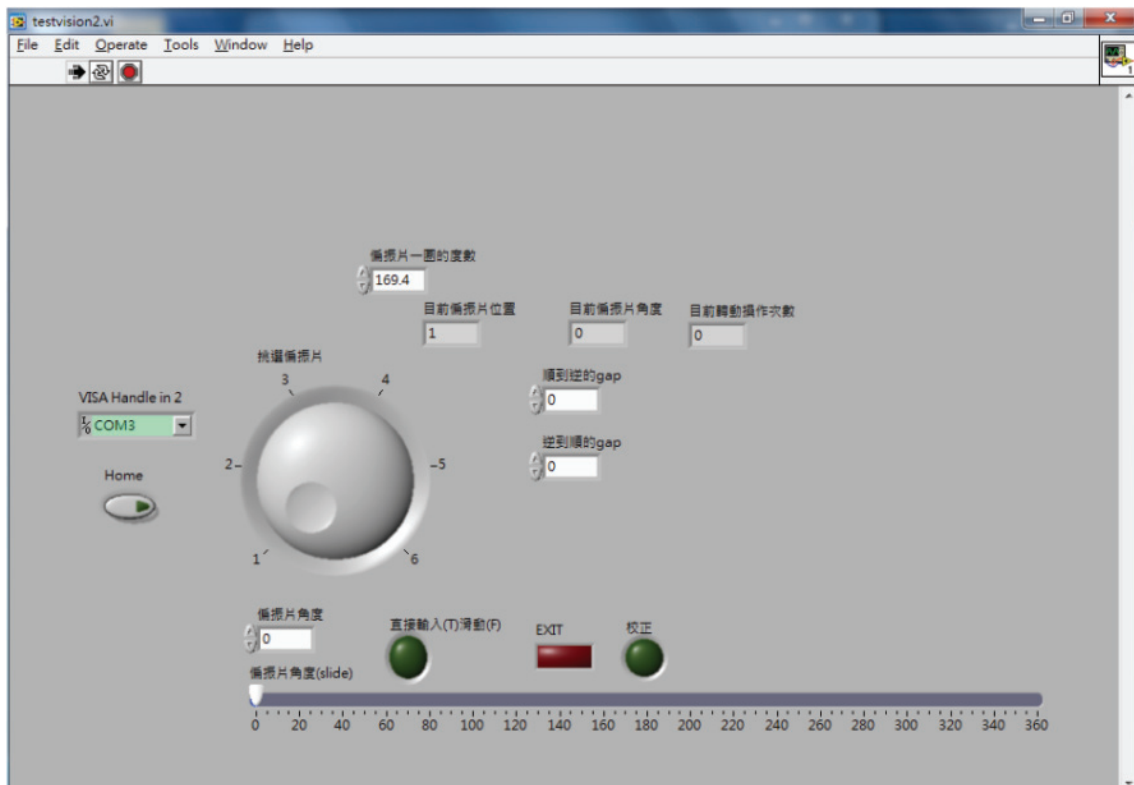


圖 6. 多通道切換寬頻偏振產生及解析模組 LabVIEW 操作程式介面。

表 1. 本系統所使用之偏振片和波片之相關型號及規格。

通道 元件	通道 1 可見光 VIS 400 – 700 nm	通道 2 近紅外 NIR1 700 – 1000 nm	通道 3 近紅外 NIR2 1000 – 1600 nm	通道 4 藍光 Blue band 457 nm	通道 5 綠光 Green band 532 nm	通道 6 紅光 Red band 632 nm
偏振片	LPVISE100	10LP-VIS-B	LPNIR-2	LPVISE100	LPVISE100	LPVISE100
波片	10RP54-1 achromatic quartz-MgF2	10RP54-2 achromatic quartz-MgF2	10RP54-3 achromatic quartz-MgF2	WPH10M-457 zero-order quartz	WPH10M-532 zero-order quartz	WPH10M-632 zero-order quartz

在本套裝置圓形轉盤上所使用的偏振片和波片都列在表 1 中，為符合在 400 至 1600 nm 波段的寬頻多光段偏振光譜應用上，因此裝載三片狀偏振片和三片消色差的寬頻波片，分別為三個波段：400 至 700 nm (VIS)、700 至 1000 nm (NIR1) 與 1000 至 1600 nm (NIR2)。三片偏振片本研究選用 Thorlabs 公司之產品，分別為 LPVISE100、LPVIS 和 LPNIR 型號被用於 VIS、NIR1 和 NIR2 之頻段，並分別放置在通道 1、2 和 3 之下板體。而寬頻波段之消色差波片，本研究最後使用 Newport 產品之 10RP54-1、10RP54-2 和 10RP54-3，分別置於內部通道 1、2、3 之上板體。這些元件都是零級石英-氟化鎂消色差波片 (zero-order quartz-MgF2 waveplates)。10RP54-1 在整個可見光範圍內該延遲約為  $0.25 \lambda \pm 0.01 \lambda$ ，而 10RP54-2 和 10RP54-3 約為  $0.25 \lambda \pm 0.005 \lambda$ 。而為了能符合可見光多波段高精度之偏振產生與解析影像量測，本裝置另外三個通道板體下方接安裝三個 LPVISE100 偏振片。另外，三片波片則選用窄頻零級石英的波片 (zero-order quartz waveplates)，這種元件具有非常精確之波長延遲且對溫度不敏感，是精確偏振影像量測應用中理想的波片，可以被用來辨別與待測樣本中紅 (R)、綠 (G) 以及藍色 (B) 三個波段的圓二色性偏振差異之影像量測應用中，相關元件分別安裝上板體中通道 6、5 及 4 之位置，通道 4、5 及 6 安裝之可見光偏振片和三個不同中心波長 QWP。其中分別使用 Thorlabs 公司製造之產品用於 457 nm 中心波長 (# WPH10M-457)、532 nm 中心波長 (# WPH10M-532) 和 632 nm 中心波長 (# WPH10M-632)。

### 三、實驗數據及討論

首先，為了量測本裝置之公轉切換及自轉旋轉之角度誤差，因此使用一個市售之偏振角度量測儀 (polarimeter, meadowlark optics) 來進行量測，本套量測儀能量測之解析度約為  $0.01^\circ$ ，使用 HeNe 632.8 nm 雷射光來作測試，使用通道 6 進行切換水平偏振以及垂直偏振，經偏振儀量測結果如圖 7 所示，其角度分別為 0.27 度以及 89.89 度，顯示自轉功能已達到預期之目標。

公轉切換 (channel switching) 及自轉旋轉 (orientation rotation) 之角度再現性，如圖 8 所示，不同通道之公轉切換角度誤差約為  $\pm 0.2^\circ$ ，然而通道之自轉旋轉之角度誤差約為  $\pm 0.7^\circ$ ，通道之自轉旋轉角度誤差較大，係因前面所述，由於自轉角度為齒輪所帶動誤差較大，然而公轉切換則是由高精度之旋轉馬達直接帶動，然而還是受限於單向軸承之精度所致，仍有  $\pm 0.2^\circ$  之誤差。

將所開發之寬頻全偏振產生與分析全自動切換模組，整合於現有顯微光譜儀當中，並進行偏振分析量測模組性能測試，分別掃描 HeNe 632.8 nm 雷射光與單波長掃描寬頻光源之偏振狀態 (此時並未插入任何樣本，只是測試光源之偏振狀態)，HeNe 雷射呈現線性偏振狀態，以偏振雷達圖來呈現，如圖 9(a) 所示，然而寬頻光源則形成橢圓偏振狀態 (或近似橢圓分布之偏振光)，如圖 9(b) 所示，這與光源之輸出特性有關。

因此利用所開發之模組，測試通道 1、2 及 3 之偏振消光比之測試，整合可見光波段 (400 nm – 700 nm) / 短波近紅外波段 (700 nm – 1000 nm) / 長



波近紅外波段 (1000 nm – 1600 nm) 之薄片型偏振片，進行元件之切換及轉角度，量測其消光比，如圖 10 所示，在近紅外波段，可接近 35 dB 之性能表現，在可見光波段，仍有接近 20 dB 之表現。

接下來，任意偏振狀態包含左旋偏振及右旋偏振，將可由調整偏振片及波片之旋轉角度來產生，首先測試通道 4、5 及 6 之可見光 RGB 三波長波片色差之延遲量，先測試紅光波段 (632 nm)，

使用 Safrani<sup>(7)</sup> 所提出之三步強度量測法 (three-step measurement method) 來推得相位延遲量以及主軸之角度，旋轉偏振片依序進行三個特殊角度 (0°、45°、90°) 之旋轉，並記錄當下之強度 ( $I_{0^\circ}$ 、 $I_{45^\circ}$ 、 $I_{90^\circ}$ )，其中波片主軸之角度  $\phi$  可表示為

$$\phi = \frac{1}{2} \text{Cot}^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{2I_{45^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ}} \right] \right\} \quad (1)$$

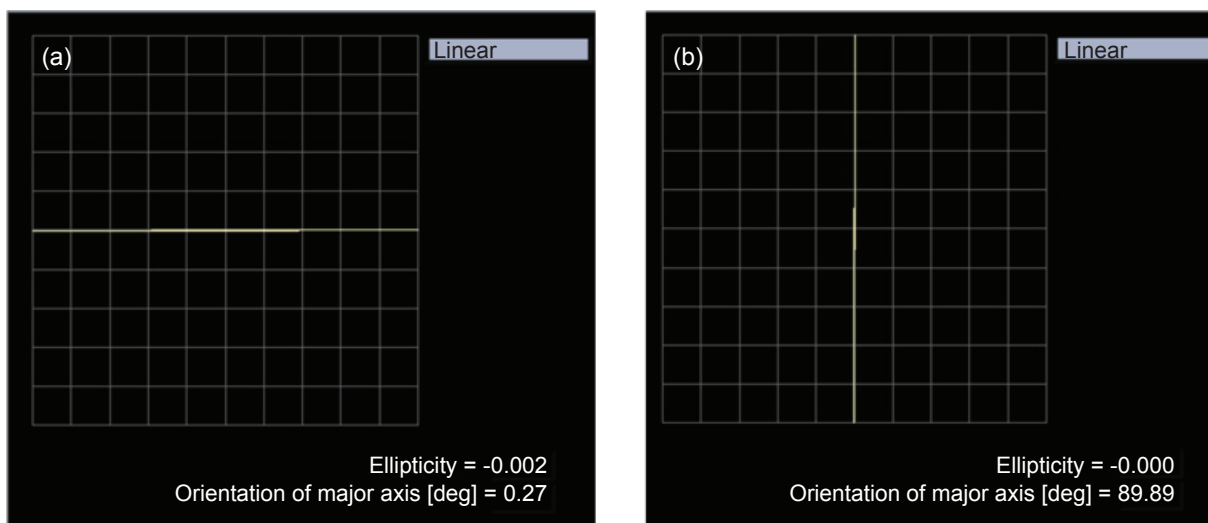


圖 7. 第 6 通道線型偏振狀態切換量測 (a) 水平線型偏振；(b) 垂直線型偏振狀態。

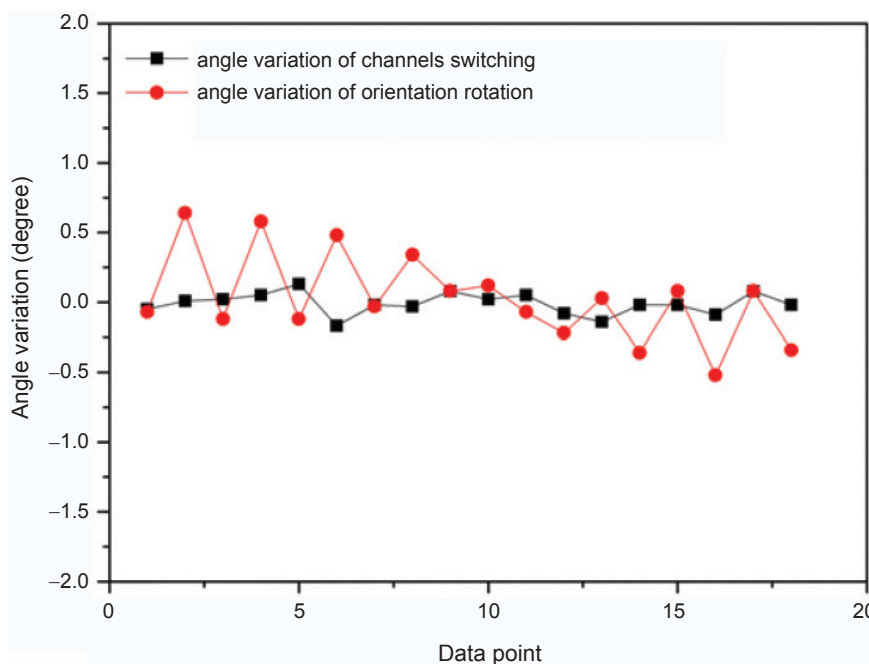


圖 8. 六通道切換寬頻偏振產生及解析模組之公轉切換及自轉選轉之角度誤差。

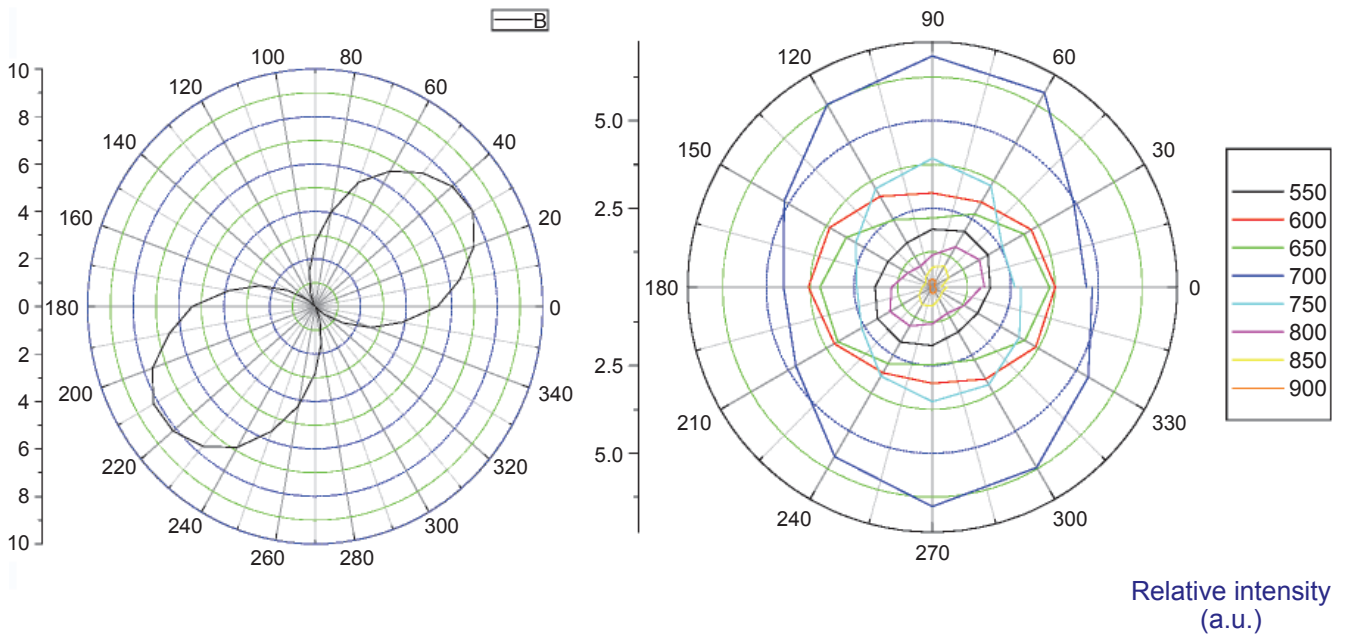


圖 9. 光源偏振雷達圖 (a) HeNe laser ; (b) 寬頻燈泡光源。

波片相位延遲量  $\delta$  可表示為

$$\delta = \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{2}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} \times \left\{ I_{0^\circ} + \frac{1}{4I_{0^\circ}} [I_{0^\circ} - 2I_{45^\circ} + I_{90^\circ}]^2 \right\} \right\} \quad (2)$$

因此，使用元件自轉 (馬達逆轉) 來分別取得 0 度、45 度以及 90 度之寬頻光強度分布，如圖 11

所示，圖中三條曲線所匯集之處，即為四分之一波長延遲量的位置，明顯可看出約接近於 632 nm，與規格所述相同。使用方程試計算相位延遲量以及主軸之角度，數據如圖 12(a) 與 (b) 所示，其中先看圖 (a)，由於波片之厚度很薄容易形成干涉條件，因而明顯地可看出有波動起伏之情形 (ripple)，圖 (b) 顯示的是，此波片寬頻色差波長延遲量之曲線，基本上呈現與波長成為反向正比之關係 (reverse-linearly proportional)，並與規格曲線非

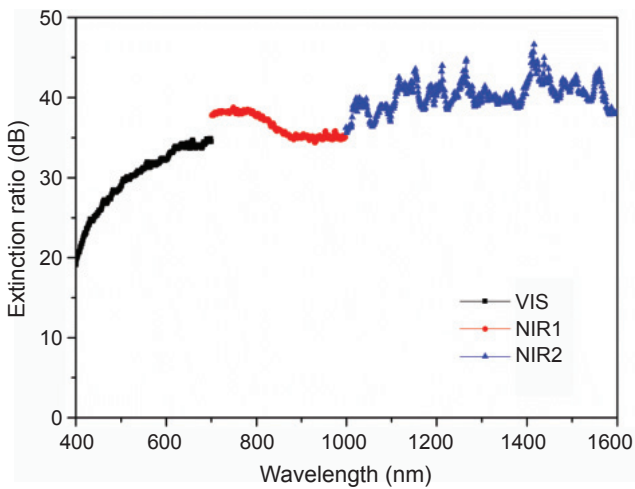


圖 10. 三波段寬頻偏振片之寬頻消光比光譜量測。

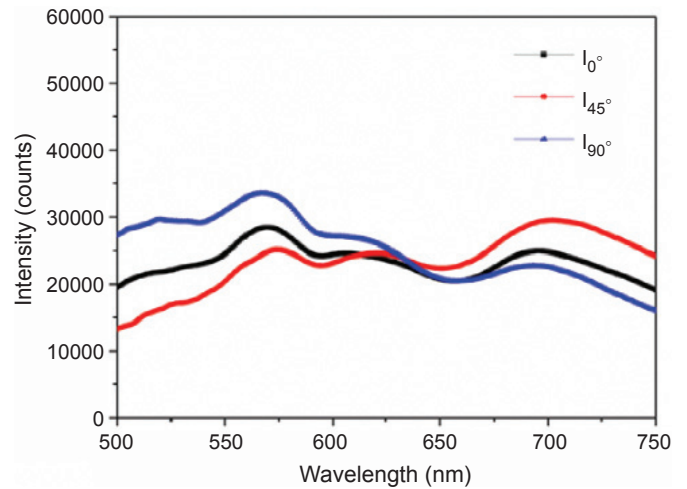


圖 11.  $I_{0^\circ}$ ， $I_{45^\circ}$ ，and  $I_{90^\circ}$  三個對應角度下之光譜強度分布。



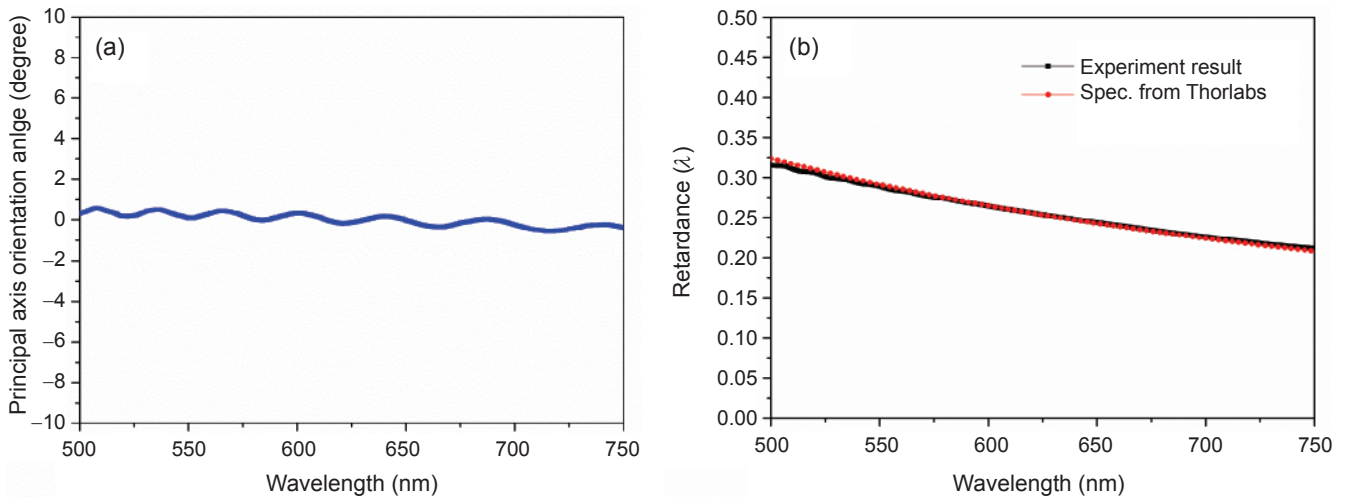


圖 12. (a) 波片主軸角度與波長之關係；(b) 寬頻波長延遲量與規格比較。

常接近。

為了切換兩個不同旋轉方向之左旋偏振以及右旋偏振，因此使用馬達反轉啟動偏振元件自我旋轉，而波片保持不動（方位角預設為 45 度），旋轉從 0 度至 90 度，可從右旋偏振 (RHCP) 轉為左旋偏振 (LHCP)，使用偏振量測儀來驗證，通道 4 所產生的左旋偏振及右旋偏振，分別如圖 13 (a) 與 (b) 所示，其橢圓率 (ellipticity) 可分別達到 0.996 與 0.993。

可見光波段的其他兩個波長，綠光 532 nm (通道 5)、藍光 457 nm (通道 4)，使用相同方法來進行驗證及測量，實驗數據與 632 nm (通道 6) 一起

比較，如圖 15 所示，經由計算，紅光波段實驗值及規格分別為  $0.2485 \lambda$  與  $0.2511 \lambda$ ，量測誤差約為  $0.0026 \lambda$ 。綠光 532 nm (通道 5)，實驗值及規格分別為  $0.2508 \lambda$  及  $0.2494 \lambda$ ，量測誤差約為  $0.0014 \lambda$ 。藍光 457 nm (通道 4)，實驗值及規格分別為  $0.2465 \lambda$  及  $0.2500 \lambda$ ，量測誤差約為  $0.0035 \lambda$ 。實驗結果顯示，本裝置可成功地勝任高解析之左旋偏振及右旋偏振之量測應用。

在寬頻旋光切換部分，市面上能選購之薄片型寬頻消色差波片，其單一元件使用頻寬亦無法涵蓋 400 nm – 1600 nm 寬頻響應，因此我們使用 3 組寬頻消色差波片 (achromatic waveplate) 來涵蓋全

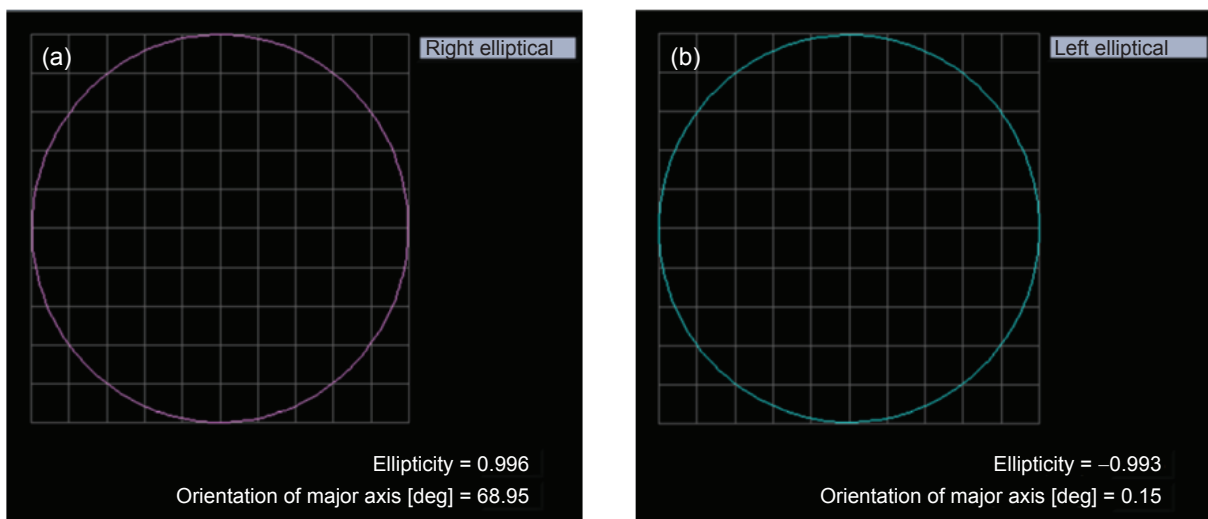


圖 13. 兩正交之圓型偏振光狀態 (a) 左旋偏振；(b) 右旋偏振。

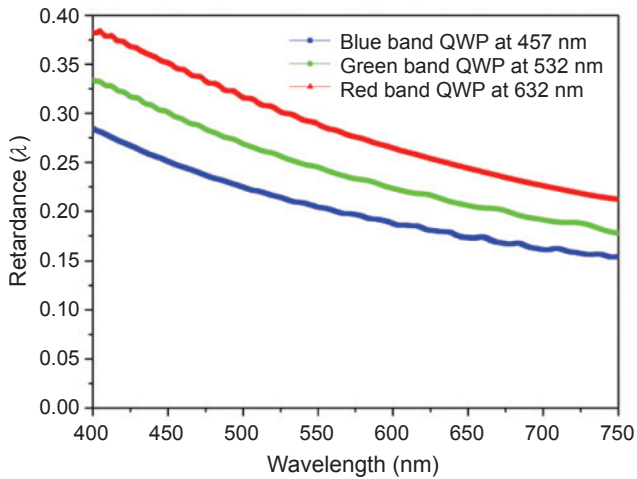


圖 14. 457 nm，532nm 及 632 nm 三波段之零階石英波片之寬頻波長延遲曲線。

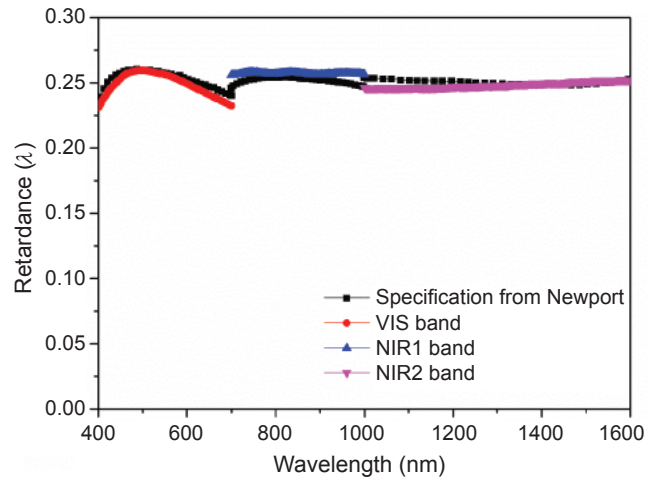


圖 15. 三通道寬頻消色差波片之波長延遲量光譜量測曲線。

波段，進行元件切換及自轉角度，並量測其相位延遲波長 (retardation)，測試通道 1、2 與 3 之相位延遲量測試，如圖 15 所示，其中在近紅外波段 NIR 1 與 NIR 2 兩波段，相位延遲量在  $0.25 \lambda \pm 0.01 \lambda$  範圍內，而可見光波段 VIS 受到可見光波段高色散之影響，其相位延遲量變化較大，在  $0.25 \lambda \pm 0.02 \lambda$  範圍內。

上述所通道 1-6 所裝載的波片，其量測實驗數據與廠商所提供之規格分別略於表 2 中，方便進行比較。量測誤差來自於顯微光路之非準直光路徑以及機械裝置中單向軸承和齒輪或皮帶輪之機構誤差，未來改善之處為調整顯微光路之準直狀態應可些微改善與調整。

## 五、小結

為了應用於多波段之偏光顯微光譜 (broadband multi-spectral polarimetric spectroscopy) 以及多波長

偏光影像量測技術 (multi-wavelength polarimetric imaging applications)，本套多通道切換寬頻偏振產生及解析裝置將為不可或缺之重要模組，透過馬達正反轉來控制元件之公轉切換及元件自我旋轉角度，可切換不同波段及產生任意偏振狀態。

在本研究當中，分別開發三通道及六通道切換寬頻偏振產生及解析裝置，可分別裝載三組或六組由偏振片及波片所組合之偏振產生或偏振解析功能。六通道模組係使用齒輪設計，因此公轉切換及自轉旋轉角度誤差大約分別為  $\pm 0.2^\circ$  及  $\pm 0.7^\circ$ ，三通道模組係使用高級印表機用之皮帶輪設計，因此公轉切換及自轉旋轉角度誤差大致都可低於  $0.1^\circ$ 。而機械裝置所造成之偏振量測誤差分析，未來將可建立資料庫進修正補償。透過所開發之自動化程式 LabVIEW 之控制，可輕易地精準控制元件之公轉切換以及自轉旋轉角度，可輕易切換 400 nm - 1600 nm 之任意波長下之偏振狀態。

表 2. 六通道內之波片實驗量測值與規格比較。

通道比較	通道 1 VIS band	通道 2 NIR1 band	通道 3 NIR2 band	通道 4 Blue band	通道 5 Green band	通道 6 Red band
規格	$0.25 \pm 0.015 \lambda$	$0.25 \pm 0.01 \lambda$	$0.25 \pm 0.005 \lambda$	$0.2500 \lambda$	$0.2494 \lambda$	$0.2511 \lambda$
實驗值	$0.25 \pm 0.02 \lambda$	$0.25 \pm 0.01 \lambda$	$0.25 \pm 0.005 \lambda$	$0.2465 \lambda$	$0.2508 \lambda$	$0.2485 \lambda$

## 誌謝

感謝科技部計畫 NSC 101-2221-E-492-024 與 MOST 103-2622-E-492-019-CC3 之經費補助。本研究特別感謝范綱宏、張鮮文及王鈞奕先生所提供機械原理及自動化之建議及協助。

## 參考文獻

1. C. J. Weng et al., *Proc. SPIE*, 8487 (2012).
2. C. L. Thomsen, F. D. Nielsen, J. Johansen, C. Pedersen, P. M. Møselund, U. Møller, S. T. Sorensen, C. Larsen, and O. Bang, *Proc. SPIE*, 8637 (2013).
3. S. Horne, D. Smith, M. Besen, M. Partlow, D. Stolyarov, H. Zhu, and W. Holber, *Proc. SPIE*, 7680 (2010)
4. G. C. Giakos, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **55**, 6, 1904 (2006).
5. M. Alouini, F. Goudail, and Philippe Refregier, *Proceedings of SPIE*, **5432**, (2004).
6. H. Arimoto, *Applied Spectroscopy*, **60**, 4, 459 (2006).
7. K. Claborn, E. P-Faucher, M. Kurimoto, W. Kaminsky, and B. Kahr, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 48, 14825 (2003).
8. A. Safrani, and I. Abdulhalim, *Opt. Eng.*, **48**, 5, 053601-1 (2009).
9. S. W. Chang et al., *United State Patent*, US 2013/0045830A1 (2013).
10. C. J. Weng, et al., *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2434 (2012).



翁俊仁先生為國立交通大學光電工程研究所博士候選人，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Chun-Jen Weng is a Ph.D. student of Department of Photonics at National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



劉達人博士畢業於國立台灣大學物理博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Da-Ren Liu received his Ph.D. in physics from National Taiwan University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張鮮文先生為國立台灣科技大學機械碩士，現任揚明光學股份有限公司資深工程師。

Shian-Wen Chang received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an senior engineer in Young optics.



黃吉宏博士為國立清華大學動力機械博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Chi-Hung Hwang received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.