

研究光波系統極化狀態的改變

A Study on the Changes of the Polarization States in Light-Wave Systems

陳吳奇、余彥駿

Wu-Chi Chen, Yen-Chun Yu

認知高速長距離光波系統的極化關係是設計成功關鍵，工作動機是探討和研究兩訊號間交互作用所造成的極化變化。兩個左旋極化光波長範圍設定從 1530.16 nm 到 1534.04 nm，且傳輸在相同的光路徑後被多工混合，由實驗指出，從極化分析儀分析後結果主要為左旋極化，然而分析儀偵測出部分的輸出訊號卻為右旋極化；兩個右旋極化光波長範圍設定從 1535.06 nm 到 1536.09 nm，經相同方式處理，結果完全為右旋極化。實驗證明，兩個左旋極化光在某個波段範圍互相交互作用，能夠導致極化狀態改變，並且當輸出光功率下降則輸出訊號的極化度增加，極化度和光功率之間有相當密切的反比關係。

Awareness of the polarization relationships within high-speed, long-distance light-wave systems is the key to successful designs. The work is motivated by the desires to explore and study the changes of the polarization states caused by the mutual interaction of the two polarization light signals. The wavelengths of the two left-hand polarization light signals were set the ranges from 1530.16 nm to 1534.04 nm. The two polarization light signals propagated through the same optical path were then multiplexed together. We saw the detection of the output polarizations with a polarimeter was mainly the left-hand polarization states. However, the right-hand polarization states of the output signals can be still discovered in the polarimetric analyzer. Other experiments with the same procedures were performed as stated above except that the wavelengths of the two right-hand polarization light signals ranged between 1535.06 nm and 1536.09 nm. Experimental observations indicate the output polarization light signals were completely the right-hand polarization states. The work demonstrated as follows, 1. The mutual interaction between the two left-hand polarization light signals can cause the important changes of the polarization states within some wavelength ranges. 2. The degree of polarization of the output signals increased as the output optical power decreased. There is a quite close inverse relationship between the degree of polarization and optical power.

一、前言

摻鉕光纖放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 所產生的放大自發輻射 (amplified stimulated emission, ASE)⁽¹⁾，可利用的波段頻譜具有上百奈米波長的範圍，使用光可調濾波器 (optical tunable

filter, OTF) 萃取當中的波段，作為通訊光源使用，則可達到分波多工器 (wavelength division multiplexer, WDM)、高密度分波多工器 (dense wavelength division multiplexer, DWDM) 等通訊光源的功能，進一步降低光通訊雷射光源使用上的成本。

光纖通訊網路系統當中所使用的傳輸光源，大部分都具有高度的極化 (polarization)^(2, 3) 特性。這些帶有極化特性的光訊號，在極高速率的資料傳輸之下，經過分波多工器、高密度分波多工器等光通訊元件，由於不同波段之間的交互作用干擾或是極化現象本身導致的傳輸速率不同，會造成極化模態色散 (polarization mode dispersion, PMD)^(4, 5) 及其他因素引起的傳輸訊號失真問題。

由於光通訊領域中，其通道 (channel) 間距為 0.8 nm 的高密度分波多工器系統，所使用的可調式雷射輸出之極化光的狀態及其他性質，已被深入了解，但從摻鉕光纖放大器所產生的放大自發輻射所萃取的波段，其光訊號的極化狀態及在高密度分波多工器系統通道上，光纖傳輸造成的交互作用影響並不清楚。由於各通道極化訊號之間的互相干涉會造成長距離通訊的品質影響、通訊訊雜比 (signal to noise ratio, SNR) 的下降或接收訊號位元誤碼率 (bit error rate, BER) 的提升，故在應用此技術之前，需先加以研究並分析極化訊號間的交互作用所造成的影響。

本實驗用摻鉕光纖放大器所產生的放大自發輻射光譜，藉由兩個可調光濾波器，萃取並篩選出的兩個極化光當作光源，所濾波的波長線寬小於微奈米級，故同調性干涉長度很大。雖然此實驗執行在相同固定的光傳遞路徑下，以減少相變化所造成的損失及訊號的失真，但在未來極高速長距離光纖系統和高通道容量有線電視 (CATV) 分配系統的應用上，同一個波長通道將被使用於傳輸各種不同狀態的極化訊號，藉此增加傳輸資料容量以及提升頻寬的使用效率。但是資訊在傳遞過程中，極容易受到極化模態的干涉混合影響，會對整個通訊網路系統運作上造成嚴重的危害。以網路電視節目為例，其作用原理是從電視台發送不同極化方向的極化影像資料光訊號，透過光纖網路通訊系統傳送至觀看者家中的極化或偏振式 3D (polarization 3D) 立體電視，觀看者佩帶 3D 眼鏡或直接裸視欣賞電視節目，最後再經過觀看者的大腦合成立體影像。光訊號在傳輸過程如果受到極化模態的干涉混合影響，觀看者將無法觀看完整影像。

二、實驗架構與研究方法

由表 1 得知⁽⁶⁾，1530.16 nm 至 1534.04 nm 的波段範圍為左旋極化訊號，1535.06 nm 到 1536.09 nm 波段範圍為右旋極化訊號，1536.13 nm 至 1537.02 nm 波段範圍呈現左旋極化訊號。本實驗的量測波段範圍從 1530 nm 至 1537 nm，此波段範圍內包含了左旋極化波段與右旋極化波段，故在固定的光路徑下，使用兩個光可調濾波器自摻鉕光纖 (erbium doped fiber, EDF) 所產生的放大自發輻射，萃取出任意兩個左旋極化波長 (1530.16 nm 至 1534.04 nm)，再經由極化分析儀與光譜分析儀的量測分析，觀察並記錄兩波長之間的交互作用情況所造成的極化變化結果；萃取出任意兩個右旋極化波長 (1535.06 nm 到 1536.09 nm)、任意一個左旋極化波長和一個右旋極化波長，比照先前相同的實驗步驟辦理，記錄極化訊號之間的交互作用後所造成的極化狀態改變。

圖 1 為本實驗之架構，實驗環境是在氣浮式光學防震桌 (air-suspended optical table) 上進行，故可防止因為震動因素所造成的極化狀態改變，並使用熱電致冷器 (thermo-electric cooler, TE cooler) 控制雷射光源的溫度，以達到雷射輸出光源的穩定性，使用波長 1480 nm 及 980 nm 的泵浦雷射 (pump laser)、980/1550 nm 耦合器、1480/1550 nm 耦合器、摻鉕光纖、光可調濾波器，量測方面採用的設備儀器是 Thorlabs 公司極化分析儀 (polarization analyzer) 及安捷倫 (Agilent) 公司的光譜分析儀 (optical spectrum analyzer, OSA)。

使用 1480 nm 及 980 nm 的泵浦雷射將光訊號耦合至摻鉕光纖，訊號經過增益放大後，透過光路中的兩個光可調濾波器萃取出不同波長之奈米等級通道 (channel) 的放大自發輻射光訊號，經光譜分

表 1. 1530.16 nm 到 1537.02 nm 波段極化量測結果⁽⁶⁾。

波長 (nm)	1530.16	1531.01	1532.03	1533.07	1534.04
極化現象	左旋	左旋	左旋	左旋	左旋
波長 (nm)	1535.06	1536.09	1536.13	1537.02	
極化現象	右旋	右旋	左旋	左旋	

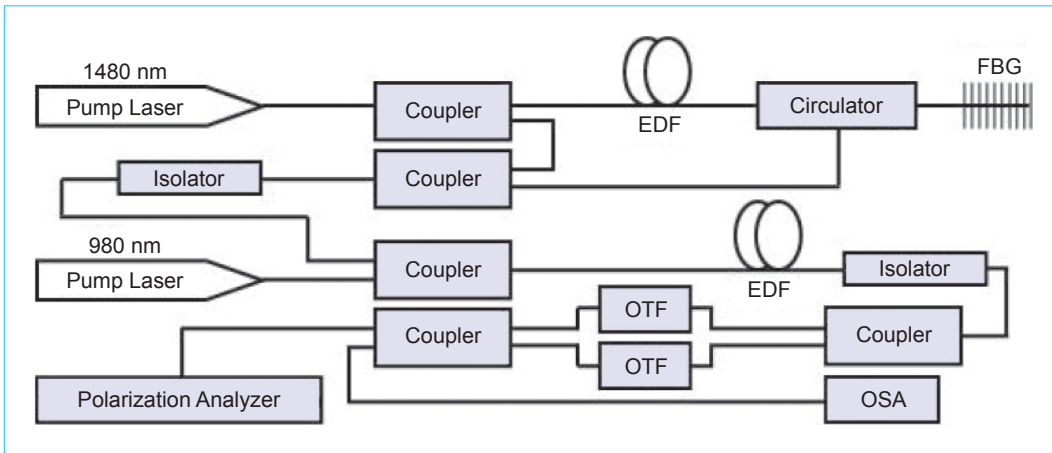


圖 1. 實驗架構圖。

析儀再次確認其正確波長。

此實驗設計在固定的光傳遞路徑下，各個通道的光訊號傳遞距離皆相同及通道之間的波長小於奈米 (兩通道之間最小為 0.08 nm)，且多工混合的傳輸距離小於一公尺，故除了兩個通道的光訊號彼此產生極化交互作用影響之外，其色散所造成的影響可以被忽略，故測量兩通道互相交互作用所造成色散的變化，乃是受到極化模數色散的影響。

先固定其一光可調濾波器的波段通道，再調轉另一只可調光濾波器來變換不同的波段通道，使這兩個通道的光訊號可以互相接近、交錯到遠離，其兩個通道的間距最小範圍可以達到 0.08 nm，最大間距範圍則為 5.24 nm，觀察兩個通道在相同光傳遞路徑且各種不同波段間距範圍下，輸送至極化分析儀及光譜分析儀測量並分析其波長訊號及極化狀態等參數，以得到彼此交互作用後所產生極化狀態變化結果。

圖 2 以固定其一光可調濾波器 1533.78 nm 波段通道，並調轉另一只可調光濾波器來變換不同的波段通道為例，將放大自發輻射萃取兩個通道之光訊號從接近、交錯至遠離互相交互作用進行兩波混合輸出的極化度 (degree of polarization, DOP) 改變，可以觀察到左、右旋極化現象的交替變換。圖 3 為根據 1533.78 nm 波段與不同波段通道的交互作用之後所量測的結果：1533.78 nm 波段與 1531.21 nm – 1531.39 nm 波段交互作用後，原先極化方向為右旋橢圓極化 (right circularly polarized) 會逐漸轉換為線性極化 (linearly polarized)；1533.78 nm 波段與 1531.45 nm – 1532.51 nm 波段交互作用後，極化方向會由線性極化逐漸轉變為左旋橢圓極化 (left circularly polarized)；1533.78 nm 波段與 1532.51 nm – 1533.32 nm 波段交互作用後，極化方向會再由左旋橢圓極化逐漸轉換為線性極化；1533.78 nm 波段與 1534.47 nm – 1535.53 nm 波段

表 2. 兩個左旋波段通道 (channel) 互相交互作用後，產生右旋極化波段。

左旋極化波長 (nm)	1530.77	1533.99	1530.77	1536.52	1531.77	1533.89	1531.77	1536.50
交互作用後極化方向	右旋		右旋		右旋		右旋	
左旋極化波長 (nm)	1531.77	1537.01	1532.79	1533.64	1532.79	1537.10	1533.78	1531.21
交互作用後極化方向	右旋		右旋		右旋		右旋	
左旋極化波長 (nm)	1533.78	1533.39	1533.78	1533.47	1533.78	1534.04	1536.76	1532.46
交互作用後極化方向	右旋		右旋		右旋		右旋	
左旋極化波長 (nm)	1536.76	1532.88	1536.76	1533.28	1536.76	1533.83		
交互作用後極化方向	右旋		右旋		右旋			

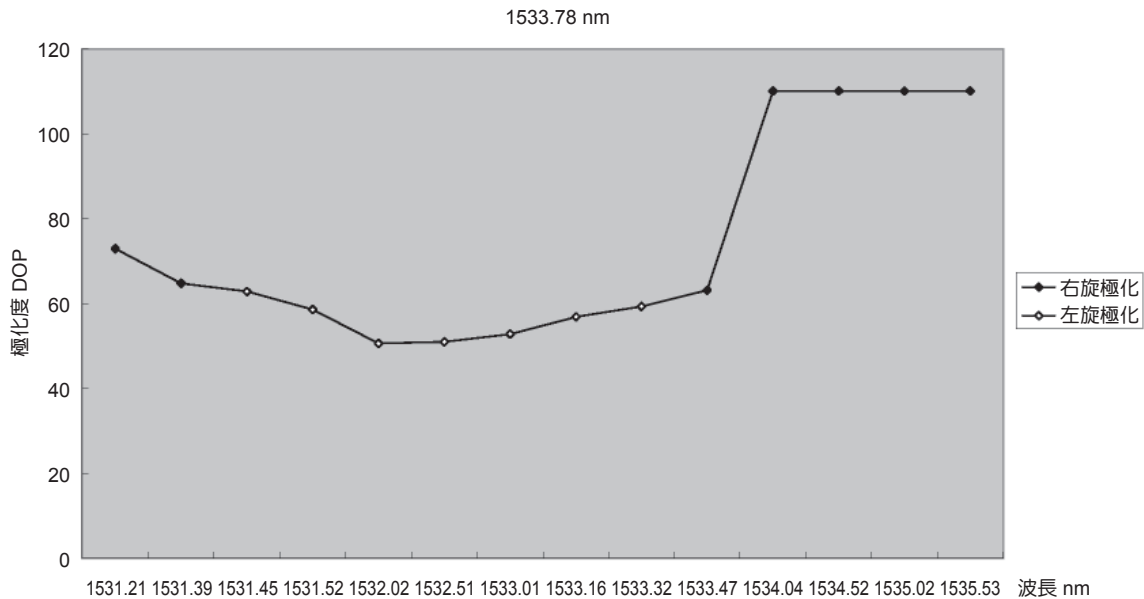


圖 2. 固定波段 1533.78 nm 與其他波段交互作用後的 DOP 變化。

交互作用後，極化方向再由線性極化逐漸轉變成右旋橢圓極化的現象產生。

三、研究結果與討論

根據實驗結果，在 1530 nm 至 1537 nm 的量測波段範圍當中，從 1530.16 nm 到 1534.04 nm、1536.13 nm 到 1537.02 nm 的波段範圍內，兩個原本是左旋極化的光訊號通道，經過交互作用之後產生新的左旋極化光；1535.06 nm 到 1536.09 nm 的波段範圍內，兩個原本是右旋極化的光訊號通道，經過交互作用之後產生新的右旋極化光；在 1530 nm 至 1537 nm 整體量測波段範圍當中，某些原本是左旋極化訊號通道的光訊號，在與上述相同實驗條件下，兩個通道彼此交互作用的結果反而會轉變為右旋極化通道光訊號。表 2 為依據極化分析儀及光譜分析儀所記錄的實驗結果，兩個左旋極化通道光訊號彼此交互作用產生右旋極化通道光訊號的波段，經實驗研究後發現，光訊號之間的彼此交互作用確實會造成訊號極化的改變。

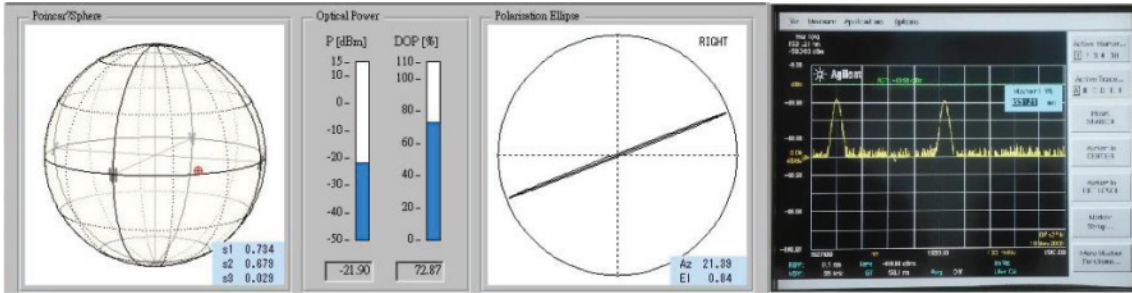
波長互相交互作用後左旋極化範圍的逐漸遞減，初步研判是在沒有和其他波段通道交互作用影響之下，光可調濾波器所萃取自摻鉕光纖產生

的放大自發輻射之原始極化訊號 1534 nm 至 1536 nm 為右旋極化現象相關，但發現在 1536 nm 之後的兩個通道的左旋極化波段彼此交互作用後卻依然是右旋極化訊號。若以上現象被使用在傳輸容量更大、頻寬更高、傳輸速率更快、距離更遠的光通訊網路上，若不經過事先的測試及調整，則會造成訊號傳遞位元誤碼率的提升，這都是設計者在設計多通道的光纖通訊網路系統時，必須列入考量的因素之一。

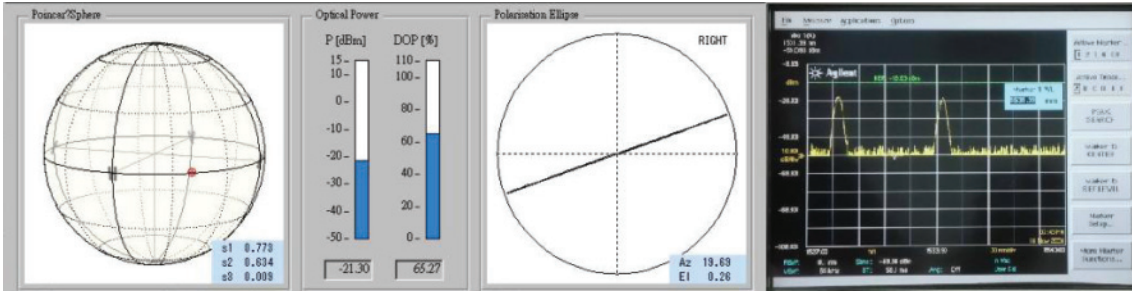
在光路徑傳遞的光訊號極化度變動可以由正規化 Stokes 的 s_1 、 s_2 、 s_3 這三項數值表示⁽⁷⁾。圖 4 為圖 2 的兩通道進行多工混合輸出之極化度的 s_1 、 s_2 、 s_3 參數，發現 s_1 與 s_2 兩條曲線的交錯與光訊號的極化度相關聯， s_1 與 s_2 的曲線交錯，光訊號的極化度數值則會從原先最高的 110 開始出現數值變動，此現象會持續至下一次的 s_1 與 s_2 曲線交錯，光訊號的極化度數值再度保持 110 不變。

s_3 參數圖形與圖 2 訊號極化度最為相似，經比較後認為極化數值的變動主要受到 s_3 參數的影響最大， s_1 及 s_2 這兩項參數則決定光訊號的極化度數值是否能維持在最好的 110 極化狀態。

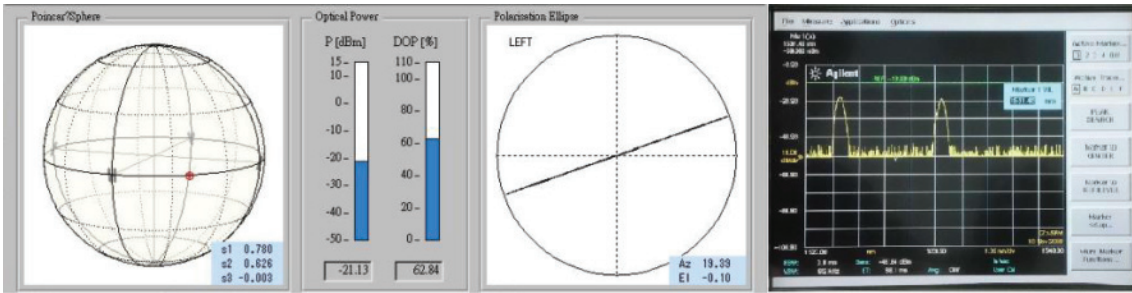
藉由圖 5，我們可以看到測量範圍內極化訊號的光功率值變動，即可發現兩通道多工混合後，



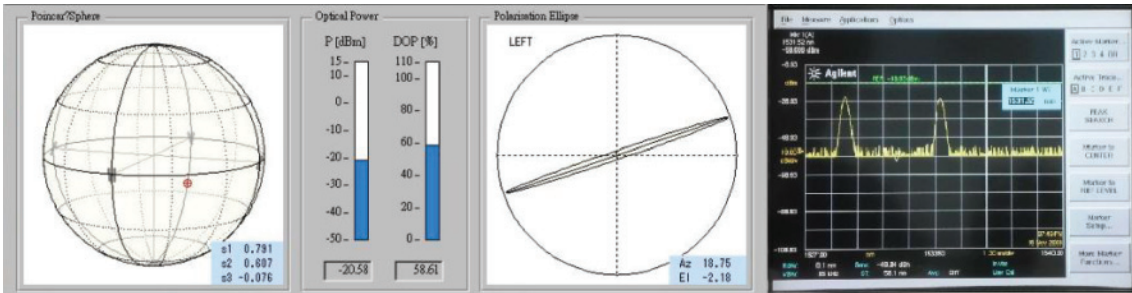
(a) 1533.78 nm 與 1531.21 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



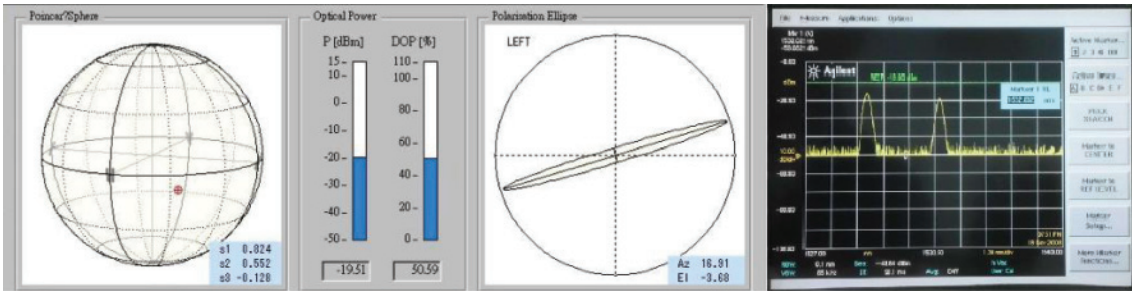
(b) 1533.78 nm 與 1531.39 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



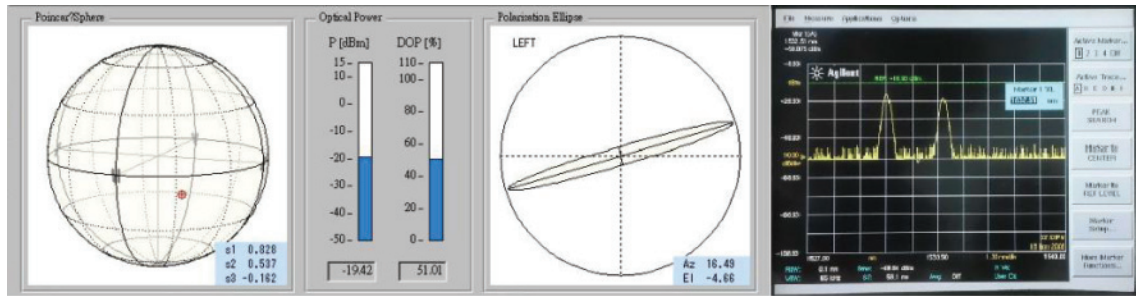
(c) 1533.78 nm 與 1531.45 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



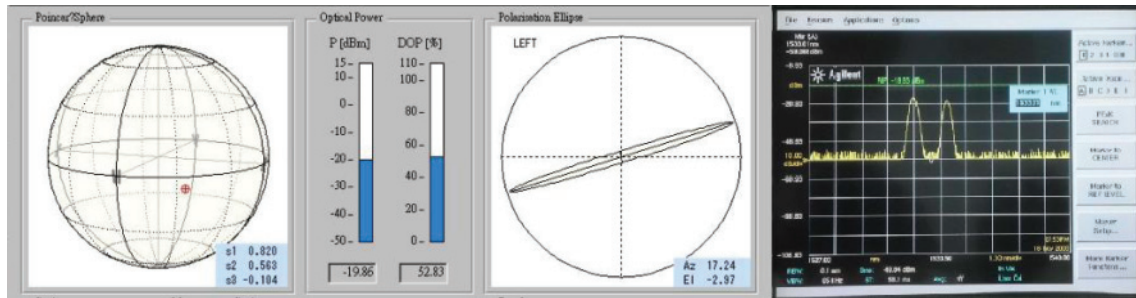
(d) 1533.78 nm 與 1531.52 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



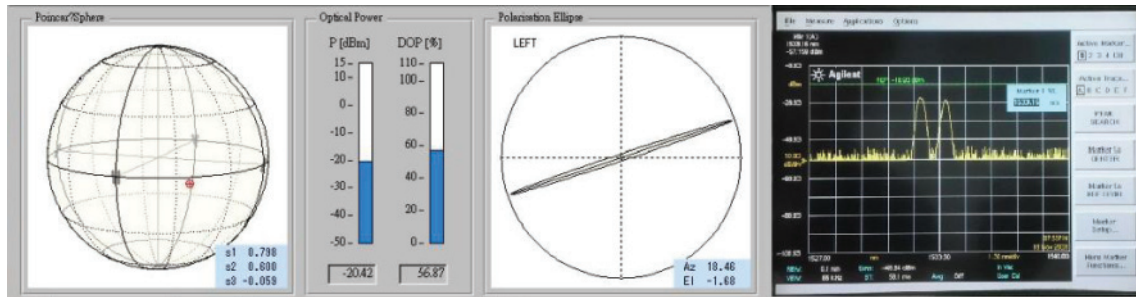
(e) 1533.78 nm 與 1532.02 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



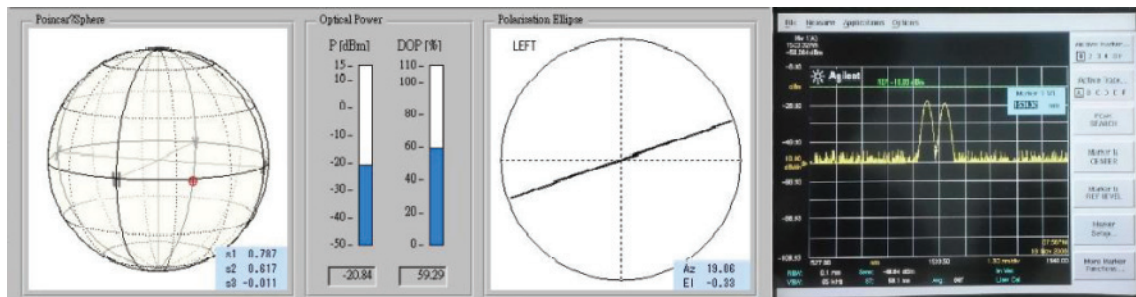
(f) 1533.78 nm 與 1532.51 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



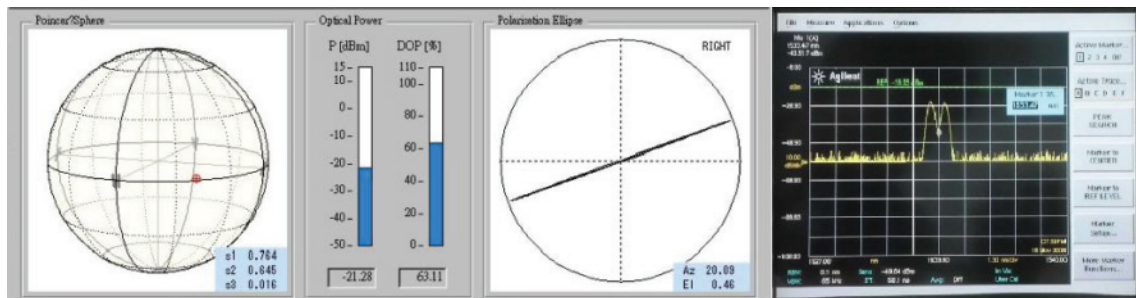
(g) 1533.78 nm 與 1533.01 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



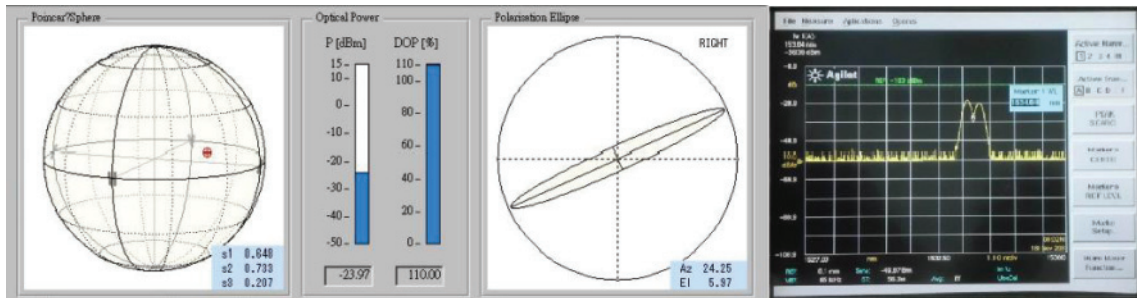
(h) 1533.78 nm 與 1533.16 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



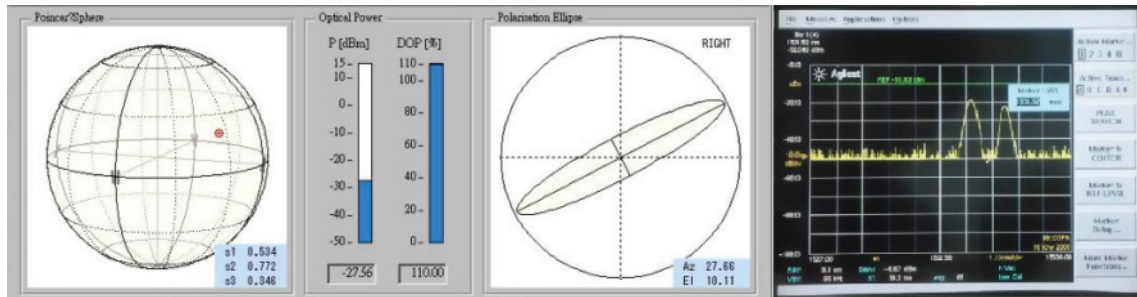
(i) 1533.78 nm 與 1533.32 nm 波段交互作用後產生的左旋極化。



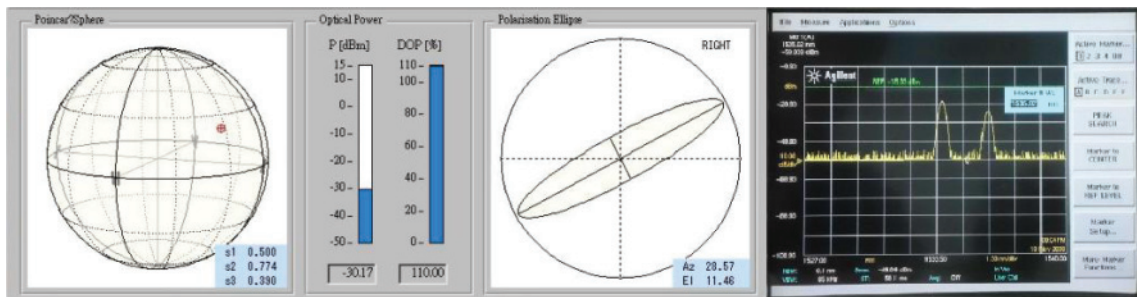
(j) 1533.78 nm 與 1534.47 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



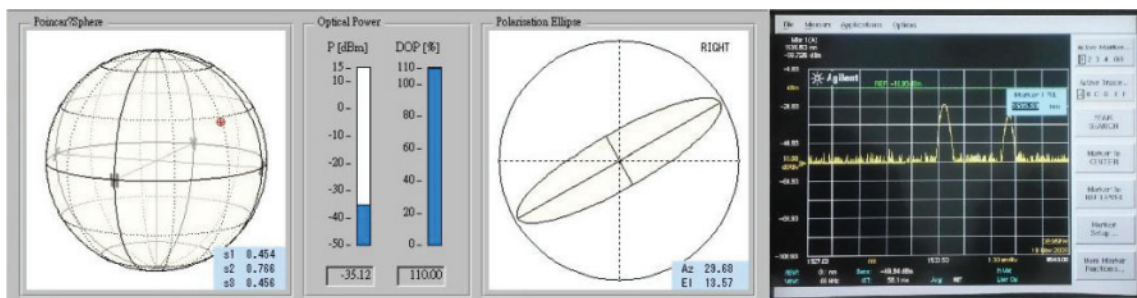
(k) 1533.78 nm 與 1534.04 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



(l) 1533.78 nm 與 1534.52 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



(m) 1533.78 nm 與 1535.02 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。



(n) 1533.78 nm 與 1535.53 nm 波段交互作用後產生的右旋極化。

圖 3. (a) 至 (n) 為 1533.78 nm 波段通道與其他波段通道交會作用後，極化方向的轉變之後所量測的結果。

波長 1533.78 nm 與其他波段交互作用後之極化度 (DOP) 及光功率圖，左邊 DOP 數值標示為從小到大，右邊光功率 dBm 數值標示為從大到小。由此圖可以觀察到 1533.78 nm 波段與其他波段彼此交

互作用後所測量到的極化度與光功率，近似於反比的現象。1533.78 nm 波段與 1534.04 nm 之後的波段交互作用後，因為已經達到量測儀器的極化度最大飽和值 110，故無法再明顯呈現極化度與光功率

圖 4.
固定波段 1533.78 nm
與其他波段交互作用
後的正規化 Stokes 參
數 (s_1 、 s_2 、 s_3) 變化。

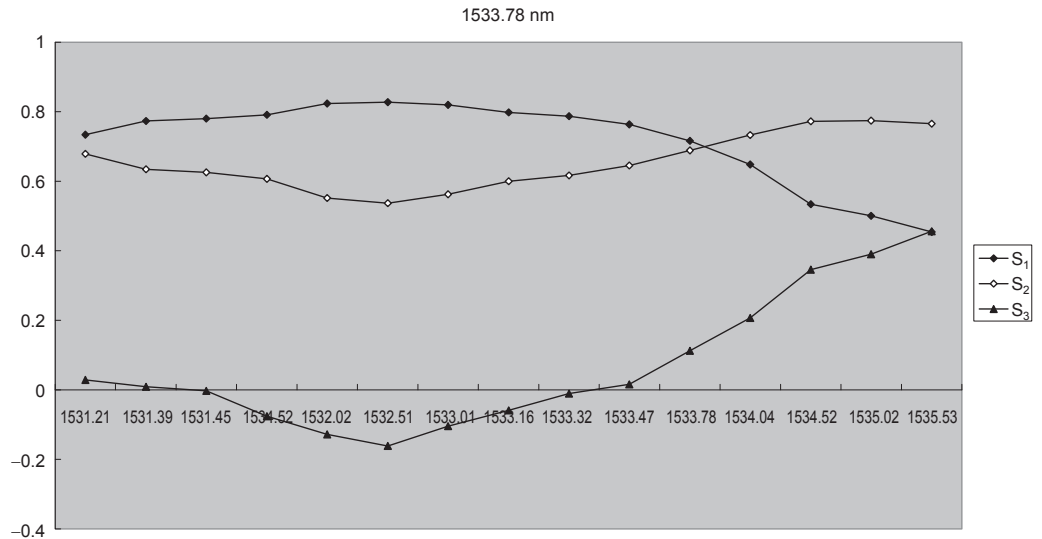
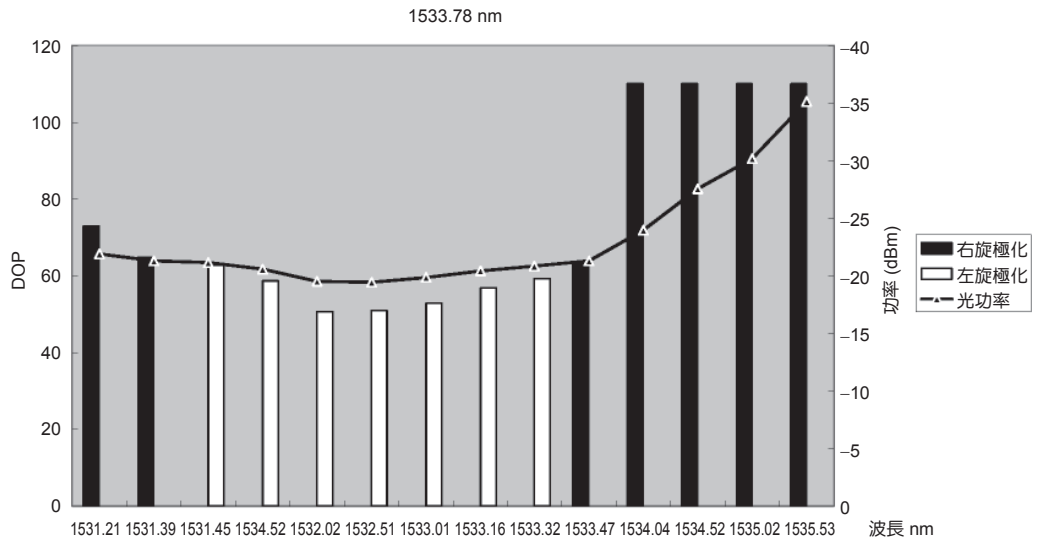


圖 5.
固定波長 1533.78 nm
與其他波段交互作用
後之極化度 (DOP) 及
光功率圖，左邊 DOP
數值標示為從小到大，
右邊光功率 dBm
數值標示為從大到小。



的反比變動。從整體量測結果指出，觀察到兩波段交互作用後所量測的極化度與光功率變化，呈現近似於反比的結果。就算是經過兩個通道彼此交互作用後產生的極化訊號，其光訊號功率表現也依然有此現象發生。本實驗所使用的光可調濾波器，其工作波段範圍為 1530 nm 至 1570 nm，光可調濾波器的增益效果為水平，本次實驗所測量波段範圍為 1530 nm 到 1537 nm，依舊在光可調濾波器其作用有效範圍內，故光訊號功率能量並非是被光可調濾波器衰減的緣故。

四、總結

本實驗研究證明如下：(1) 兩個左旋極化光波長範圍設定從 1530.16 nm 到 1534.04 nm，且傳輸在相同的光路徑後被多工混合，由實驗指出，從極化分析儀分析後結果主要為左旋極化，然而卻測出部分的輸出訊號為右旋極化；兩個右旋極化光波長範圍設定從 1535.06 nm 到 1536.09 nm，經相同實驗步驟，輸出結果完全為右旋極化。(2) 兩通道進行多工混合輸出之極化度，極化狀態主要是受正規化 Stokes 參數中的 s_3 所影響最為明顯。(3) 經由兩

極化訊號波長多工混合輸出後，輸出光功率下降則輸出訊號的極化度增加，觀測到極化度和光功率之間有相當密切的反比關係。

參考文獻

1. D. K. Mynbaev and L. L. Scheiner, *Fiber-Optic Communications Technology*, New Jersey: Prentice-Hall, 538 (2001).
2. C. A. Bennett, *Principles of PHYSICAL OPTICS*, New York: John Wiley & Sons, 431 (2008).
3. 許招墉, 物理光學, 初版, 臺北市: 俊傑, 260 (2002)
4. 廖顯奎, 光纖通訊, 初版, 臺北市: 湯姆生, 81 (2005).
5. S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics Principles and Practices*, NJ: Prentice Hall, 75 (2006).
6. 林才郡, 研究從放大自發輻射萃取光信號的極化狀態, 高苑科技大學電子工程所 (2012).
7. R. Hui and M. O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*, Amsterdam Boston: Academic Press/Elsevier, 190 (2009).



陳吳奇先生為美國德州大學材料科學與工程博士，現任高苑科技大學電子工程系助理教授。

Wu-Chi Chen received his Ph.D. in materials science and engineering from the University of Texas at Arlington, USA. He is currently an assistant professor in the Department of Electronic Engineering at Kao Yuan University.



余彥駿先生為高苑科技大學電子工程所碩士班學生

Yen-Chun Yu is currently a graduate student in the Department of Engineering at Kao Yuan University.