

第一章 緒論

全像光學元件(holographic optical elements, HOEs)係利用現代令人所熟知的『全像術(holography)[1-6]』製作的，後者為 Dennis Gabor[7]於西元 1948 年所提出，Gabor 稱之為『波前重建法(wavefront reconstruction)』，其原理是利用同調(coherence)參考光與物體表面散射光的干涉(interference)結果，將光訊號中的振幅(amplitude)與相位(phase)同時在特殊的感光材料上做記錄，透過該感光材料上的干涉圖樣，以當初曝光時相同於參考光的重建光以相同條件入射，便可重建出物體之原始影像，與一般相片不同的地方是，該元件在重建時將重現當初所記錄的物體表面散射光的相位，因此，該元件通稱為『全像片(hologram)』。



目前許多全像光學元件的設計與應用已被廣泛地發表[8-15]。但是，隨著光電科技的發展與產業的更替，全像光學元件為了符合目前高精密度的光學元件上的訴求，元件操作之規格需更為嚴謹，因此，在這之前未被前人解決的問題便開始被討論：提升全像元件的極限效能，而此問題則必須從全像感光材料之物理、化學等方面著手。在物理性質方面，必須克服感光乳劑在經過曝光顯影程序中，所產生的膨脹收縮效應[16,17]、材料的色散性質[17]、環境溫度擾動[18]的影響等問題；在化學性質方面，則必須改進全像感光材料[19-25]之化學機制與特性，這些將會反應在增加調制折射率強度、增加材料的感光靈敏度及感光波長範圍、提高光柵條紋之解析度(high resolution capability)、降低材料散射(scattering)和吸收(absorption)之損耗、材料對環境之抵抗力(resistance to environmental changes)等方面上。此外，由於全像光學元件之設計，主要乃基於 H. Kogelnik 之耦合波理論(couple-wave theory)[26]，此理論早在 1969 年便已被提出，經過多年的研究與發展，全像光學元件的研究已臻於相當成熟的階段，這意味著全像光學元

件運用在單一元件時期已宣告結束；在這之後的全像光學元件研究，除了要解決前述在物理性質、化學性質上的問題之外，需朝系統模組之應用發展或尋求新的應用領域。

本論文之研究重點，主要是利用經由特殊曝光條件下，製作出具偏極選擇能力的全像光學元件，利用該元件所設計出的模組，可針對現有的雙向光纖通訊系統[27]模組做改良；在針對提升現有已被鋪設的光纖系統來說，雙向光纖通訊系統一直是個有效提升傳輸資訊量的方式，因此，本研究將之前本實驗室所設計之光學循環器[28]的經驗做基礎，製作出具備多埠循環能力之光學循環器，該設計具有偏極獨立、密集、高隔離、低偏極模色散和易於製作等優點。此外，埠的數目可容易的被增加。

然而，光電元件技術日益成熟及通訊技術蓬勃發展，伴隨著網際網路及資訊科技的蓬勃發展，人們對於高速數據、視訊、多媒體的通訊服務需求極為迫切，具有高速傳輸速率、遠距離、超高容量、應用與服務領域廣的特性的光纖通訊系統的發展也因此有迫切的需求。但是在一個傳統的單向光纖環型網路中，在同一條光纖中所有光訊號傳送方向是一致的，相反方向的訊號傳輸則需要配置另一條光纖來達成，因此目前有許多學者逐漸考慮將既有的單向光纖網路，升級為同時具有雙向傳輸能力的雙向光纖網路。而對於現今的雙向傳輸系統，現階段的設計往往都是利用單向的光學循環器作延伸應用，如 Fig. 1.1(a) 所示，將兩組 circulators 以及兩組 EDFAs 加入環形光纖系統[29]中，但是這個架構仍然存在著震盪問題[30]；而針對此問題的改進方式如 Fig. 1.1(b)所示的雙向光學獨立器(isolator)架構，該架構利用了光學獨立器中，訊號有不可逆的傳輸特性，可同時阻絕 eastbound 訊號的反射光進入 westbound，以及阻絕 westbound 的反射訊號進入 eastbound，並可防止雙向光放大器中的震盪，以及發生在模組內部中的零件上的缺陷或接合不良所產生的局部性反射，與 Rayleigh 漫射所產生的發散性反射[31,32]。

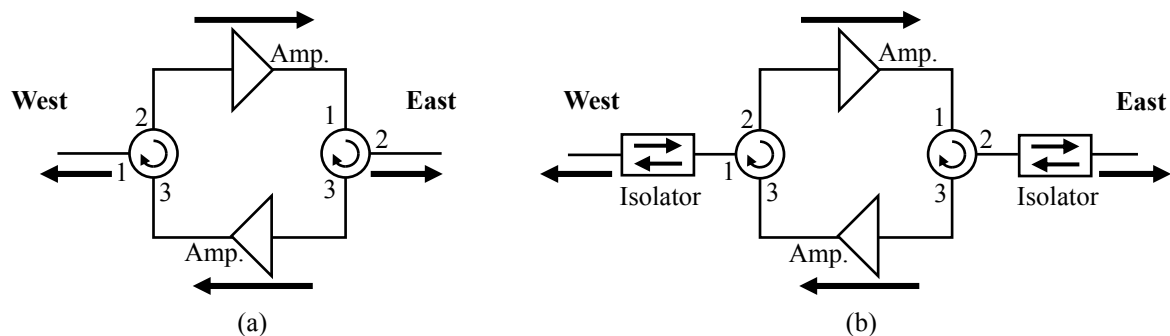


Fig. 1.1 (a)現存的雙向波長分隔傳輸的架構輔以光纖放大器來實現，(b)加入雙向光學獨立器的架構。

總結以上來看，雙向網路普及主要的阻礙，是因為防止背反射的末端需求以及對應的被動光學元件缺乏，若是雙向通訊網路元件中，能提出一個雙向波長交織之光學循環器，並將該技術運用在雙向光纖通訊網路上，可以減輕這些問題，如元件的背反射可利用波長交織的方式，使同一頻道上的訊號僅在 Fig. 1.1 的架構之中成為單向傳輸，使反射光隔絕，更可以減少光學循環器至一個，且其 isolation level (單向或雙向)的變化運用以及位置能更有助於網路架構的設計以及整體成本的降低。因此，本研究將原單向光學循環器改良，設計出偏極獨立的波長交織雙向光學(準)循環器，該循環器擁有具有密集、偏極獨立、低偏極模色散、高獨立性、和易於製作等優點，且埠的數目可容易的被增加。

本論文共分七個章節；本章節為緒論，描述全像術的歷史，以及相關發展。

在第二章的內容中，首先先介紹了全像光學元件的特性，以及該元件的應用，同時也介紹了穿透式體積型全像光學元件的在製作時，需要考慮的種種條件，包含計算拍攝光柵條件與繞射效率所使用的耦合波理論，以及在用於長波長使用波段時，全像元件在製作時所用的短波長拍攝長波長重建的技術等。最後，並介紹在本論文中廣泛地被運用在設計光學循環器的全像光學元件——全像空間偏離偏極器，該元件係利用耦合波理論所推導出的特殊曝光條件，所得到的具偏極選擇性的全像光柵，配合基片型全像片的架

構而成，具有高繞射效率、輕薄、易於大量複製、成本低廉等優點。

在第三章中，將介紹傳統的光學循環器之架構與操作原理，同時也介紹傳統光學循環器的應用與相關參數；進一步地，藉由第二章中所製作的元件，提出將傳統的光學循環器改良為兩種多埠光學準循環器。所提到的二種循環器分別運用了以全像偏離偏極器所製作出的二維與三維空間偏離偏極模組，其操作原理以及效能在該章中有詳盡的描述；此外，亦同時討論了在改善製作條件下，兩種模組所改善的效能變化；此多埠光學循環器皆具有密集、獨立、低成本、易於製作等優點，且埠的數目更可隨使用者需求輕易地被增減，而三維多埠光學循環器更是二維多埠光學循環器之改良設計，除了原有的優點外，更改善了每個輸入訊號的兩種偏極分量皆擁有相同的光程，並減少了模組中偏極分光鏡與反射稜鏡的數目。



在第四章中將介紹一種群組濾波的方式，稱為『波長交織術』，該技術可將傳輸訊號以特殊的波長間隔做基準，將一連串的訊號切割為 odd-channel 與 even-channel 兩部份，或是將兩組訊號合併為一組週期更為密集的訊號群組。同時，在本章中也介紹具有波長交織能力的 Lyot-Öhman 濾波器的架構與特性，該光學濾波器的特性，能將 DWDM 訊號在符合國際通訊聯盟(International Telecommunication Union, ITU)的規格下，針對現有的光纖通訊規格，使穿透濾波器的訊號中 even-channel 以及 odd-channel 訊號個別地做偏極轉換，藉以分隔兩種不同的訊號作處理，同時，本章中也討論了該濾波器以及波長交織術相關的參數。

在第五章中，利用全像偏極選擇元件組成的三維全像空間偏極模組以及 Lyot-Öhman 濾波器，設計出一具有雙向循環能力的四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器，其模組架構與特性在該章中有詳盡的解釋。為驗證其可行性，適用於波長 1550nm 之四埠雙向光學循環器模組在實驗中組裝，並討論此模組之效能及改進效能之方案。此設計具有

密集、偏極獨立、低偏極模色散、高獨立性等優點。

第六章中，根據第三章中的多埠循環器設計，以及第五章中的雙向波長交織循環器的概念，進一步地著手發展出多埠雙向光學準循環器，其組成係利用數個全像空間偏極模組、一組全像空間偏離偏極器、一個四分之一波片、一個面鏡，以及一組 Lyot-Öhman 濾波器所組成，其中，全像空間偏極模組由一片全像空間偏離偏極器、一片二分之一波片，以及一片薄玻璃片所組成。由於設計的理念改變，所以該模組的架構較四埠雙向光學循環器簡單許多，且具有更佳的隔離值。為驗證其可行性，適用於波長 1550nm 之 5 埠雙向光學循環器模組在此被組裝。此外亦討論了此元件之操作原理及效能。此設計具有密集、偏極獨立、低偏極模色散、高獨立性等優點，且埠數可隨使用系統的需求輕易地擴充。

第七章為本論文的結論，針對本論文之內容做一總結。

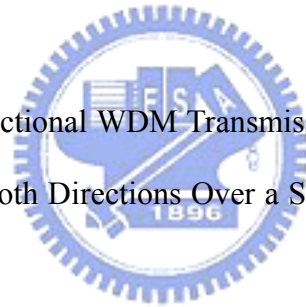


參考文獻

- [1] D. Falk, D. Brill and D. G. Stork, *Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography*, New York: Wiley-Intersci.; Wiley (1985).
- [2] P. C. Mehta and V. V. Rampal, *Lasers and holography*, World Scientific (1993).
- [3] R. R. A. Syms, *Practical Volume Holography*, Clarendon Press (1995).
- [4] P. Hariharan, *Optical Holography*, second edition, Cambridge University Press (1996).
- [5] L. Solymar and D. J. Cooke, *Volume Holography and Volume Gratings*, Academic Press (1997).
- [6] A. Rhody and F. Ross, *Holography marketplace*, Ross Books, 8th ed. Chap.1-Chap.4 (1999).
- [7] D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature* **161**, 777-778 (1948).
- [8] Y. Amitai, "Design of wavelength-division multiplexing/demultiplexing using substrate-mode holographic elements," *Opt. Commun.* **98**, 24-28 (1993).
- [9] Y. K. Tsai, Y. T. Huang, and D. C. Su, "A reflection-type substrate-mode grating structure for wavelength-division-multi/demultiplexing," *Optik* **97**, 62-66 (1994).
- [10] Y. K. Tsai, Y. T. Huang, and D. C. Su, "Multiband wavelength-division demultiplexing with a cascaded substrate-mode grating structure," *Appl. Opt.* **34**, 5582-5588 (1995).
- [11] J. T. Chang, D. C. Su, and Y. T. Huang, "A Four channel polarization and wavelength separation element using substrate-mode stacked holograms," *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3537-3539 (1996).
- [12] J. T. Chang, D. C. Su, and Y. T. Huang, "A wavelength and polarization selector made of holographic polarization beamsplitting," *Appl. Phys. Lett.* **70**, 1805-1807 (1997).
- [13] D. C. Su, J. T. Chang, and Y. T. Huang, "1-to-NxN optical fanout module for optical interconnects," *J. Opt.* **28**, 70-73 (1997).

- [14] J. Liu and R. T. Chen, "Path-reversed substrate-guided-wave optical interconnects for wavelength-division demultiplexing," *Appl. Opt.* **38**, 3046-3052 (1999).
- [15] R. Shechter, Y. Amitai, and A. A. Friesem, "Compact beam expander with linear gratings," *Appl. Opt.* **41**, 1236-1240 (2002).
- [16] U. S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, and J. Shamir, "Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer," *Appl. Opt.* **34**, 846-853 (1995).
- [17] J. M. Kim et al., "Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part-I. Transmission holographic optical elements," *Appl. Opt.* **40**, 622-632 (2001).
- [18] J. Qiao et al., "Athermalized low-loss echelle-grating-based multimode dense wavelength division demultiplexer," *Appl. Opt.* **41**, 6567-6575 (2002).
- [19] H. I. Bjelkhagen, *Silver-halide recording materials*, Springer, 2nd ed. Chap. 4 (1995).
- [20] R. K. Kostuk and J. W. Goodman, "Refractive index modulation mechanism in bleached silver-halide holograms," *Appl. Opt.* **30**, 369-371 (1991).
- [21] S. Piazzolla and B. K. Jenkins, "Holographic grating formation in photopolymers," *Opt. Lett.* **21**, 1075-1077 (1996).
- [22] S. Piazzolla and B. K. Jenkins, "Dynamic during holographic exposure in photopolymers for single and multiplexed gratings," *J. Modern Opt.* **46**, 2079-2110 (1999).
- [23] T. A. Shankoff, "Phase holograms in dichromated gelatin," *Appl. Opt.* **7**, 2101-2105 (1968).
- [24] L. H. Lin, "Hologram formation in hardened dichromated gelatin films," *Appl. Opt.* **8**, 963-966 (1969).
- [25] B. J. Chang and C. D. Leonard, "Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements," *Appl. Opt.* **18**, 2407-2417 (1979).
- [26] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Sys. Tech. J.* **48**, 2909-2947 (1969).

- [27] J. Hecht, *Understanding fiber optics*, Prentice Hall, New Jersey, 4th ed., Chap. 14 (2002).
- [28] J. H. Chen, D. C. Su, and J. C. Su, "Holographic spatial walk-off polarizer and its application to a 4-port polarization-independent optical circulator," *Opt. Express*, **11**, 2001-2006 (2003).
- [29] A. V. Tran, C. J. Chae, and R. S. Tucker, "A bidirectional optical add-drop multiplexer with gain using multiport circulators, fiber Bragg gratings, and a single unidirectional optical amplifier," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15**, 975-977 (2000).
- [30] P. C. Becker, N. A. Olson, and J. R. Simpson, *Erbium Doped Fiber Aiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. New York: Academic, 277-280 (1997).
- [31] K. Tai, B. Chang, J. Chen, H. Mao, T. Ducellier, J. Xie, L. Mao, and J. Wheeldon, "Wavelength-interleaving bidirectional circulators," *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **13**, 320-322 (2001).
- [32] H. Obara and et al. "Bidirectional WDM Transmission Technique Utilizing Two Identical Sets of Wavelengths for Both Directions Over a Single Fiber," *J. Lightwave Technol.* **25**, 297-304 (2007).



第二章 全像光學元件

2.1 前言

傳統的光學元件，在製作上需要拋光研磨等等步驟製作，各步驟皆需要良好的高精密度，方可大量地製作出相同的成品，但源自於全像術的全像光學元件不同於傳統光學元件，製作一個全像光學元件僅需調校好所需要的曝光條件，即可簡單地複製相同的元件，在成本反應上屬於非常廉價的高效能光學元件；其製作原理是利用拍攝全像片時，對入射光束調制，使紀錄下干涉條紋的全像光柵能符合所需要的光學元件功能。在本章中，便是討論該元件的特性，並利用此特性製作出在後面的設計中所需使用之元件。

2.2 特性與應用



『體積型全像光學元件』在實際上即為一種布拉格(Bragg)繞射光柵[1,2]，為對波長變化靈敏之光學元件，基本上，全像光學元件通常具有下列幾點特性：

- (1) 全像光學元件的製作以及複製程序都相當容易，其製作方式是利用光學干涉圖樣透過光學系統，使其成像在全像感光底片或是全像晶體之中，再經過沖洗、定影、漂白等而成；或是經由電腦計算、繪圖、微縮成影、蝕刻而成，不同於傳統光學元件，需以切割、研磨、拋光等程序製作，全像光學元件在製作上，比起傳統光學元件就顯得簡便且省時，且在複製程序上更是後者所望塵莫及。
- (2) 一般全像光學元件皆使用體積型相位光柵來製作，這是因為體積型相位光柵本身具有高繞射效率並兼具能量損耗低等特性。體積型相位光柵通常被簡稱為體積型全像片(volume hologram)，其架構如 Fig. 2.1 所示，該元件的組成為感光乳劑層與高透光性的基板。感光乳劑的厚度一般介於數微米至數十微米之間，因此整體來說，全像光學元件在體積上比一般的傳統光學元件更為輕薄；而常見的基板材料一般為玻璃

或塑膠等材質，此外，一個感光基板亦可同時紀錄數個全像光學元件以因應特殊需求，因此本元件亦具有質輕、穩固，且結構簡單密集(monolithic compact structure)之優點。

- (3) 體積型全像片依繞射光的出射方向，可分為穿透式和反射式兩種類型。當入射光和繞射光分別位於全像光柵的兩邊，如 Fig. 2.2(a)所示者，稱之為穿透式體積型全像片(volume transmission hologram)；反之，若是當入射光和繞射光位於全像光柵同一邊，如 Fig. 2.2(b)所示者，稱為反射式體積型全像片(volume reflection hologram)。

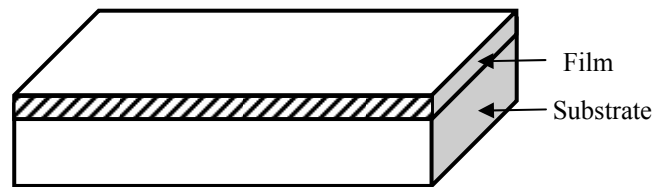
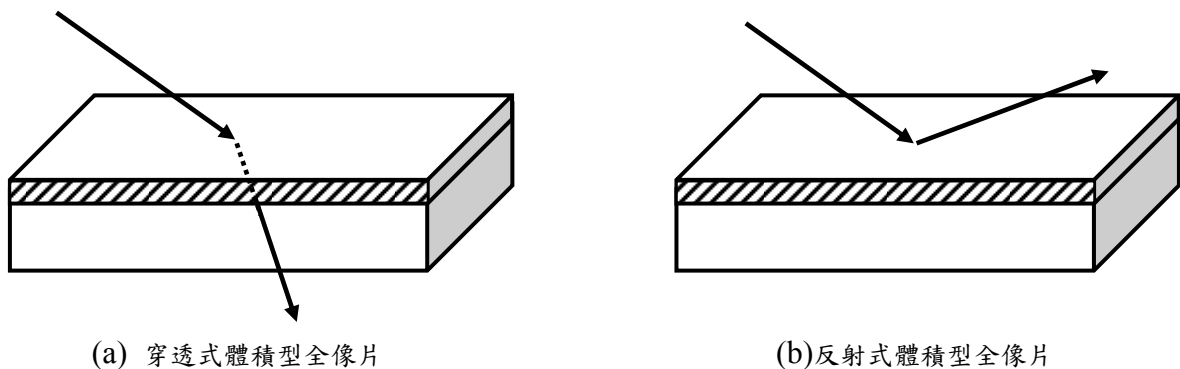


Fig. 2.1 體積型全像片結構。



(a) 穿透式體積型全像片

(b) 反射式體積型全像片

Fig. 2.2 穿透式和反射式體積型全像片。

(4) 與一般傳統光學元件(conventional optical element, COE)相比較，全像光學元件除了能保有相同的光學性質以外，體積較傳統光學元件要來得更輕薄短小，在 Fig. 2.3(a)、(b)和(c)中，為繞射式全像光學元件與傳統光學元件的比較，除了單一功能的光學元件外，全像光學元件更可以將具有複合性質的光學功能同時紀錄於同一全像元件上。且使用體積型全像片所製作之全像光學元件，具有高繞射效率、大光學孔徑(large optical aperture)等優點。

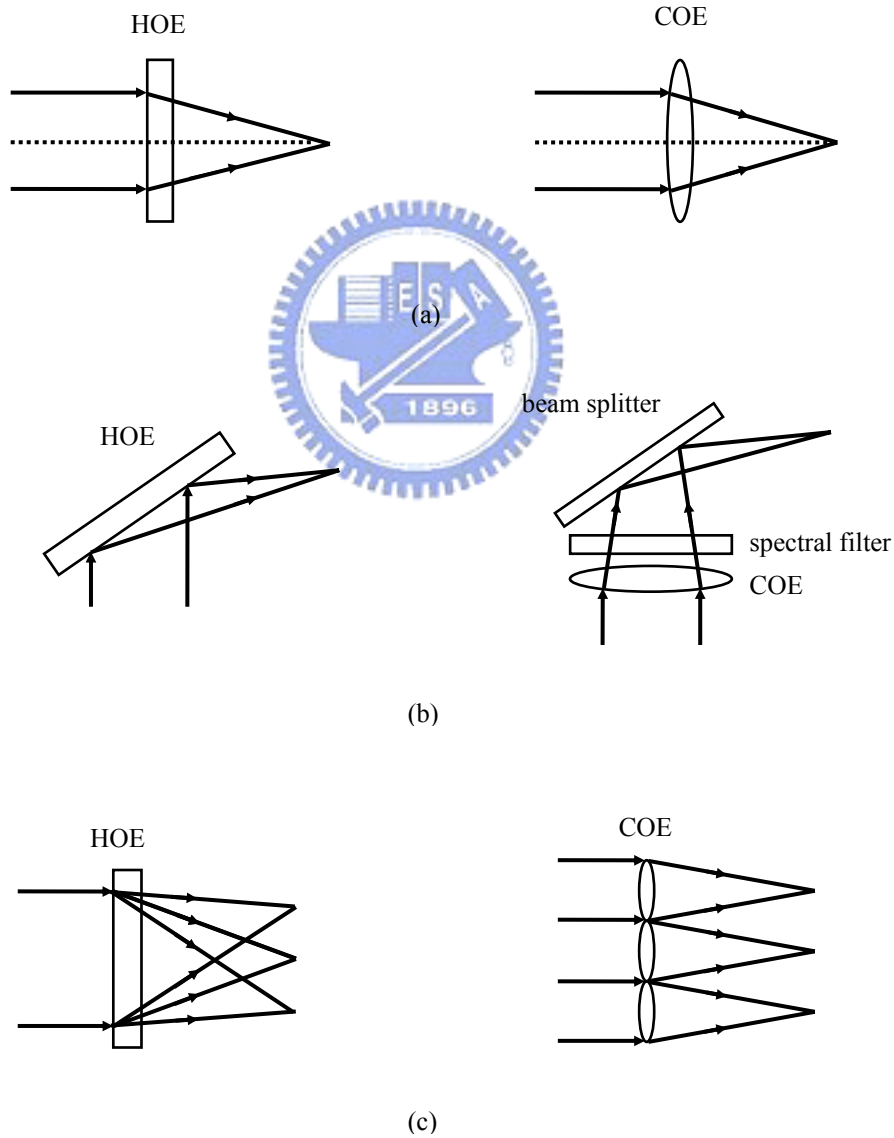


Fig. 2.3 全像光學元件與傳統光學元件的特性比較。

- (5) 體積型光學元件可利用全像光柵的各種參數條件[1]，調整製作時的曝光條件，如角度、波長、曝光量等，可製作出具有分光、偏極選擇或波長選擇等功能的各種全像光學元件。如 Fig. 2.4 所示，輸入的訊號光可在基板內，利用全像光學元件的特性將繞射光以全內反射(total internal reflection, TIR)之方式，在基板內部作無損傳輸[3]。而具有該傳輸特性的全像光學元件，通稱為基片型全像光學元件(substrate-mode holographic optical element)。由於平面化構形且兼具平行輸出/入、輕薄、易於對光耦合、易於與前/後端的光學系統結合等優點，因此被許多光學連結及傳輸設計上被廣泛地使用[4,5]。
- (6) 一般用於長波長的光學系統中，如光纖通訊系統(使用波長範圍在 1300nm 或 1550nm 附近)時，因全像材料的曝光波長被限定，故體積型全像光學元件可使用短波長拍攝長波長重建技術製作，該技術為利用耦合波理論[1]中 K-向量圖(K-vector diagram)的幾何關係，因此單一波長感光材料仍可針對不同的使用波段，製作出對應該波段的全像光學元件。

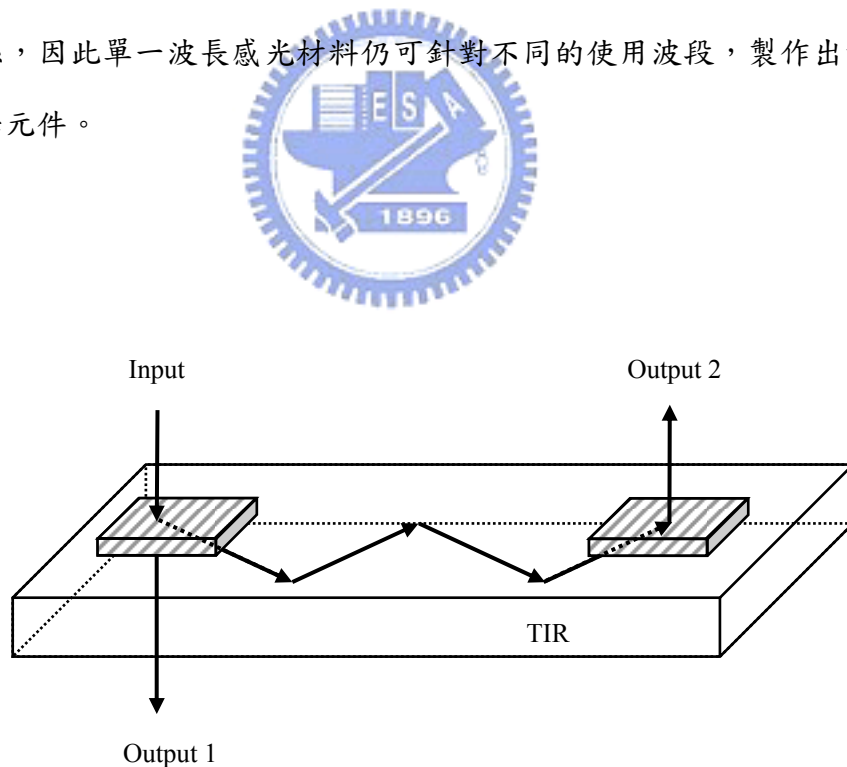


Fig. 2.4 基片型全像光學元件。

(7) 以全像技術製作光子晶體[6-8]，較傳統的固態物理方法來得簡單和便宜。此法視理想的體積型全像片為一光子晶體來計算其光子能隙之結構，在嚴謹的週期 (strict period) 條件下，可以成功的解釋所有體積型全像片的特性，該週期長度 (另稱晶格長度) 與所考慮的光波長相比為相同數量級時，可使所考慮的光波長產生強散射效應 (Strong scattering effect)，這時，會產生光子能隙 (Photonic bandgaps)，而符合光子能隙的光子波長或頻率，會無法在此光子晶體內部傳播，而被反射或是繞射。

2.3 耦合波理論[1]

分析一個全像片的效率相當地複雜，但是，以針對研製體積型相位式全像片而言，H. Kogelnik 在 1969 年所提出的耦合波理論在目前仍為最有效的分析工具，此理論以 Maxwell 波動方程式在幾個物理假設的條件下，推論出適用於穿透式及反射式體積型相位式全像光柵的平面波繞射效率的理論值。在耦合波理論中，全像片可分為『穿透式』以及『反射式』兩種類型來做分析，本文中所使用的全像元件皆屬於穿透式，故在此僅針對穿透式體積型相位全像片之原理分析。

一個穿透式體積型相位全像片的繞射效率 η ，如 Fig. 2.1，在鄰近 Bragg 條件下可表示為：

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + \xi^2 / \nu^2}, \quad (2-1)$$

其中，針對兩種不同型態的偏極光

$$\nu = \nu_s = \frac{\pi n_1 d}{\lambda_r (\cos \theta_1 \cos \theta_2)^{1/2}} \quad (\text{for s-polarization}), \quad (2-2a)$$

$$\nu = \nu_p = \nu_s \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{for p-polarization}), \quad (2-2b)$$

其中，下標 s 和 p 分別表示對應在 s 偏光與 p 偏光偏極光下的參數， ν 為耦合係數(coupling coefficient)， λ_r 為重建光波長， d 為光柵厚度， n_1 為調制折射率振幅， θ_1 和 θ_2 分別為穿透式體積型全像片中重建光與繞射光之角度，在(2.1)式中， ξ 為失調因子(detuning factor)，在此被定義為

$$\xi = \frac{-\Delta\lambda K^2 d}{8\pi m \cos \theta_2}, \quad (2-3)$$

上式中， $\Delta\lambda$ 為重建光 λ_r 之中心波長偏移量， K 為光柵向量模數。若式中的偏移量為 0，亦即 $\xi = 0$ ，可將方程式(2-1)簡化為下式：

$$\eta = \sin^2 \nu. \quad (2-4)$$

利用上式中的結果與各參數的對應關係，可將之用以有效分析全像光柵的特性，藉以獲得所要求的全像元件效能和製作元件時的最佳曝光參數；因此，利用方程式(2-1)，代入不同感光材料厚度 d 、重建波長 λ_r 、以及 θ_1 和 θ_2 的條件時，穿透式之繞射效率 η 與調制折射率振幅 n_1 的關係可藉此被估算出。而該結果可了解繞射效率與調制折射率的關係，進而設計出針對 s 偏光與 p 偏光各有不同繞射效率的偏光選擇元件，或是僅滿足某一特殊繞射效率的繞射元件。

2.4 短波長拍攝長波長重建技術[9]

在前面小節中已提到，藉由體積型全像片必符合 Bragg 條件的情形下，可以利用耦合波理論之 K-向量圖的幾何關係，來設計拍攝與重建全像光柵之 Bragg 條件。同理可得，若使用的波段與材料的感光波段皆已被決定，且兩波段並不不同的情況下，利用 K-向量圖中的幾何關係反向推衍，亦可計算出為了重建時仍能符合全像光柵的 Bragg 條

件度，在拍攝時幾何架構的角度關係；此技術可避免拍攝波長超出人眼辨識範圍，因此亦利於拍攝幾何架構的建立，並能解決感光材料在長波段(如通訊用波段)不易感光的問題。

Fig. 2.5 中為不考慮乳劑收縮和平均折射率改變的影響之下，使用『短波長拍攝長波長重建』的 K-向量幾何關係。 \mathbf{K}_{C1} 與 \mathbf{K}_{C2} 分別為記錄全像光柵的參考光與物體光的傳播波向量(propagation vector)，而所記錄之全像光柵的波向量為 \mathbf{K} ，而 \mathbf{K}_{r1} 、 \mathbf{K}_{r2} 則分別為重建時，參考光與繞射物體光的傳播波向量。假設重建光波長為 632.8 nm 且以垂直入射，而所需要的繞射角度 $\theta_d=45^\circ$ ，利用前述條件並使用 K-向量圖的幾何關係，可以反推得於波長 441.6 nm 曝光時，參考光與物體光的角度 θ_{C1} 、 θ_{C2} 分別為 7° 與 38° 。此外亦可推算出，在固定角度下使用不同波長拍製全像片，短波長將具有較密的光柵條紋；對於固定的光柵向量以不同波長重建，長波長將具有較大的繞射角。

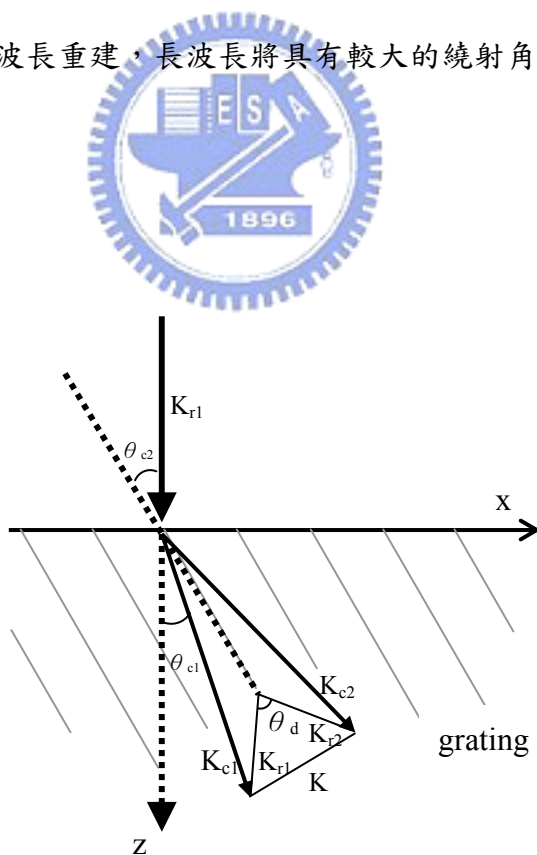


Fig. 2.5 短波長拍攝長波長重建的 K-向量幾何關係圖形。

2.5 全像空間偏離偏極器

在光學循環器中，空間偏離偏極器(spatial walk-off polarizers, SWPs)[10-16](或稱為 beam displacer)是一個相當重要的元件，一個常見的 YVO_4 (Yttrium vanadate)晶體所製的空間偏離偏極器操作如 Fig. 2.6 所示，一道非偏極入射光在通過 YVO_4 晶體後，可將兩偏極分量相互垂直的出射光，以距離 d 的偏移量平行分離。常見的空間偏離偏極器一般都以雙折射晶體(birefringence crystal)[17]或是以多層高/低折射率介質鍍膜法(multi-layer high/low-index materials)[16]所製作。然而，對於雙折射晶體而言，市面上常見的材料除了 YVO_4 外，尚有 $\alpha\text{-BBO}$ (BaB_2O_4)、 LiNbO_3 ，以及 TiO_2 等晶體，皆面臨著高光學品質、長晶技術以及光學加工技術等難關，且該型空間偏離偏極器經常受限在偏極分光角的不足，導致必須在厚度以及分光距離之間做取捨，因此往往在要求密集、輕薄的設計需求時無法使用，僅能應用在較大體積的設計上。

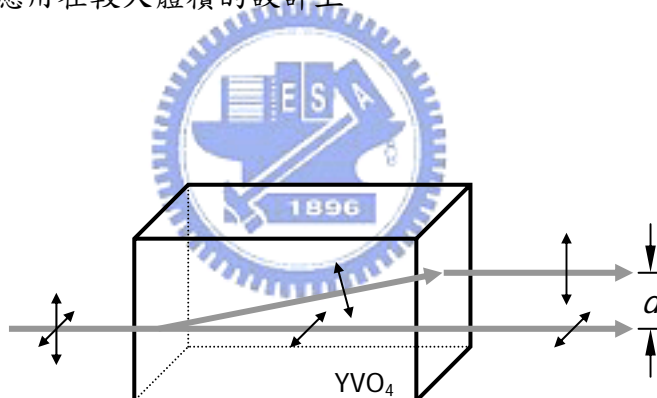


Fig. 2.6 YVO_4 (Yttrium vanadate)晶體式空間偏離偏極器

在前面的章節中提到，體積型全像片擁有高繞射效率、製作簡易、成本低廉等優點，因此經常使用在光通訊領域的元件設計上[18-20]。本小節中，將介紹一全像空間偏離偏極器(holographic spatial walk-off polarizers, HSWPs)，該元件係利用耦合波理論中，針對特殊角度下所產生的偏極選擇條件來製作，具有平面化構形、平行輸出/入、不佔空間、易於對光耦合以及與前/後端的光學系統密集結合等優點。

2.5.1 設計與原理

在 Fig. 2.7 中為一個 HSWP 的架構，HSWP 為基片型體積全像片利用特殊角度所構成，其構造相當簡單，包含玻璃基板以及覆蓋在上的全像光柵薄膜。如 Fig. 2.7 所示，當一非偏極光由 A 點垂直入射至 HSWP 中，此入射光的 s-或 p-偏極光其中之一的分量將直接穿透光柵和基板，隨後依原入射方向前進；而另一偏極光分量經過全像光柵時將被光柵完全繞射，在光柵內以角度 θ_d 入射至玻璃基板內，在玻璃基板內以 θ_d' 向 B 點入射，此角度被設計成大於基板-空氣介面的全內反射角，所以該偏極光經過 B 點將產生全內反射(total internal reflection)，而被反射至圖中 C 點處；在 C 點處，將再度產生全內反射，由於經過全內反射的反射光角度符合 A 點處的繞射角度 θ_d ，故符合光柵之 Bragg 條件，於是在 C 點處之繞射光方向，將會平行於最初位於 A 點處的入射光方向，Fig. 2.7 中左上圓內表示的即為 C 點處的繞射細節。本元件亦可反向操作，如 Fig. 2.7 中灰色線條所示，可使兩道互相垂直的偏極光，經由反向輸入後被 HSWP 結合。AC 兩點的距離 T ，可經由幾何關係被光柵繞射角 θ_d' 以及元件厚度 t 來決定。

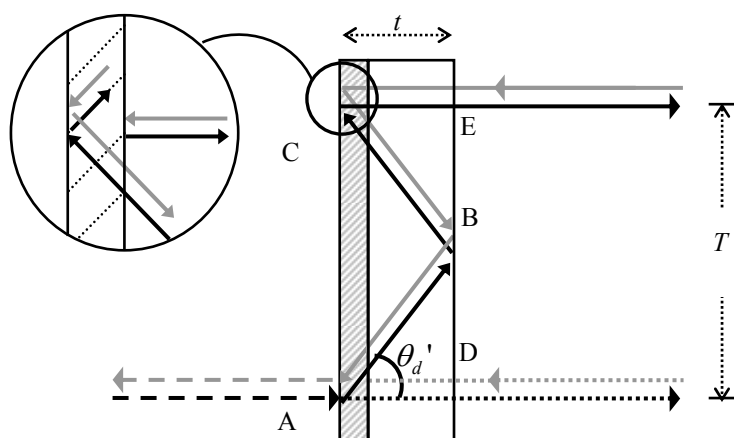


Fig. 2.7 全像空間偏離偏極器。

2.5.2 偏極選擇條件

根據耦合波理論所得的繞射效率公式，加上前面所討論的 HSWPs 的架構，針對垂直入射(入射光角度為 0)的條件下，根據(2-1)式與(2-2)式，將 s-與 p-偏極光的繞射效率 η_s 、 η_p 可分別簡化如下列兩式：

$$\eta_s = \sin^2 \left[\frac{\pi n_1 d}{\lambda_r} \frac{1}{(\cos \theta_d)^{1/2}} \right] = \sin^2 \nu_s, \quad (2-5)$$

和

$$\eta_p = \sin^2 \left[\frac{\pi n_1 d}{\lambda_r} \frac{1}{(\cos \theta_d)^{1/2}} \cos \theta_d \right] = \sin^2(\nu_s \cos \theta_d) = \sin^2 \nu_p. \quad (2-6)$$

其中， θ_d 為體積型相位光柵中之繞射角， n_1 為調制折射率振幅， d 為全像乳劑厚度，和 λ_r 為重建光波長。為了要能符合偏離偏極器的條件，全像光柵必須滿足 η_s 或 η_p 其中之一為 100%，且另一為 0% 之條件；根據方程式(2-5)和(2-6)，實際上 η_s 和 η_p 為原始週期 (primitive period) 相差 $\cos \theta_d$ 倍的兩個非同步震盪的正弦平方週期性函數，因此，滿足前述條件的相關參數設計可被計算出，其結果列於 Table 2.1。此特殊條件符合於兩個繞射角的情形下：(1) $\theta_d = 60^\circ$ 時，可得 $\eta_s = 0$ 且 $\eta_p = 100\%$ ；(2) 當 $\theta_d = 48.19^\circ$ 時，可得 $\eta_p = 0$ 且 $\eta_s = 100\%$ 。

Table 2.1 全像空間偏離偏極器之相關設計參數

ν_s	π	$3\pi/2$
ν_p	$\pi/2$	π
η_s	0	100%
η_p	100%	0
θ_d	$60^\circ(\cos^{-1}1/2)$	$48.19^\circ(\cos^{-1}2/3)$

2.5.3 記錄和重建

一般的全像紀錄材料，在經過曝光顯影程序後，將會面臨乳劑層收縮的問題，而此問題將導致所拍攝出的全像光柵偏斜，由 2.3 節中的耦合波理論可知，光柵偏斜所產生的一系列連鎖效應，將影響到繞射角度、繞射效率...等，有鑑於此，本實驗室在 2002 年提出藉由 K-向量圖的物理幾何關係，來修正厚度和折射率偏移的物理補償方法[21]，此法不限定在單曝光全像片上，亦可適用在多重曝光全像片上。同樣地，在面對 HSWPs 的製作過程中亦採用此法，以避免光柵之重建幾何偏斜的問題。

一個 HSWP 的光學記錄與重建架構如 Fig. 2.8 所示，Fig. 2.8(a)中為光學記錄架構：波長 λ_1 之兩準直平面波記錄光束 R_1 和 S_1 ，分別以 θ_{r1} 和 θ_{s1} 入射於記錄材料；記錄材料之組成包含折射率為 n_s 之基板，和折射率為 n_{f1} (在曝光波長 λ_1 下)之感光薄膜，厚度為 d_1 ，此二束光在感光薄膜內之折射角則分別為 θ'_{r1} 和 θ'_{s1} ，且干涉條紋間距為 Λ_1 。在經過曝光程序後，感光材料需進行化學顯影程序方可完成，此程序將使乳劑厚度收縮成為 d_2 ，如 Fig. 2.8(b)中所示，為曝光顯影程序導致乳劑層變化後，在重建時的幾何資訊，波長為 λ_r 的重建光 R_2 以入射於記錄材料 θ_{r2} ，而繞射光 S_2 以 θ_{s2} 由基板-空氣介面出射，兩道光在薄膜層之折射角分別為 θ'_{r2} 和 θ'_{s2} 。由於製作出的 HSWP 為垂直入射，故可視 $\theta_{r2} = 0^\circ$ ，因此，繞射光 S_2 在基板內的繞射角為 $\theta_{s2} = \sin^{-1}[\frac{n_{f2}}{n_s} \sin \theta_d]$ ；其中， n_s 和 n_{f2} 分別為處於波長 λ_r 下基板和顯影後的感光乳劑層(processed photographic emulsion)的折射率。

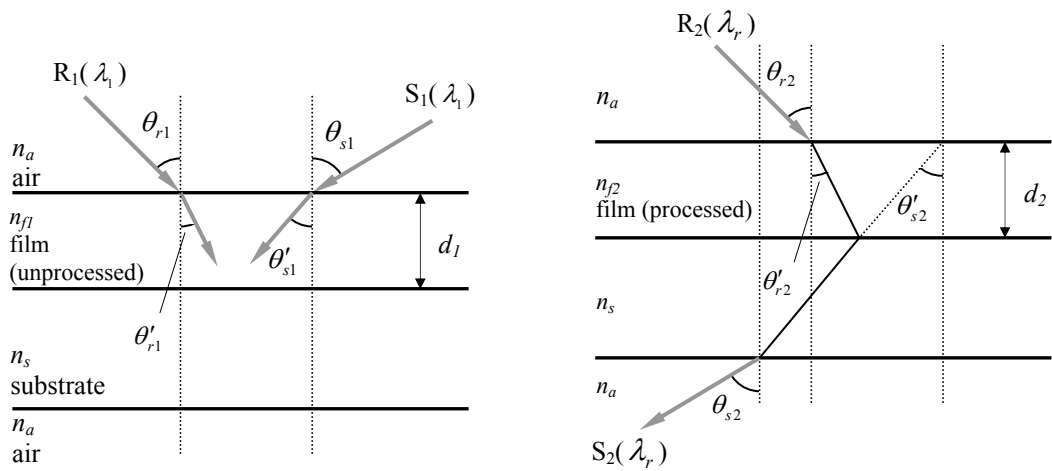


Fig. 2.8 穿透式體積型全像片(a)拍攝之幾何關係；(b)重建之幾何關係。

由於乳劑層收縮的影響，顯影程序前後的乳劑層厚度、干涉條紋間距和光柵條紋傾角之間的幾何關係，可從 Fig. 2.9 中得知，圖中下標 1 表示曝光顯影程序前的相關參數，下標 2 則表示曝光顯影程序後的參數。

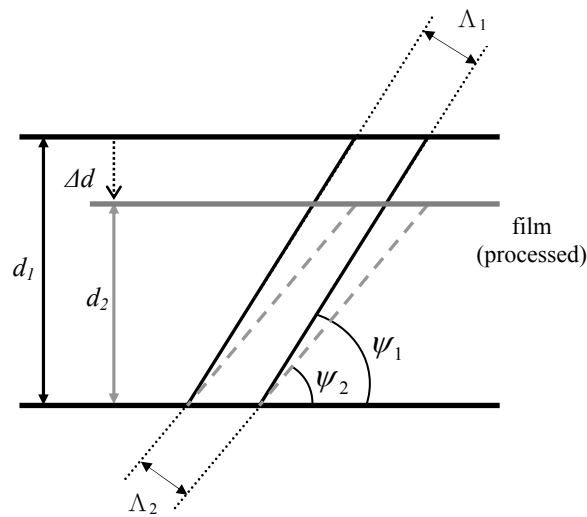


Fig. 2.9 感光記錄材料在曝光顯影前後之乳劑收縮示意圖。

為了滿足體積型全像片重建時之 Bragg 條件，故 θ'_{r1} 、 θ'_{s1} 、 θ'_{r2} 、 θ'_{s2} 需符合 Fig. 2.10 中的 K 向量圖，其中， K_1 為在顯影處理程序前的光柵向量，其大小為 $2\pi/\Lambda_1$ ，且位於半徑為 $2\pi n_{f1}/\lambda_1$ 之圓弧上； K_2 為經過顯影處理程序後的光柵向量，其大小為 $2\pi/\Lambda_2$ ，全像片的重建光波長為 λ_r ，因此 K_2 位於半徑為 $2\pi n_{f2}/\lambda_r$ 之另一圓弧上。

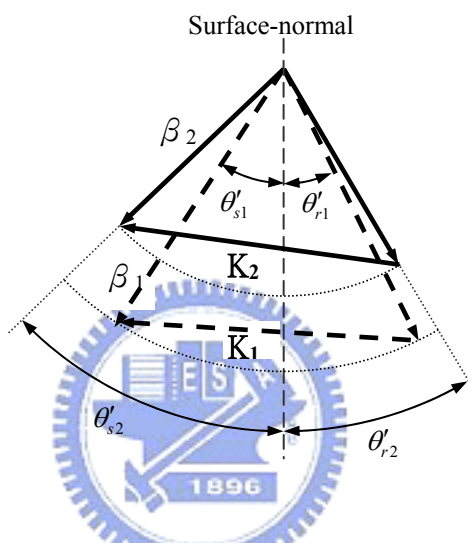


Fig. 2.10 穿透式體積型全像片補償修正之 K-向量圖

因此，適用於拍攝 HSWP 時，波長為 λ_1 的兩道光，由下列二式求得之入射角度 θ'_{r1} 、 θ'_{s1} ，可補償顯影程序後的乳劑收縮效應：

$$\theta'_{r1} = \frac{-\pi}{2} + \psi_1 + \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_1}{2n_{f1} \cdot \Lambda_1}\right), \quad (2-7a)$$

$$\theta'_{s1} = \frac{\pi}{2} - \psi_1 + \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_1}{2n_{f1} \cdot \Lambda_1}\right), \quad (2-7b)$$

其中，

$$\psi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{(-1) \cdot d_1}{d_2} \cdot \cot \left[\frac{1}{2} (\theta'_{r2} - \theta'_{s2}) \right] \right], \quad (2-8)$$

$$\Lambda_1 = \frac{\lambda_r \sin \psi_1}{n_{f2} (\sin \theta'_{r2} + \sin \theta'_{s2})}, \quad (2-9)$$

$$\theta'_{r2} = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_{f2}} \sin \theta_{r2} \right), \quad (2-10)$$

$$\theta'_{s2} = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_{f2}} \sin \theta_{s2} \right), \quad (2-11)$$

其中 n_a 為空氣折射率，實驗條件中的 n_a 、 n_{f1} 、 d_1 、 n_{f2} 、 d_2 、 θ_{r2} 和 θ_{s2} 皆為已知數值。拍攝全像片時，空氣中之入射角 (θ_{r1} 、 θ_{s1}) 可由 Snell's law 計算得到。



2.5.4 製造結果

為了驗證本設計之可行，研究中透過 2.4 節中所述之短波長拍攝長波長重建法以及 (2-7) 式中的曝光角度預補償設計方程式，來製作適用於中心波長 1550nm 之全像空間偏離偏極器，使用的感光材料為重鉻酸鉍明膠 (DCG)，拍攝光源使用波長 441.6nm 之 He-Cd 雷射，並根據 McCauley 等人所提方法 [22] 製備 DCG 感光記錄材料。由於一般 DCG 感光記錄材料，其調制折射率振幅 n_l 難以高於 0.08 的上限 [23]，因此，在滿足前述的全像繞射效率之理論值的前提下，感光材料的規格與條件 $d=17\mu\text{m}$ (Model: Dektak 3030TM, Veeco Instruments Inc., Sloan)、 $n_l < 0.08$ 、 $\theta_d > \theta_c$ ($\approx 41.8^\circ$) 和重建波長參數 $\lambda_r=1550\text{nm}$ 等代入方程式 (2-5) 和 (2-6)，以及 2.5.2 小節中的條件 (1)，得 $\theta_d = 60^\circ$ 和 $n_l=0.0645$ ，其中，繞射光在玻璃基板內的角度 θ'_d 為 58.7° (由 Snell's law 所得)。接著，研究中將實驗相關參數：曝光光源波長 $\lambda_l=441.6\text{nm}$ 、重建光波長 $\lambda_r=1550\text{nm}$ 、乳劑初始厚度 $d_l=22\mu\text{m}$ 、初

始折射率 $n_{l1}=1.44$ (at $\lambda_l=441.6\text{nm}$, Model: nkd-6000TM, *Aquila Instruments Lts.*)、顯影後已收縮的乳劑厚度 $d_2=17\mu\text{m}$ 、乳劑層折射率 $n_{l2}=1.48$ (at $\lambda_r=1550\text{nm}$)，和重建光入射角 $\theta_{r2}=0^\circ$ 和繞射角 $\theta_{s2}=58.7^\circ$ (即 $\theta_d = 60^\circ$) 分別代入方程式(2-7a)和(2-7b)中，得拍攝角分別為 $\theta_{r1}=12.26^\circ$ 和 $\theta_{s1}=34.11^\circ$ 。在經過光學曝光和化學顯影程序後，所製作出的全像空間偏離偏極器，於接近中心波長 1550nm 下，其繞射效率為 $\eta_s \cong 3\%$ 和 $\eta_p \cong 90\%$ ；而偏極分量相互垂直的二道平行出射光，其間距約等於 3.2 mm 。

2.6 討論

在實驗中所製作的全像空間偏離偏極器，由於並未有相當精密的溫度、溼度等控制，加上顯影程序中光學曝光以及化學顯影程序上的誤差，元件的效能並非與其理論值相同，所以調製折射率振幅 n_l 並不是我們計算出來的 0.064 ；在一個精密控制的實驗環境下，DCG 材料在實際上可接近理論值[24] $\eta_s \cong 0\%$ and $\eta_p \cong 100\%$ 。

由於該元件是設計應用在光纖通訊的規格上，操作的頻寬應謹慎的評估。在接近 Bragg 條件下，假設 K 為光柵向量 \vec{K} 之模數(magnitude)， $\Delta\lambda$ 為重建光之中心波長 λ_r 之偏移量，則此穿透式體積型相位全像光柵 s-和 p-偏極分量繞射效率可表示為

$$\eta_i = \frac{\sin^2(\sqrt{v_i^2 + \xi^2})}{(1 + \xi^2 / v_i^2)} \quad (i = s, p), \quad (2-12)$$

其中

$$\xi = \frac{-\Delta\lambda K^2 d}{8\pi n_{f2} \cos\theta_d}, \quad (2-13)$$

$$K = \left(\frac{4\pi n_{f2}}{\lambda_r}\right) \cdot \sin\frac{\theta_d}{2}. \quad (2-14)$$

如 Fig. 2.11 所示，為實驗相關參數 $n_f=0.064$ 、 $d=17\mu\text{m}$ 、 $\lambda_r=1550\text{nm}$ 、 $\theta_d=60^\circ$ 和 $n_{f2}=1.48$ (at $\lambda_r=1550\text{nm}$) 代入方程式(2-5)式、(2-6)式，可得此全像空間偏離偏極器之波長對繞射效率作圖的理論曲線，頻寬在 $\eta_p>90\%$ 時為 18nm，而在 $\eta_s\approx 0\%$ 的頻寬約由 1537nm~1563nm，相當於 C-band (1530nm-1565nm)的頻寬。同理，亦可製作適用於 1300nm 波段之元件。

此外，本空間偏離偏極器並未有抗反射鍍膜(Anti- Reflection Coating)降低表面的反射，故材料-空氣介面上有 4%的反射損耗，若能有品質良好的抗反射鍍膜，可減輕反射損耗至小於 0.1%，將更適用於商用規格的一些光學元件。

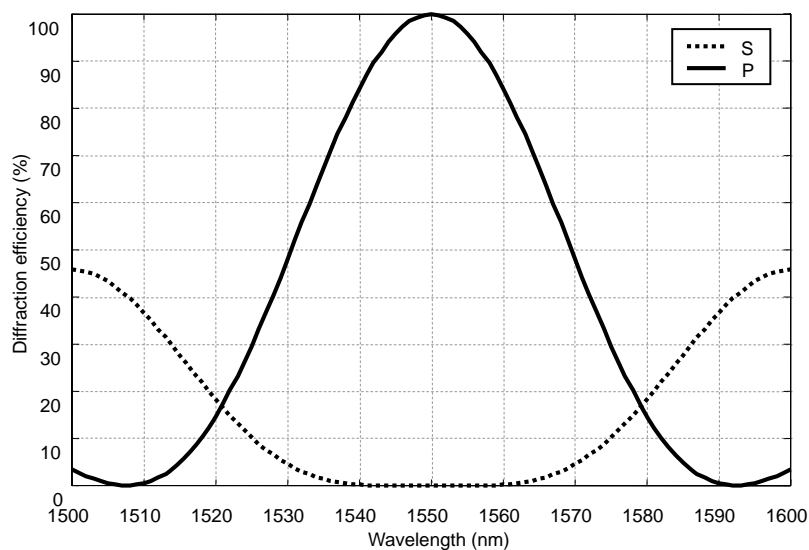


Fig. 2.11 全像空間偏離偏極器於中心工作波長 1550nm 之繞射效率。

2.7 小結

在本章中，討論了在耦合波理論下，穿透式體積型相位光柵之特性與原理，利用其理論的特殊條件，可製作出具有偏極選擇性的全像光學元件，本章中所介紹全像空間偏離偏極器的設計，則是利用其特殊條件所製作。為了驗證其可行性，根據耦合波理論之繞射效率公式設計此元件，並且為了防止曝光顯影程序產生的光柵偏斜誤差，在製作過程中也使用了在本實驗室曾發表過的全像片偏移預補償修正法，來製造用於通訊用波段，中心波長為 1550nm 之全像空間偏離偏極器，該全像光學元件使用重鉻酸鉍明膠 (dichromated gelatin, DCG) 為記錄材料，以波長 441.6nm 之 He-Cd 雷射曝光製作。製作所得之元件具有 60° 之大的偏極分光角，並且其 s-和 p-偏極分量之繞射效率分別為 3% 和 90%。此外，本章中亦討論了此元件之特性和效能。



參考文獻

- [1] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Sys. Tech. J.* **48**, 2909-2947 (1969).
- [2] E. Hecht, *Optics*, Pearson Addison Wesley, 4th ed., chap. 4 and 10 (2001).
- [3] G. Kim, X. Han, and R. T. Chen, "A method for rebroadcasting signals in an optical backplane bus system," *J. Lightwave Technol.*, **19**, 959-965 (2001).
- [4] S. Natarajan, C. Zhao, and R. T. Chen, "Bi-directional optical backplane bus for general purpose multi-processor board-to-board optoelectronic interconnects," *J. Lightwave Technol.*, **13**, 1031-1040 (1995).
- [5] J. H. Yeh, R. K. Kostuk, and K. Y. Tu, "Hybrid free-space optical bus system for board-to-board interconnections," *Appl. Opt.* **35**, 6354-6364 (1996).
- [6] Z. Ye, J. Zheng, D. Liu, and S. Pei, "Structures of photonics crystals and band gaps in volume hologram," *Phys. Lett. A.* **299**, 313-317 (2002)
- [7] V. Berger, O. Gauthier-Lafaye, E. Costard, "Photonic band gaps and holography," *J. Appl. Phys.* **82**, 60-64 (1997).
- [8] X. Wang, F. Wang, L. Cui and D. Liu "Analysis of influence on the properties of heterogeneous volume hologram by the structures of bandgaps," *Opt. Commun.* **221**, 289-293 (2003).
- [9] Y. T. Huang, M. Kato, and R. K. Kostuk, "Methods for fabricating substrate-mode holographic optical elements," *Proc. SPIE*, **1211**, 166-174 (1990).
- [10] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, *Optical networks*, 2nd ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, Chap. 3 (2002).
- [11] J. Hecht, *Understanding fiber optics*, 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, Chap. 14 (2002).
- [12] D. K. Mynbaev, and L. L. Scheiner, *Fiber-optic communications technology*, 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, Chap. 6 and 13 (2001).

- [13] K. Shiraishi and S. Kawakami, "Spatial walk-off polarizer utilizing artificial anisotropic dielectrics," *Opt. Lett.* **15**, 516-518 (1990).
- [14] T. Sato et al., "Laminated polarization splitter with a large split angle," *Appl. Phys. Lett.* **61**, 2633-2634 (1992).
- [15] K. Shiraishi K and K. Matsumura, "Fabrication of spatial walk-off polarizing films by oblique deposition," *IEEE J. Quantum Electron.* **30**, 2417-2420 (1994).
- [16] K. Muro and K. Shiraishi, "Poly-Si/SiO₂ laminated walk-off polarizer having a beam-splitting angle of more than 20," *J. Lightwave Technol.* **16**, 127-133 (1998).
- [17] J. Nicholls, "Birefringent crystals find new niche in WDM networks," *WDM Solutions Dec.* (2001).
- [18] J. T. Chang, D. C. Su, and Y. T. Huang, "A wavelength and polarization selector made of holographic polarization beamsplitting," *Appl. Phys. Lett.* **70**, 1805-1807 (1997).
- [19] D. C. Su, J. T. Chang, and Y. T. Huang, "1-to-NxN optical fanout module for optical interconnects," *J. Opt.* **28**, 70-73 (1997).
- [20] J. Liu and R. T. Chen, "Path-reversed substrate-guided-wave optical interconnects for wavelength-division demultiplexing," *Appl. Opt.* **38**, 3046-3052 (1999).
- [21] Jing-Heng Chen, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, "Shrinkage- and refractive-index shift-corrected volume holograms for optical interconnects," *Applied Phys. Lett.*, **81**, 1387-1389 (2002).
- [22] D. G. McCauley, C. E. Simpson, W. J. Murbach, "Holographic optical element for visual display applications," *Appl. Opt.* **12**, 232-242 (1973).
- [23] B. J. Chang and C. D. Leonard, "Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements," *Appl. Opt.* **18**, 2407-2417 (1979).
- [24] B. J. Chang, "Optical information storage," *Proc. SPIE* **177**, 71-81 (1979).

第三章 光學循環器

3.1 前言

光學循環器(optical circulator)[1-3]可將光訊號依循一定的方向由一個傳輸埠(port)傳輸到序列中下一個傳輸埠。在光訊號傳輸中，光學循環器為傳輸方向非可逆(nonreciprocal)的重要被動光學元件(passive device)。在此為了簡單地說明光學循環器，Fig. 3.1(a)中為 3 埠光學循環器的光傳輸路徑示意圖，port 1 入射之訊號光，將於 port 2 出射；同樣地，port 2 入射的訊號光可由 port 3 出射；由 port 3 入射之訊號光則由 port 1 出射，形成 port 1→port 2→port 3→port 1 的循環。而另一例如 Fig. 3.1(b)所示，為一 4 埠光學循環器之光傳輸路徑示意圖，同理可證，該循環器為 port 1→port 2→port 3→port 4 之循環，然而，在該設計中，該循環器並不具有由 port 4→port 1 的完美循環特性，因此稱之為光學準循環器(optical quasi-circulator)，以示區別。本章中，將在此介紹傳統光學循環器的原理，以及利用在第二章中所介紹的全像空間偏離偏極器所改良的多埠光學循環器。

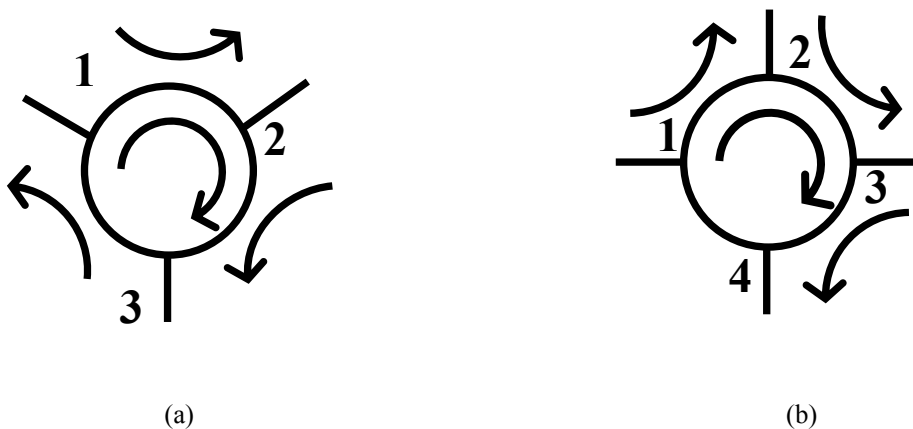


Fig. 3.1 光學循環器傳輸路徑示意圖，(a) 3-port 光學循環器；(b) 4-port 光學準循環器。

3.2 傳統光學循環器

3.2.1 元件架構與原理

在過去，各種光學循環器設計在過去已被提出[4-9]。一般在各種不同光學循環器的設計中，其組成要件為空間偏離偏極器(spatial walk-off polarizer, SWP)、法拉第旋轉器(Faraday rotator, FR)和二分之一波片(half wave-plate, H)等。如 Fig. 2.2 所示為一般光學循環器之組成要件方塊示意圖，經由各種巧妙設計與安排，則構成各式光學循環器。

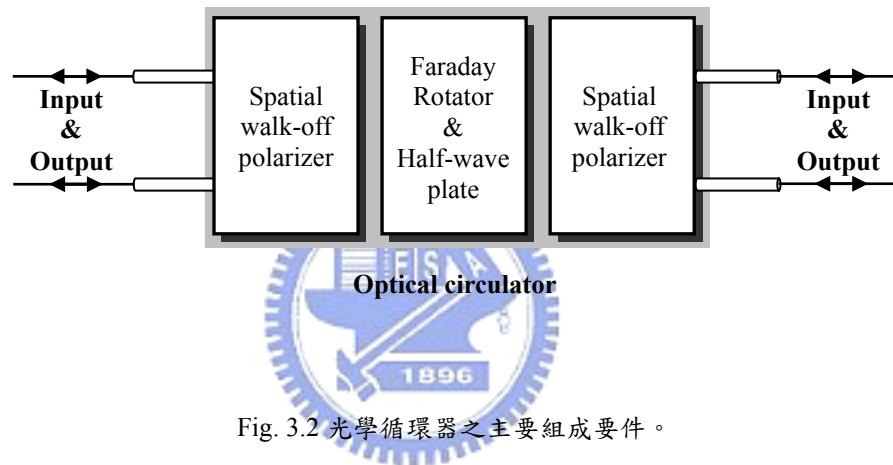


Fig. 3.2 光學循環器之主要組成要件。

如 Fig. 3.3 所示，為一個簡單的 3 埠光學準循環器架構，該循環器之組成包含兩個空間偏離偏極器、一個方位角為 45° 的法拉第旋轉器 FR、一個方位角為 45° 的二分之一波片 H，以及兩個偏極分光鏡 PBS_1 、 PBS_2 。為了方便說明在各光程中的偏極態(state of polarization, SOP)變化，圖中分別使用符號 \oplus 、 \odot 和 \ominus 和來代表非偏極光、s 偏光和 p 偏光之偏極態。

在 Fig. 3.3(a)中，非偏極光由 port-1 入射，經由空間偏離偏極器產生兩個偏極分量相互正交的平行光，此二道平行光分別受到法拉第旋轉器和二分之一波片的作用，偏光方向受到總旋轉角為 90° 的旋轉，最後再由空間偏離偏極器結合在一起，形成非偏極出射光從 port-2 出射；反之，在 Fig. 3.3(b)中，非偏極入射光由 port-2 入射至光學循環器，

同樣地，經由空間偏離偏極器分離成兩個偏極分量相互正交之平行光，此兩分量在相反的行進方向上，分別受到法拉第旋轉器和二分之一波片的作用，由於法拉第旋轉器的作用獨立於光束行進之方向，因此，無論線性偏振訊號光的行進方向為正向或反向，偏光狀態皆在同一方向上旋轉，而二分之一波片的作用則與光束行進之方向相關，線性偏振訊號光若在相反的行進方向上，則偏光狀態受到反向之旋轉；因此在反向入射時，偏光方向將會受到總旋轉角為 0° 的旋轉，在穿過法拉第旋轉器與二分之一波片後，s-偏光分量將穿透空間偏離偏極器筆直前進，p-偏光分量則被空間偏離偏極器偏移導引至上方處，自此與 port-1 隔絕，而後經由兩個 PBS 將其導引至 port-3 輸出。以此類推，便可進一步製作出 3 埠、4 埠... 等多埠數的光學(準)循環器。

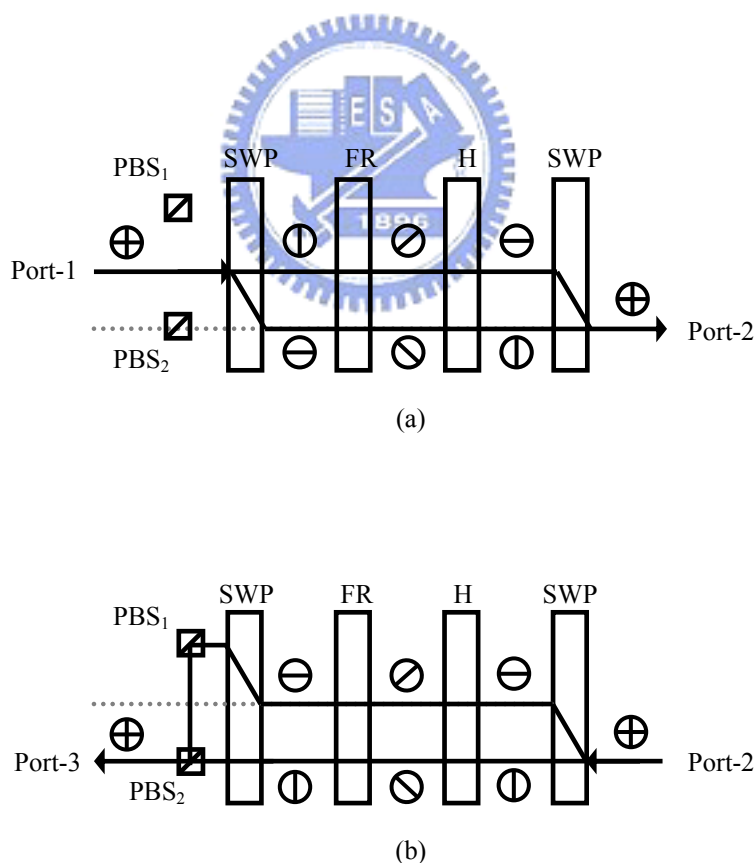


Fig. 3.3 3 埠光學準循環器之組成與操作原理。

3.2.2 應用

由於光學循環器具有高度隔離性、導向性，因此光學循環器是非常便利的被動元件，許多的光學循環器經常被廣泛地運用在光通訊上，色散補償(dispersion-compensation) [3]、光學存取多工/解多工器(optical add/drop multiplexer/demultiplexer, OADM)[10, 11]、光學放大器(optical amplifier)[11]和時域反射測量術(time-domain reflectometry)[12]等。

以一個簡單的光學存取多工/解多工器之應用為例作一說明：Fig. 3.4所示為一個常見的簡易型光學存取多工器，其組成包含兩個3埠光學準循環器和一個布拉格光纖光柵(fiber Bragg-grating, FBG) [13]，此布拉格光纖光柵只對特定波長 λ_5 作用。具波長 λ_1 、 $\lambda_2 \dots \lambda_N$ 之入射訊號由第一個光學循環器之port-1入射，再由port-2出射經過布拉格光纖光柵，波長 λ_5 之訊號則被布拉格光纖光柵(fiber Bragg grating, FBG)反射回port-2，最後由port-3出射，完成訊號取出(drop)之動作，其他波長訊號則繼續向前傳輸；當具波長 λ'_5 之訊號由第二個光學準循環器之port-1入射，然後由port-2出射進入布拉格光纖光柵，再被布拉格光纖光柵反射回port-2，最後由port-3出射，完成訊號存入(add)之動作。

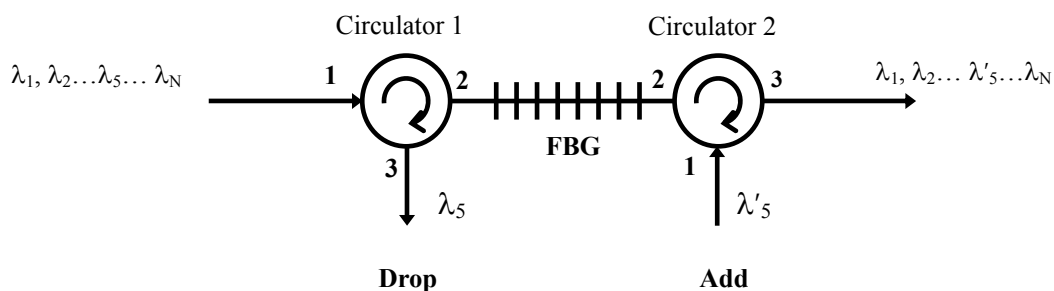


Fig. 3.4 光學循環器在存取多工/解多工之應用。

3.2.3 相關參數[3]

討論一個光學循環器的好壞，最簡單的評量便是藉由相關參數來評估，本節在此列出光學循環器的重要參數，藉以瞭解其特性與效能：

- (1) 隔離值(isolation)：光學循環器在不希望的路徑上產生隔離值，此參數值愈大代表隔離性愈佳，現有商品之規格已可高達 70dB。
- (2) 插入損耗(insertion loss)：與其他光學元件使用於一光學路徑中的情況相同，光學循環器具有插入損耗，現有商品之規格可低於 0.6dB。
- (3) 反射損耗(return loss)：光學循環器存在反射介面，因此反射損耗為重要參數，此參數之商業規格可高於 50dB 以上。
- (4) 偏極相依損失(polarization-dependent loss, PDL)：對於偏極獨立之光學循環器設計，無可避免地存在偏光旋轉角之誤差，因此引進偏極相依損失，此值之商業規格通常低於 0.05dB。
- (5) 偏極模色散(polarization-mode dispersion)：由於在偏極獨立光學循環器設計中，通常偏極分量相互垂直之訊號光，具有各自獨立的傳輸路徑，在進入出射端前才予以結合或補償，因此偏極模色散為一個重要的參數。商業規格一般約為 0.1ps，較佳者亦可低於 0.01ps。
- (6) 操作頻寬(bandwidths)：光學循環器之中心工作波長，通常設計在光通訊波長之 1550nm 或 1310nm，一般操作頻寬則為 ± 20 nm。

3.3 二維多埠偏極獨立光學準循環器

3.3.1 平面型全像空間偏極模組

由於傳統的光學循環器大多使用雙折射晶體之空間偏離偏極器操作訊號光的偏極態，然而，該類型的空間偏離偏極器卻因為製程等問題[14-16]，使得成本居高不下，除此之外，隨著光通訊系統的設計日益複雜，包含雙向光纖通訊架構在內，許多的系統設計逐漸地需要更多的通訊埠[10,11,17-19]。有鑑於此，本節在此提出另一形式的多埠光學準循環器，該系統係由一對平面型全像空間偏極模組(plane holographic spatial- and polarization- modules, PHMs)以及隨模組埠數增加的偏極分光鏡(PBSs)和反射稜鏡(RPs)組。如 Fig. 3.5 所示，PHMs 由一個方位角為 45° 的法拉第旋轉器 FR、一個方位角為 45° 的二分之一波片 H，以及一對全像空間偏離偏極器 HSWPs 所組成，為了易於瞭解，在此仍沿用符號 \oplus 、 \ominus 和 \otimes 分別表示 s-偏極分量、p-偏極分量和非偏極光。

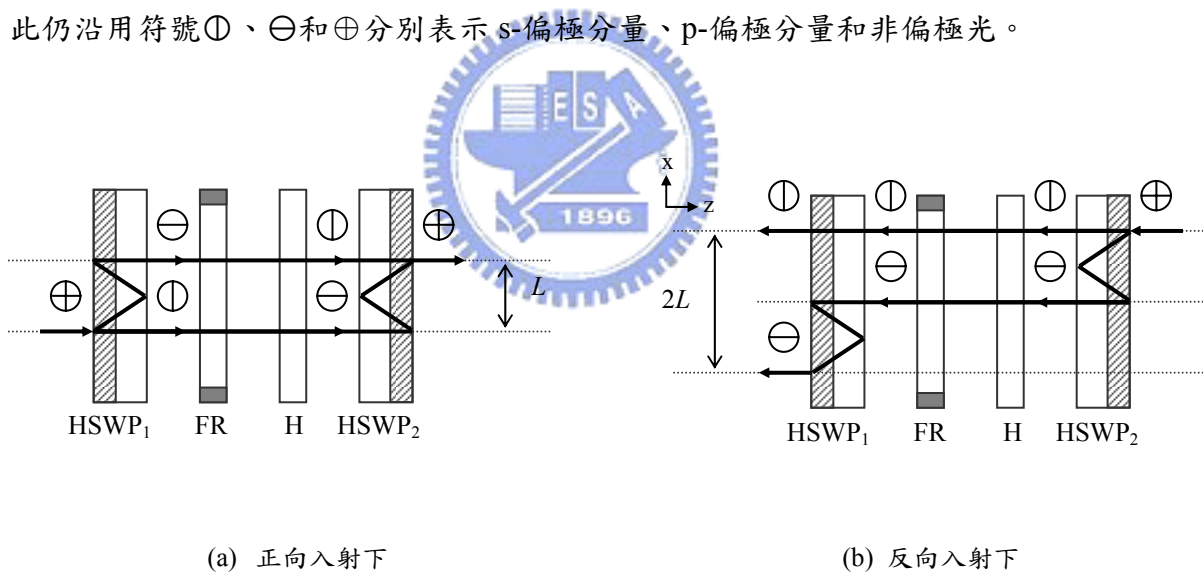


Fig. 3.5 平面型全像空間偏極模組之結構與操作原理。

如 Fig. 3.5(a)所示，當一非偏極入射光沿+z 方向入射此 PHM，其 s-偏極分量直接穿透 HSWP₁；同時 p-偏極分量經過兩次全內反射和兩次繞射後亦穿透 HSWP₁。此兩正交偏極分量經過 FR 和 H 後，其偏極態分別被 FR 旋轉+45°及 H 旋轉+45°後，共被旋轉 90°，而後進入 HSWP₂ 並結合在一起出射。因此，通過 PHM 後的出射光，在空間上沿 x 方向偏移一距離 L。藉由 Fig. 3.5(a)與 Fig. 3.3(b)的原理，同理可證，在 Fig. 3.5(b)中，當任意

偏極入射光沿-z 方向入射，s-偏極分量直進，p-偏極分量之空間位置沿-x 方向偏移 $2L$ 然後出射。

當串聯一對 PHMs 時，根據 Fig. 3.5 的結論，可得任意偏極入射光穿透此 PHMs 的特性，其架構與操作光程如 Fig. 3.6(a)和(b)所示：在 Fig. 3.6(a)中，當任意偏極入射光沿 +z 方向入射，任意偏極出射光之空間位置沿+x 方向偏移距離 $2L$ ；在 Fig. 3.6(b)中，當任意偏極入射光沿-z 方向入射，s-偏極分量直進，p-偏極分量之空間位置則沿-x 方向偏移 $4L$ 後，於下方輸出。

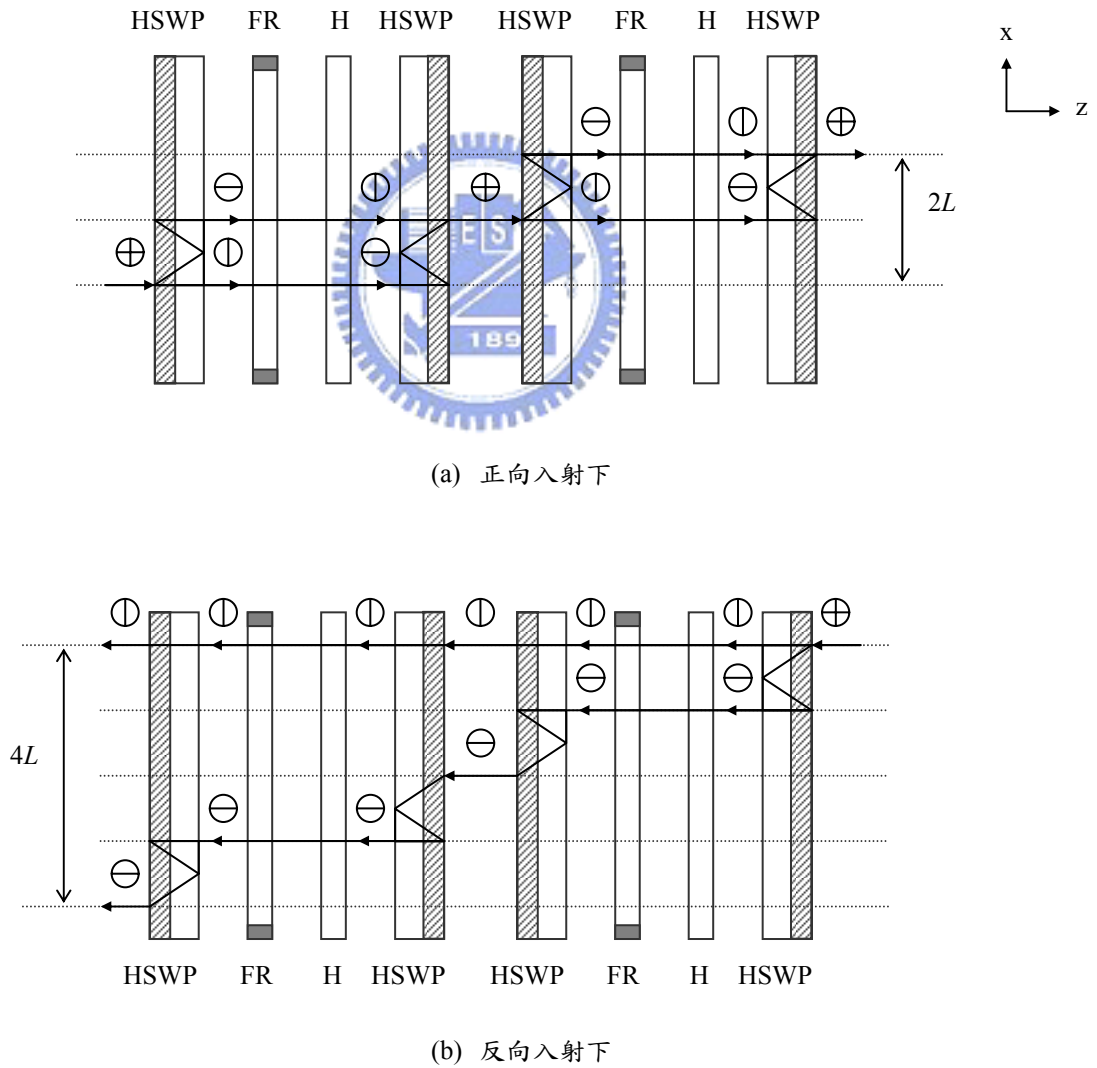


Fig. 3.6 串聯一對平面型全像空間偏極模組之結構和操作特性。

根據此特性，將一對 PHMs 應用於光學準循環器時，各埠之 s-與 p-偏光的輸入及輸出位置如 Fig. 3.7 所示，圖中 s-與 p-之後的數目為對應埠之編號，箭頭朝向 PHM 表示輸入，反之則表示輸出。此模組一系列的輸入/出埠中，除了 port-1 及最後一個埠之外，其他各埠的輸入輸出均在同一位置上，當任意偏極入射光來回往返於此串聯之 PHMs 模組時，s-和 p-偏極分量將以 z 字形分別向上下兩側逐漸分開。為了方便說明，在此設 PHM 厚度為 $4L$ ，且各元件分佈於 $z=L\sim 5L$ 及 $-L\sim -5L$ 的範圍內，在這之中，埠數分屬於 $(2n-1)$ 的 odd-ports (n 為正整數) 將分佈於 $z < 0$ 的象限中，屬於 $2n$ 的 even-ports 則位於 $z > 0$ 的象限，圖中定義 port- j 的 s-與 p-偏光的位置分別位於 (x_{sj}, z_{sj}) 與 (x_{pj}, z_{pj}) 。並令 s-和 p-偏光之初始入射位置設於 $x_{s1}=x_{p1}=0$ ，可得該埠各偏光分量位於模組內於 x-軸上的相對位置關係：

$$\begin{bmatrix} x_{s(2n-1)} \\ x_{p(2n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(n-1)L \\ 2(1-n)L \end{bmatrix}, \quad (\text{for odd-ports}) \quad (3-1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{s(2n)} \\ x_{p(2n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2nL \\ 2(2-n)L \end{bmatrix}. \quad (\text{for even-ports}) \quad (3-2)$$

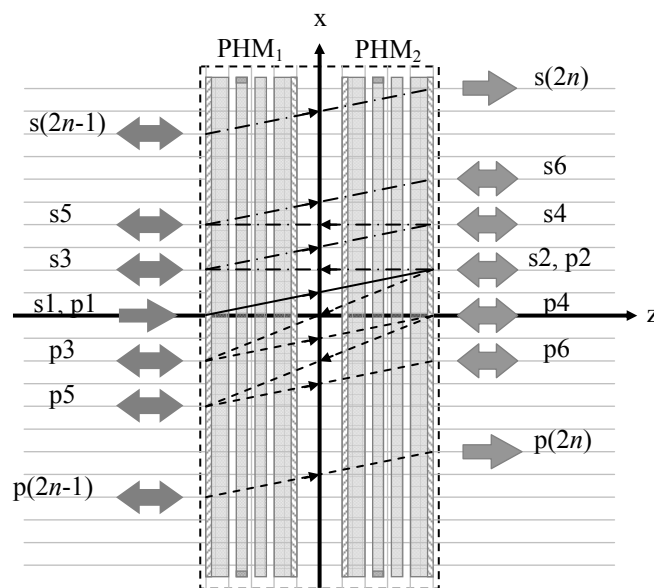


Fig. 3.7 非偏極入射光之 s-和 p-偏極分量於 PHM 內之操作特性。

3.3.2 組成與特性

藉由 3.3.1 節中所描述的 PHMs 串連模組，於該模組的兩側針對各埠之 s-與 p-偏極分量的位置，置入可導引光路的 PBSs 和 RPs，則可得多埠之偏極獨立光學準循環器。

Fig. 3.8 所示，即為 $2n$ -port 光學準循環器。根據方程式(3-1)和(3-2)，對應於 port- j 之 PBSs 和 RPs 的座標位置，分別為 (x_{PBSj}, z_{PBSj}) 及 (x_{RPj}, z_{RPj}) ：

$$\begin{bmatrix} x_{PBS(2n-1)} & z_{PBS(2n-1)} \\ x_{RP(2n-1)} & z_{RP(2n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(n-1)L & (-2n-4)L \\ 2(1-n)L & (-2n-4)L \end{bmatrix}, \quad (\text{for an odd port}) \quad (3-3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{PBS(2n)} & z_{PBS(2n)} \\ x_{RP(2n)} & z_{RP(2n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2nL & (2n+4)L \\ 2(2-n)L & (2n+4)L \end{bmatrix}, \quad (\text{for an even port}) \quad (3-4)$$

其中 n 為正整數。光束由 port-1→port-2、port-2→port-3、port-3→port-4 及 port-($2n-1$)→port- $2n$ 之操作分別如 Fig. 3.8 (a)、(b)、(c)、(d)所示，圖中 \square 和 \triangle 分別表示所加入的 PBS 和 RP；而其他埠的光傳輸路徑，亦可同理類推而得。

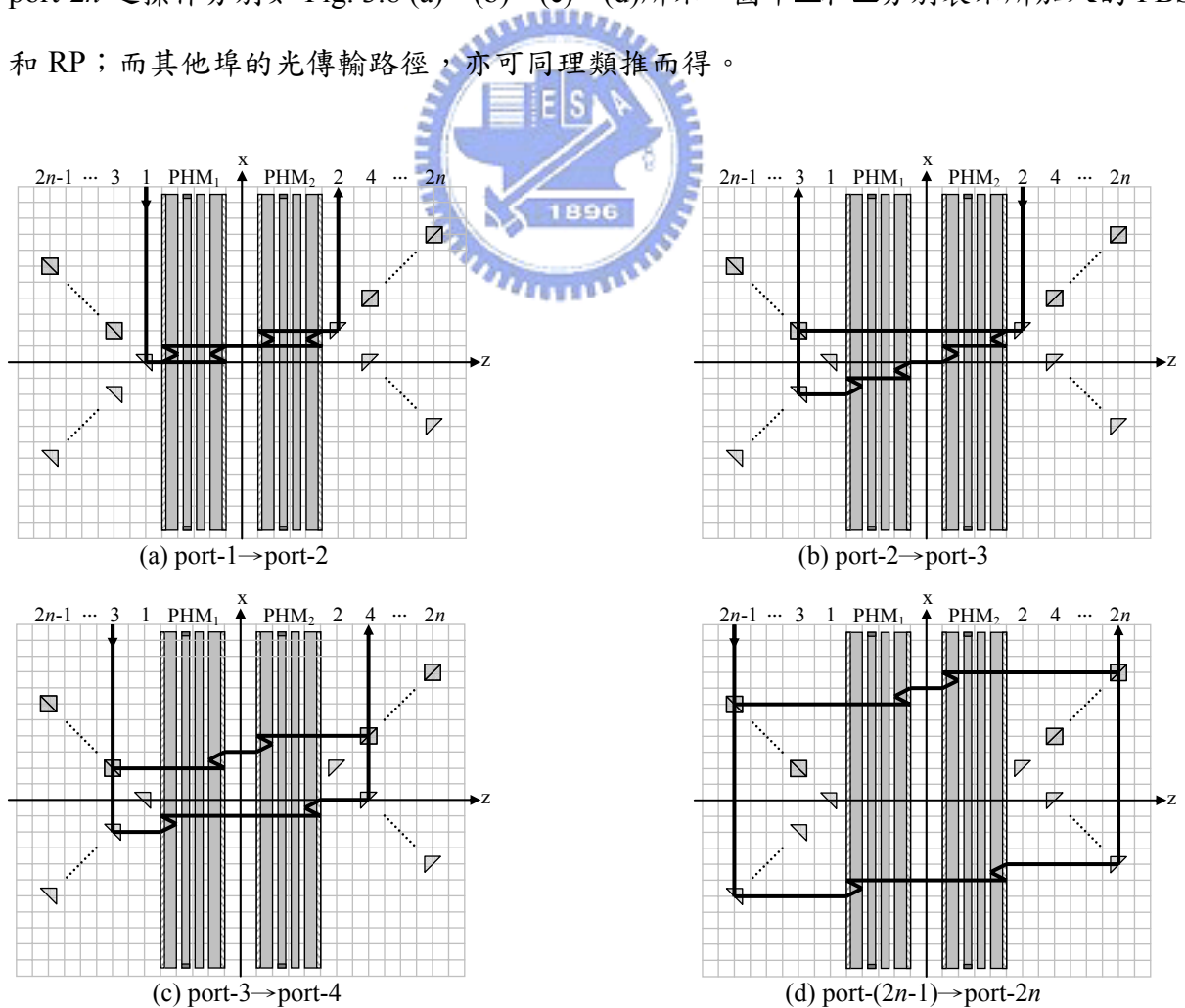


Fig. 3.8 $2n$ 埠光學準循環器之架構與操作原理。

此外，在 Fig. 3.8 的設計中，由於 p-偏光分量之光程明顯大於 s-偏光分量之光程，此將造成偏極模色散(polarization mode dispersion, PMD)的問題。因此，為了解決此 PMD 問題，原本 Fig. 3.8 中之光路，須分別在 odd-和 even-port 分別引入兩種 PBSs 和 RPs 所構成的模組，此兩種導引模組之設計如 Fig. 3.9 所示，該模組之規格(*Length* × *Width*)分別為 $(4n - 3)L \times 0.31(n - 1)L$ (for an odd-port) 和 $(4n - 4)L \times 0.31(n - 1)L$ (for an even-port)，且該導引模組的位置則依循下式擺置：

$$\begin{bmatrix} x_{M(2n-1)} & z_{M(2n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(1-n)L & (-2n-4)L \end{bmatrix}, \quad (\text{for an odd port}) \quad (3-5)$$

$$\begin{bmatrix} x_{M(2n)} & z_{M(2n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2nL & (2n+4)L \end{bmatrix}, \quad (\text{for an even port}) \quad (3-6)$$

其中，port-1 在設計上並無 PMD 的問題，因此上式中的 n 為大於 1 之正整數，方程式(3-5)之座標位置相對於 odd-port 模組中之 RP 的中心，在圖中以無灰階底色之 \triangle 標示該元件；方程式(3-6)之座標位置相對於 even-port 模組中之 PBS 的中心，在圖中亦以無底色之 \square 標示該元件。在導引模組引入後，各埠的 s-和 p-偏光分量之光程差在理論上可消去為零，因此可避免 PMD 問題。改良後的準循環器模組之架構與操作繪於 Fig. 3.10(a)、(b)、(c)、(d)，分別為訊號光由 port-1 → port-2、port-2 → port-3、port-3 → port-4，以及由 port-(2n-1) → port-2n 的操作原理；同理類推則可得其他埠之光傳輸路徑。

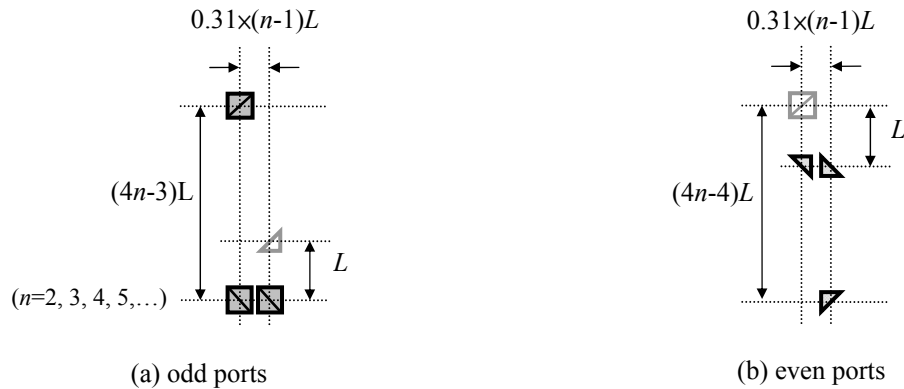


Fig. 3.9 PBSs 和 RPs 光束導引模組。

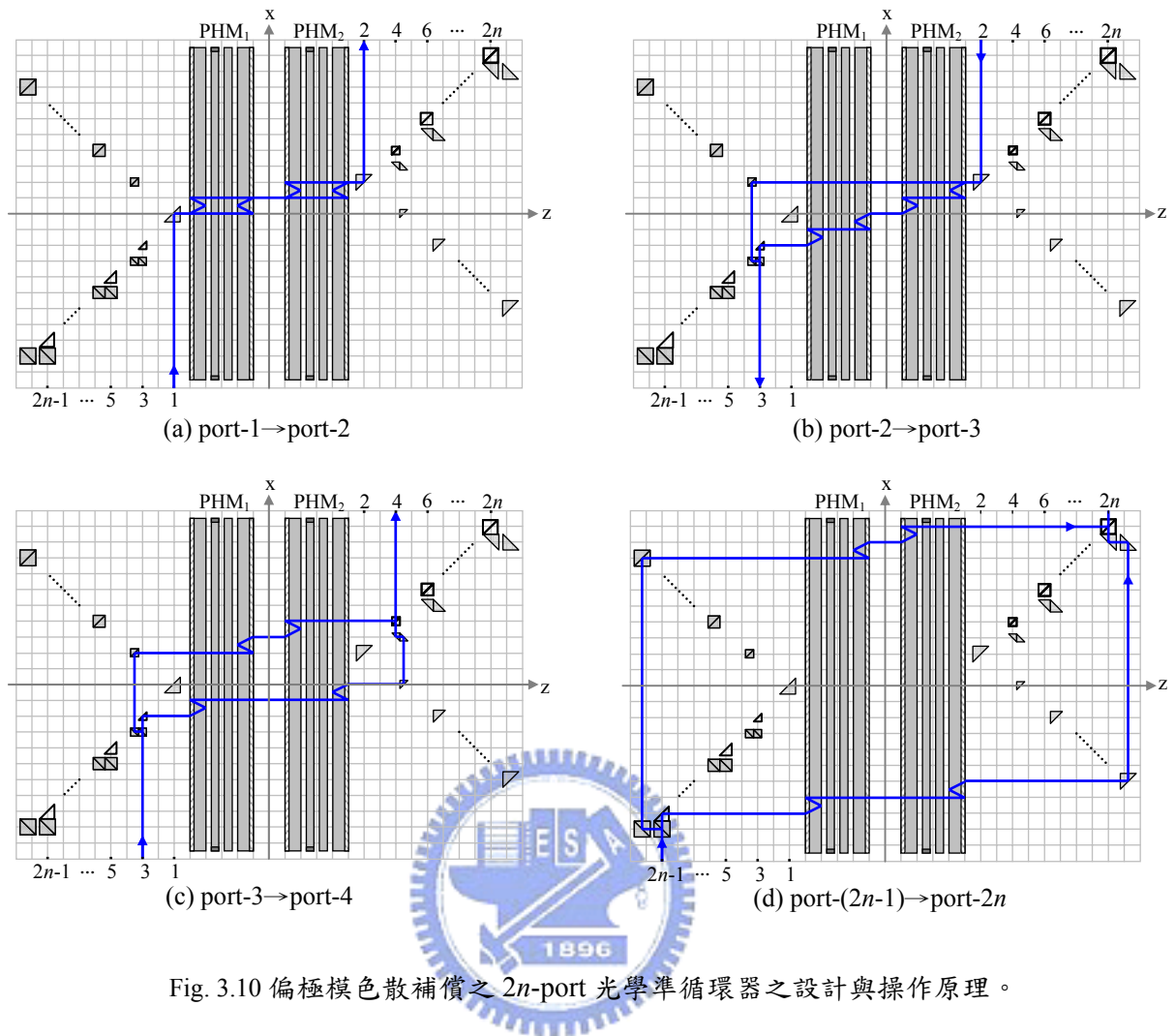


Fig. 3.10 偏極模色散補償之 $2n$ -port 光學準循環器之設計與操作原理。

3.3.3 結果與討論

為了驗證本設計之可行，研究中利用第二章中的全像偏離偏極器製作原理，研製出適用於 1300nm 波長、具 60° 偏極分光角之 HSWPs 來組裝 6 埠之偏極獨立光學準循環器。該 HSWPs 是使用重鉻酸鉍明膠(DCG)作為全像紀錄材料，以 He-Cd 雷射($\lambda=441.6\text{nm}$)曝光拍製，所獲得之繞射效率為 $\eta_s=3\%$ 和 $\eta_p=90\%$ 。除了使用兩組 PHMs 之外，此六埠光學準循環器之模型亦需要八個 PBSs 和十個 RPs 組裝。在考慮法拉第旋轉器 FR 和二分之一波片 H 之穿透率分別為 0.95 和 0.97 的情形下，此模組之效能結果如 Table 3.1 所示。此外，若 HSWPs 經抗反射膜處理以及嚴謹地控制全像元件之製程，則元件可具有接近

理論值[20]的良好效能，即 $\eta_y < 1\%$ 和 $\eta_x > 99\%$ ，在滿足此條件下，重新計算此模組之效能其相關計算參數如 Table 3.2 所示。此外，根據相同的原理，此元件亦可設計適用於 1550nm 波長範圍。

為了解決偏極模色散的問題，在奇數和偶數埠位置處，引入兩種 PBSs 和 RPs 所構成的模組，然而，當光學循環器的體積愈作愈小時，此模組勢必跟著變小，最後將增加元件組裝的困難度；因此，透過增加全像空間偏離偏極器(HSWP)之玻璃基板的厚度 t ，藉以增加水平分光間距的長度 L ($L = 2t \tan \theta_d$)可有效地減輕元件組裝的困難度；另一方法是在元件設計時，改採由編號較大的埠開始使用，如此亦可解決編號較小的埠導引模組不易組裝的問題。

Table 3.1 使用所製作 HSWPs($\eta_s=3\%$, $\eta_p=90\%$)之六埠光學準循環器，操作於 1300nm 之相關參數(in dBs)。

Input Port	Output Port					
	1	2	3	4	5	6
1	14.26 ^b	4.18 ^c	>25.36	>25.36	>25.36	>25.36
2	>26.92	14.26 ^b	3.90 ^c	>26.92	>26.92	>26.92
3	>25.36	>25.36	14.26 ^b	4.18 ^c	>25.36	>25.36
4	>26.92	>26.92	>26.92	14.26 ^b	3.90 ^c	>26.92
5	>25.36	>25.36	>25.36	>25.36	14.26 ^b	4.18 ^c

^aAll values without a superscript are isolation values; ^bReturn losses; ^cInsertion losses.

Table 3.2 使用理想 HSWPs($\eta_s<1\%$, $\eta_p>99\%$)之六埠光學準循環器，操作於 1300nm 之相關參數(in dBs)。

Input Port	Output Port					
	1	2	3	4	5	6
1	>30 ^b	<1 ^c	>43.84	>43.84	>43.84	>43.84
2	>43.93	>30 ^b	<1.01 ^c	>43.93	>43.93	>43.93
3	>43.84	>43.84	>30 ^b	<1.01 ^c	>43.84	>43.84
4	>43.93	>43.93	>43.93	>30 ^b	<1.01 ^c	>43.93
5	>43.84	>43.84	>43.84	>43.84	>30 ^b	<1.01 ^c

^aAll values without a superscript are isolation values; ^bReturn losses; ^cInsertion losses.

3.4 三維多埠偏極獨立光學準循環器

根據 3.3 節中所介紹之光學準循環器，可得知 HSWPs 運用在光學循環器之設計中的種種優點以及組裝上的優異性，雖然在 3.3 節中已介紹了補償偏極模色散的設計，然而，光訊號在該模組中的兩種偏極分量卻有不對稱的情形發生，為了能避免此問題，本節中在此將平面型多埠偏極獨立光學準循環器改良為三維架構，可將光訊號的 s-、p-偏極分量在各埠之間皆有對稱且相等之光程，並有效地將模組結構簡化以利於成本。

3.4.1 正交型全像空間偏離偏極模組

為了能夠便於理解 HSWPs 於三維空間內之操作，如 Fig. 3.11 所示，為三維空間之 HSWP 的結構示意圖，該元件的操作原理與 2.5 節中的 Fig. 2.7 完全相同，其中，模組的整體厚度為 d ，出射光之分光間距為 L ；為了易於說明與瞭解，在本節中之各圖形均附有 x-y-z 直角座標(單位間距 L)，用以標定光束在空間中行進之方向與位置；此外，分別於圖中使用符號 \ominus 和 \oplus 代表 x-偏極分量和 y-偏極分量，而符號 \oplus 則代表光束同時具有 x-和 y-偏極分量之非偏極光。

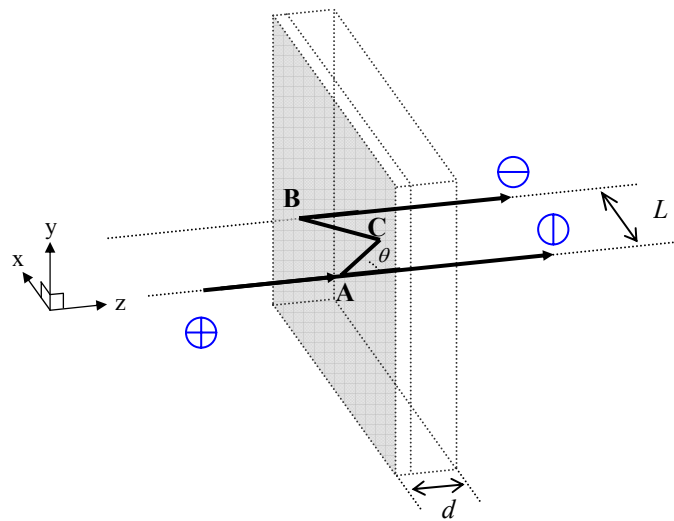


Fig. 3.11 全像空間偏離偏極器之正交型空間構造和操作原理。

如 Fig. 3.12 所示，使用一對 HSWPs 結合方位角同為 45° 的法拉第旋轉器 FR 和二分之一波片 H，則構成一正交型全像空間偏離偏極模組(orthogonal holographic spatial- and polarization- modules, OHM)，即操作原理同 Fig. 3.5 中所繪之。在圖中，非偏極入射光穿透單一 OHM 的特性，可依照出射光被偏移的方向分為——在 x 軸上偏移的 OHM_x，以及在 y 軸上偏移的 OHM_y 兩種類型；其中，OHM_x 的架構與操作原理如 Fig. 3.12(a) 和(b)之所示：在 Fig. 3.12(a)中，當一非偏極入射光沿+z 方向入射此 OHM_x，相同於平面型全像空間偏極模組之操作原理，其 y-偏極分量直接穿透 HSWP₁；同時 x-偏極分量經過兩次全內反射和兩次繞射後，再沿+z 方向由 HSWP₁ 出射。然後，此兩正交偏極分量經過 FR 和 H；它們的偏極態將分別地被 FR 旋轉 $+45^\circ$ 和被 H 旋轉 $+45^\circ$ ，總共被旋轉 90° 。此二分量最後進入 HSWP₂，在經過相似於在 HSWP₁ 中的繞射和全內反射之作用後，二分量將在 HSWP₂ 結合後一起出射，且此 OHM_x 之非偏極出射光之空間位置沿+x 方向偏移一段距離 L 。



反之，如 Fig. 3.12(b)所示，當一非偏極入射光沿-z 方向入射此 OHM_x，同樣地，類似於平面型全像空間偏極模組之操作原理，其 y-偏極分量直接穿透 HSWP₂；同時 x-偏極分量經過兩次全內反射和兩次繞射後亦穿透此 HSWP₂。然後，此兩正交偏極分量經過 H 和 FR；它們的偏極態分別被 H 旋轉 -45° 和被 FR 旋轉 $+45^\circ$ ，總共被旋轉 0° 。最後，此 y-偏光分量直接穿透 HSWP₁；x-偏極分量再次經過兩次全內反射和兩次繞射後亦穿透 HSWP₁。因此，非偏極入射光之 y-偏極分量直接穿透此 OHM_x；同時其 x-偏極分量在空間上沿著-x 方向偏移一段距離 $2L$ ，然後出射。

OHM_y 的模組操作原理如 Fig. 3.12(c)和(d)之所示，其原理可視同 OHM_x 沿 z 軸旋轉 90° 後之操作，其結果可歸納如下：(c)當任意偏極入射光沿+z 方向入射，任意偏極出射光之空間位置沿+y 方向偏移距離 L ；(d)當任意偏極入射光沿-z 方向入射，p-偏極分量直進，s-偏極分量之空間位置沿-y 方向偏移 $2L$ 然後出射。

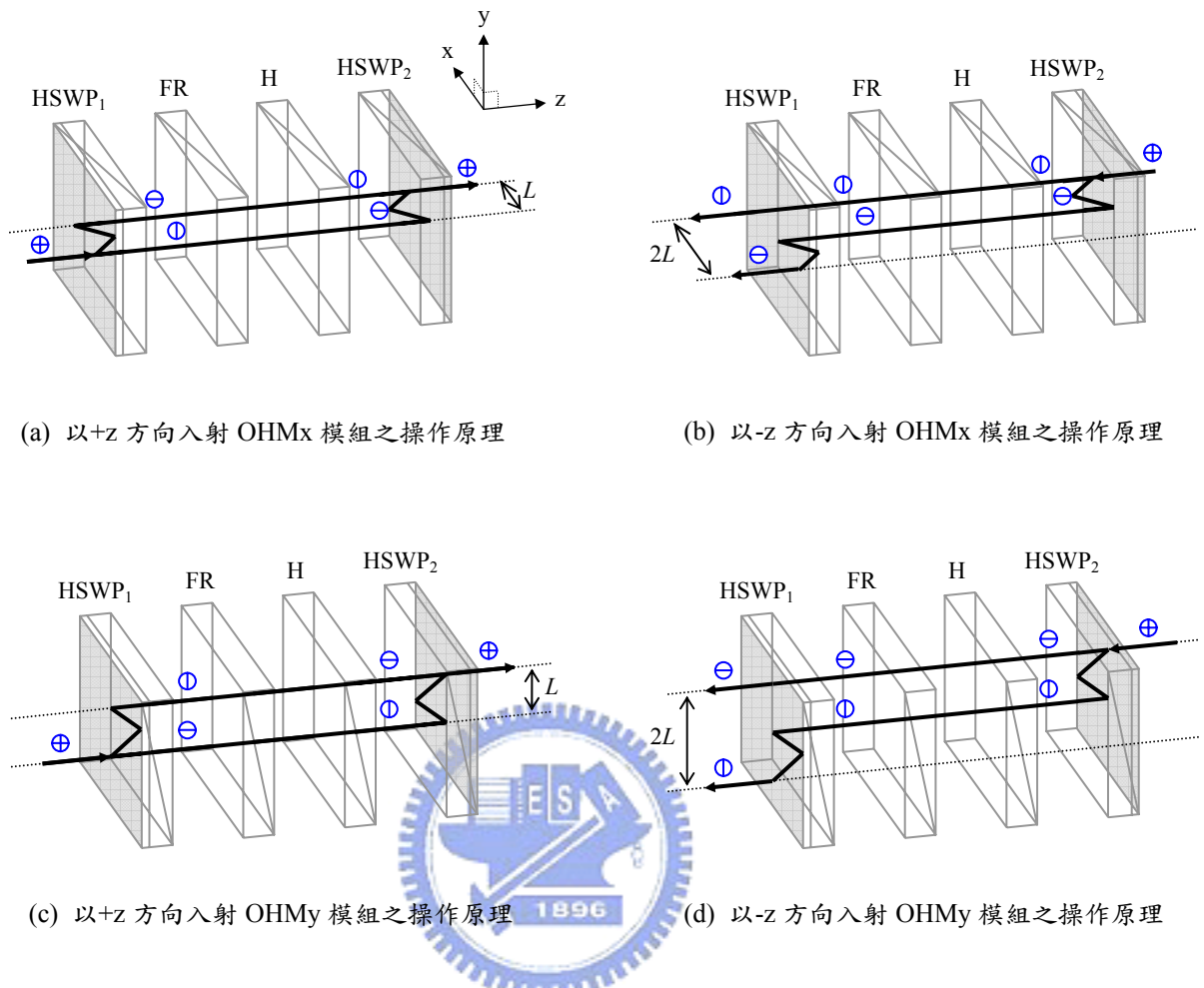
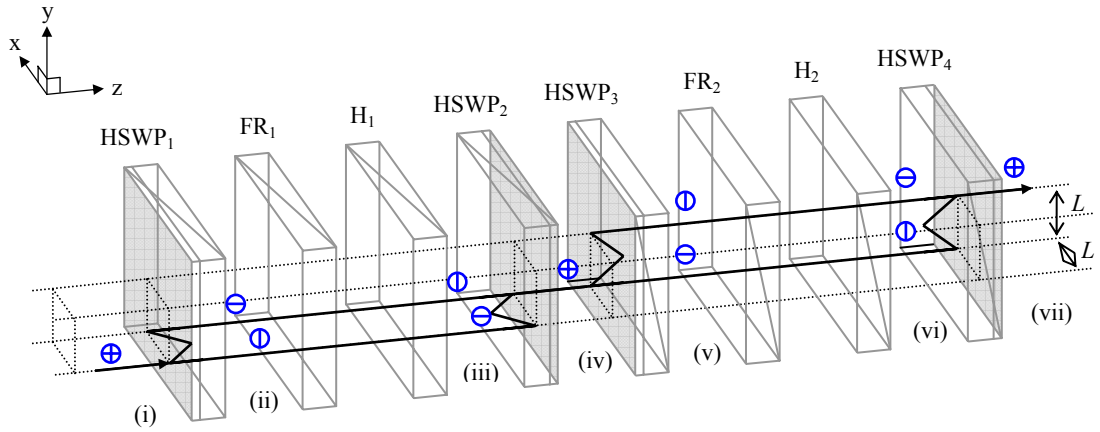
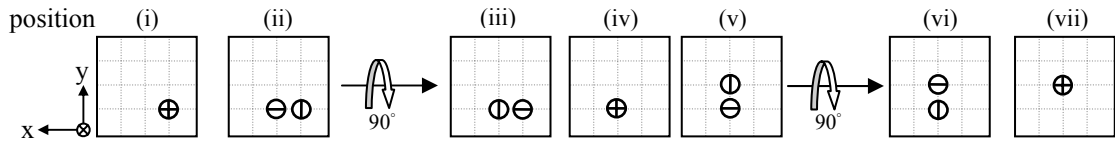


Fig. 3.12 非偏極光分別入射於兩種 OHM 模組的操作方式與原理，(a)、(b)為 OHMx 之架構，(c)、(d)為 OHMy 之架構。

在將前面所提的 OHMx 與 OHMy 兩模組串聯之後，任意偏極入射光沿+z 方向穿透此串連模組的特性則如 Fig. 3.13(a)所示，在圖中各偏極光於 xy 平面上的分佈，在 Fig. 3.13(b)中以對應各光程之象限圖表示，圖中各偏光之間的單位距離為 L ，根據前述的原理，在此可得出射光之位置將在沿+x 和+y 方向各偏移距離 L 處；同理可得，當任意偏極入射光沿-z 方向入射至該串連後的模組中，其操作原理如 Fig. 3.14(a)所示，同樣地在 Fig. 3.14(b)中仍標明著各偏極態於 xy 平面上的變化，同理可知當一非偏極入射光沿-z 方向入射此模組中，其 y-偏極分量之空間位置，沿-y 方向偏移一段距離 $2L$ 然後出射；x-偏極分量之空間位置，則沿-x 方向偏移一段距離 $2L$ 然後出射。

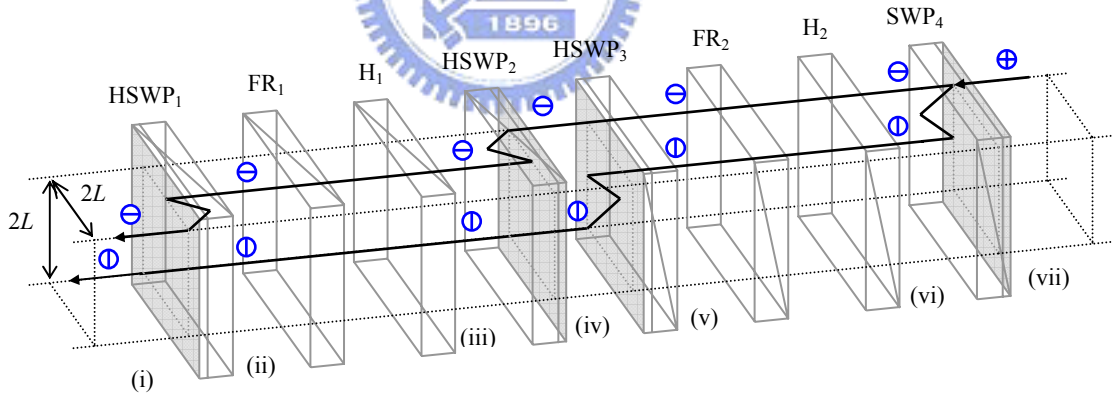


(a) 串聯 OHM_x 和 OHM_y 之模組結構與操作特性

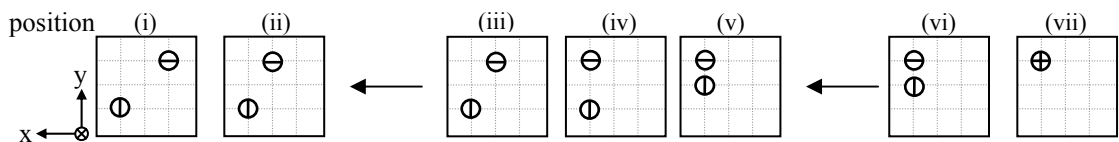


(b) 操作在模組之中的光偏極態

Fig. 3.13 沿+z 方向入射串聯 OHM_x 與 OHM_y 之模組的操作原理。



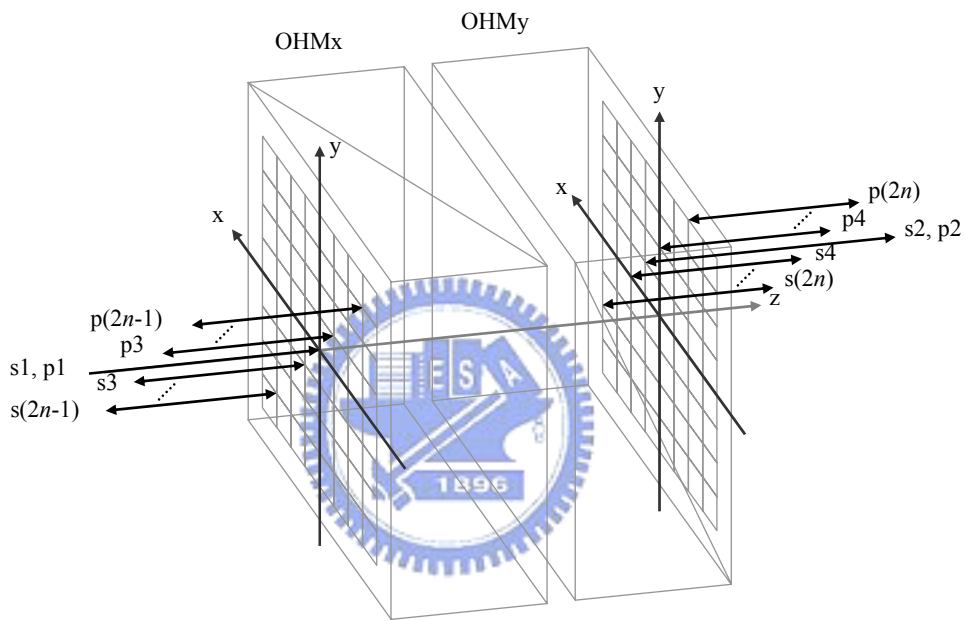
(a) 串聯 OHM_x 和 OHM_y 之模組結構與操作特性



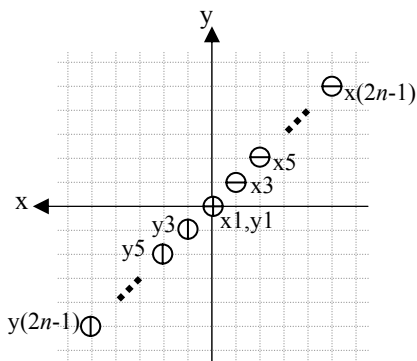
(b) 操作在模組之中的光偏極態

Fig. 3.14 沿-z 方向入射串聯 OHM_x 與 OHM_y 之模組的操作原理。

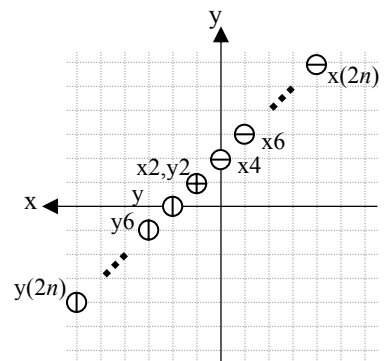
根據此特性，當任意偏極入射光來回往返於此串聯 OHM 模組時，s-和 p-偏極分量將沿著 $y=-x$ 和 $y=2-x$ 分別向兩側逐漸分開；在此令沿+z 方向入射，並在 xy 平面上之(0,0) 處為 port-1，而該輸出埠為 port-2，則各埠對應之 s-與 p-偏極分量則如 Fig. 3.15(a)所示，而為了便於了解各偏極分量在 xy 平面上之位置分佈，如 Fig. 3.15(b)與(c)所示，圖中的單位長度為 L ，各埠之偏極分量分別延用符號 \ominus 、 \oplus 及 \otimes 以表示 x-偏極分量、y-偏極分量，以及同時具有 x-和 y-偏極分量之光訊號。



(a) 各任意偏極入射光之 s-和 p-偏極分量在模組內往返之相對關係



(b) odd port 的偏極分量在 xy 空間上之分佈



(c) even port 的偏極分量在 xy 空間上之分佈

Fig. 3.15 任意偏極入射光之 s-和 p-偏極分量往返於 HSPMs 之操作特性。

為了說明模組中各埠的對應位置，在此忽略模組之厚度，根據 Fig 3.15 之位置關係，port-1 定義在 $(x_{x1}, y_{x1}, z_{x1})=(x_{y1}, y_{y1}, z_{y1})=(0, 0, -L)$ 處，port-(2n-1) (odd port) 則位於 -z 的範圍，port-2n (even port) 位於 +z 的範圍，其中 n 為正整數。則各個偏光在模組兩側之 x-y 平面上的相對位置，可分別表示如下：

$$\begin{bmatrix} x_{y(2n-1)} & y_{y(2n-1)} \\ x_{x(2n-1)} & y_{x(2n-1)} \end{bmatrix}_{z=-L} = \begin{bmatrix} (n-1)L & (1-n)L \\ (1-n)L & (n-1)L \end{bmatrix}_{z=-L}, \quad (\text{for an odd port}) \quad (3-7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{y(2n)} & y_{y(2n)} \\ x_{x(2n)} & y_{x(2n)} \end{bmatrix}_{z=L} = \begin{bmatrix} nL & (2-n)L \\ (2-n)L & nL \end{bmatrix}_{z=L}. \quad (\text{for an even port}) \quad (3-8)$$

3.4.2 組成與特性

根據上一節中所述的 OHMs 之特性，並利用之前平面型多埠光學準循環器的設計經驗，在此將 OHMs 模組兩側相對應之 x-與 y-偏極分量的位置，對應其在 xy 平面上的分佈加入反射稜鏡 RPs，並以偏極分光鏡 PBSs 來結合該偏極分量，所引入之 RPs 和 PBSs 的 x-y-z 座標位置如方程式(3-9)、(3-10)所示，便可將多埠偏極獨立光學準循環器實現。

$$\begin{bmatrix} x_{RP1(2n-1)} & y_{RP1(2n-1)} \\ x_{RP2(2n-1)} & y_{RP2(2n-1)} \\ x_{PBS(2n-1)} & y_{PBS(2n-1)} \end{bmatrix}_{z=-L} = \begin{bmatrix} (n-1)L & (1-n)L \\ (1-n)L & (n-1)L \\ (n-1)L & (n-1)L \end{bmatrix}_{z=-L}, \quad (\text{for an odd port}) \quad (3-9)$$

$$\begin{bmatrix} x_{RP1(2n)} & y_{RP1(2n)} \\ x_{RP2(2n)} & y_{RP2(2n)} \\ x_{PBS(2n)} & y_{PBS(2n)} \end{bmatrix}_{z=L} = \begin{bmatrix} nL & (2-n)L \\ (2-n)L & nL \\ nL & nL \end{bmatrix}_{z=L}, \quad (\text{for an even port}) \quad (3-10)$$

其中 n 為正整數，下標則表示所對應的 RP 或 PBS 和埠的編號。由於 port-1 和 port-2 對應之 x-和 y-偏光分量在空間中交互重疊，因此所對應之座標處，僅需一個 RP 即可。

加入 RPs 以及 PBSs 的多埠光學準循環器雛型如 Fig. 3.16 以及 Fig. 3.17 所示，該架構為一 5 埠光學準循環器，模組的組成包含了串連的 OHMs、八個 RPs，以及三個 PBSs；在 Fig. 3.16 中，為簡化的 port-1→port-2 操作示意圖；而 port 4→port 5 之操作圖則如 Fig. 3.17 所示。其他埠的光傳輸路徑，可同理類推而得；而具有更多埠數目之光學準循環器，亦可依相同原理加以擴充製造而得。

此外，在本設計中，由於入射光之 x -和 y -偏極分量，在各傳輸路徑之光程中具有良好的對稱性，因此 x -偏極分量與 y -偏極分量具有完全相同之光程，故與二維多埠偏極獨立光學準循環器相比，本設計改良了二維架構下，可能因光程不對稱而引入不必要的相位問題，此外，本設計亦避免了偏極模色散的發生。

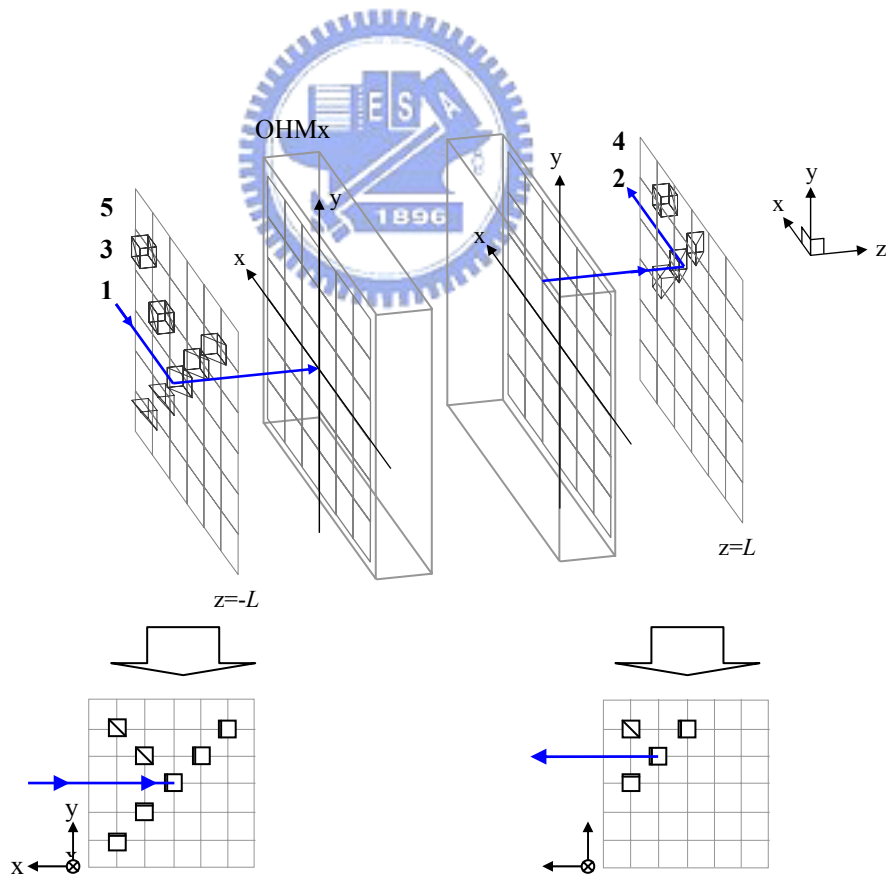


Fig. 3.16 5 埠光學準循環器之模組與 port-1→port-2 的操作原理。

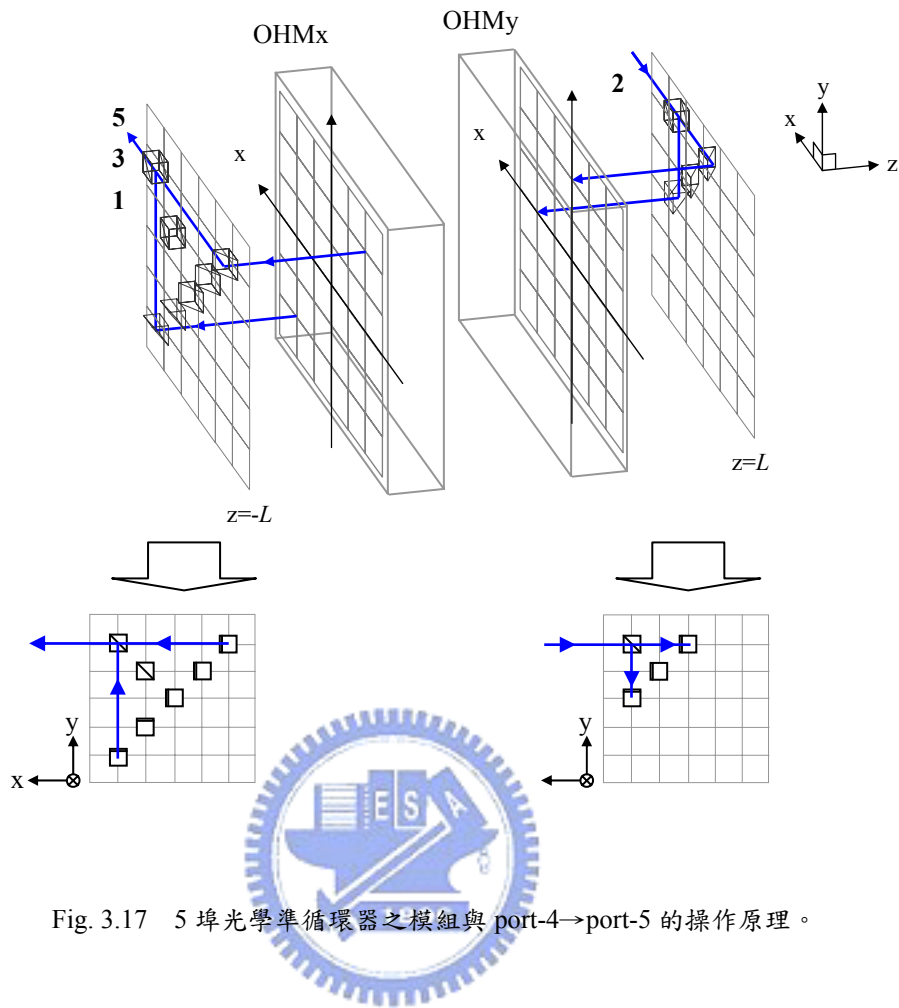


Fig. 3.17 5埠光學準循環器之模組與 port-4→port-5 的操作原理。

3.4.3 結果與討論

經由上述所介紹的模組，同樣地沿用與二維多埠偏極獨立光學準循環器模組中，完全相同的 HSWPs 來組裝 5 埠之偏極獨立光學準循環器。該 HSWPs 以 DCG 作為全像紀錄材料，以 He-Cd 雷射曝光拍製，適用之中心波長為 1300nm，所獲得之繞射效率為 $\eta_s=3\%$ 和 $\eta_p=90\%$ 。考慮 OHM 中的法拉第旋轉器和二分之一波片的穿透率分別為 0.95 和 0.97 的情形下，此模組之效能結果如 Table 3.3 所示，該模組之隔離值(isolation)介質約大於 25dB 以上，反射損耗(return losses)約為 14dB，插入損失(insertion losses)約為 4dB。此外，若 HSWPs 經抗反射膜處理以及嚴謹地控制全像元件之製程，則元件可具有接近理論值的良好效能[20]，即 $\eta_y \sim 0\%$ 和 $\eta_x \sim 100\%$ ，在滿足此條件下，再次考慮

HSWPs 之效率 $\eta_y < 1\%$ 和 $\eta_x > 99\%$ ，重新計算此模組之效能，計算所得之結果如 Table 3-4 所示，該模組的效能提升至隔離值大於 43dB 以上，反射損耗 >30dB 以上，插入損失則小於 1dB。且根據耦合波理論之估算，該 HSWPs 在中心波長 1300nm 之操作頻寬為 20nm，其效率-波長譜圖如 Fig. 3.18 所示。

Table 3.3 使用所製作 HSWPs($\eta_s=3\%$ ， $\eta_p=90\%$)之 5 埠光學準循環器，操作於 1300nm 之相關參數(in dB)

In Port	Out Port				
	1	2	3	4	5
1	14.26 ^b	4.18 ^c	>25.36	>25.36	>25.36
2	>26.92	14.26 ^b	3.90 ^c	>26.92	>26.92
3	>25.36	>25.36	14.26 ^b	4.18 ^c	>25.36
4	>26.92	>26.92	>26.92	14.26 ^b	3.90 ^c

^aAll values without a superscript are isolation values; ^bReturn losses; ^cInsertion losses.

Table 3.4 使用理想 HSWPs($\eta_s<1\%$ ， $\eta_p>99\%$)之 5 埠光學準循環器，操作於 1300nm 之相關參數(in dB)

In Port	Out Port				
	1	2	3	4	5
1	>30 ^b	<1 ^c	>43.84	>43.84	>43.84
2	>43.93	>30 ^b	<1.01 ^c	>43.93	>43.93
3	>43.84	>43.84	>30 ^b	<1.01 ^c	>43.84
4	>43.93	>43.93	>43.93	>30 ^b	<1.01 ^c

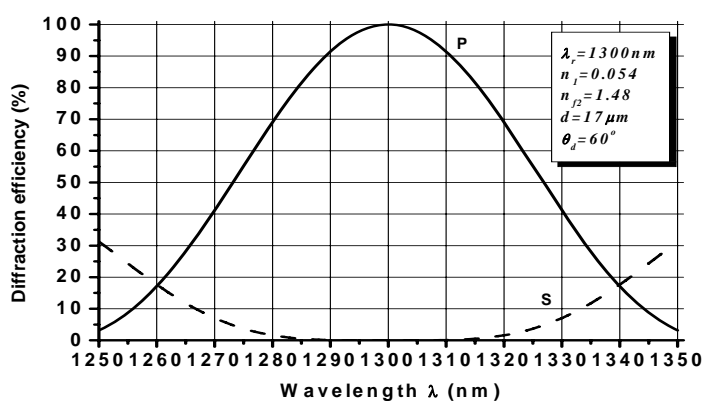


Fig. 3.18 全像空間偏離偏極器在鄰近中心工作波長 1300nm 之繞射效率。

3.5 小結

在本章中，介紹了傳統的光學循環器之架構、原理與特性；根據第二章中所介紹的全像空間偏離偏極器(HSWPs)，可用以取代傳統晶體式空間偏離偏極器的特性，加上本身HSWPs輕薄、密集、平行輸出/入等特點，設計了二維及三維偏極獨立的光學準循環器，其架構皆具有偏極獨立、密集、高隔離、低偏極模色散和易於製作等優點。此外，埠的數目亦可輕易地隨使用需求增減。



参考文献

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, *Optical networks*, 2nd ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, Chap. 3 (2002).
- [2] J. Hecht, *Understanding fiber optics*, 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, Chap. 14 (2002).
- [3] D. K. Mynbaev, and L. L. Scheiner, *Fiber-optic communications technology*, 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, Chap. 6 and 13 (2001).
- [4] H. Iwamura et al., "Simple polarisation-independent optical circulator for optical transmission systems," *Electron. Lett.* **15**, 830-831 (1979).
- [5] M. Shirasaki et al. "Compact polarization-independent optical circulator," *Appl. Opt.* **20**, 2683-2687 (1981).
- [6] I. Yokohama et al., "Polarisation-independent optical circulator consisting of two fibre-optic polarising beam splitters and two YIG spherical lenses," *Electron. Lett.* **22**, 370-372 (1986).
- [7] M. Koga, "Compact quartzless optical quasi-circulator," *Electron. Lett.* **30**, 1438-1440 (1994).
- [8] L. D. Wang, "High-isolation polarization-independent optical quasi- circulator with a simple structure," *Opt. Lett.* **23**, 549-551 (1998).
- [9] J. H. Chen et al. "Holographic spatial walk-off polarizer and its application to a 4-port polarization-independent optical circulator," *Opt. Express* **11**, 2001-2006 (2003).
- [10] Y. K. Chen et al., "Low-crosstalk and compact optical add-drop multiplexer using a multiport circulator and fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 1394-1396 (2000).
- [11] A. V. Tran et al., "A bidirectional optical add-drop multiplexer with gain using multiport circulators, fiber Bragg gratings, and a single unidirectional optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15**, 975-977 (2003).

- [12] Y. Sato and K. Aoyama, "OTDR in optical transmission systems using Er-doped fiber amplifiers containing optical circulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **3**, 1001-1003 (1991).
- [13] A. Othonos and K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," *Artech House Inc., Hardcover*, (1999).
- [14] J. Nicholls, "Birefringent crystals find new niche in WDM networks," *WDM Solutions* **3**, 51-53 (2001).
- [15] J. A. L'huillier et al., "Characterization and laser performance of a new material: 2 at. % Nd:YAG grown by the Czochralski method," *Appl. Opt.* **41**, 4377-4284 (2002).
- [16] http://www.fisk.edu/~aburger/Published03_06/index.html
- [17] K. P. Ho and S. K. Liaw, "Eight-channel bidirectional WDM add/drop multiplexer," *Electron. Lett.*, **34**, 947-948 (1998).
- [18] C. H. Kim, C. H. Lee, and Y. C. Chung, "Bidirectional WDM self-healing ring network on simple bidirectional add-drop amplifier modules," *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **10**, 1340-1342 (1998).
- [19] J. Kim and B. Lee, "Birectional wavelength add-drop multiplexer using multiport optical circulators and fiber Bragg gratings," *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **12**, 561-563 (2000).
- [20] B. J. Chang, "Dichromated gelatin as a holographic storage medium," *SPIE*, **177**, 71-81, (1979).

第四章 使用 Lyot-Öhman 濾波器的波長交織術

4.1 前言

自 1970 年代光纖發展成功之後，為了要能增加光纖網路的容量，且通訊用的頻寬日益吃緊的情況下，許多研究學者無不想盡方法提升光纖通訊系統的傳輸資訊量；一個光纖通訊系統，可被此三個方向所決定：頻寬(optical bandwidth)、頻道密度(channel density)以及頻道之中的訊號位元率(bit-rate per channel)，由 Fig. 4.1 [1]中可知，圖中三個因素所決定的體積可推測出該光纖網路所容納的資訊量。因此，為了提升光纖通訊系統中的資訊量，改善圖中任一參數，如訊號/接收端頻寬及資訊密度、光放大器頻寬補償、及光纖色散補償...等都是可行的辦法[2,3]之一，然而，在現階段中考量成本，以及目前已被架設在都會中的光纖環境，我們不難看出，雙向光纖網路的出現，等於增加光纖中的頻道密度，是目前較佳的選擇方法[4,5]之一。

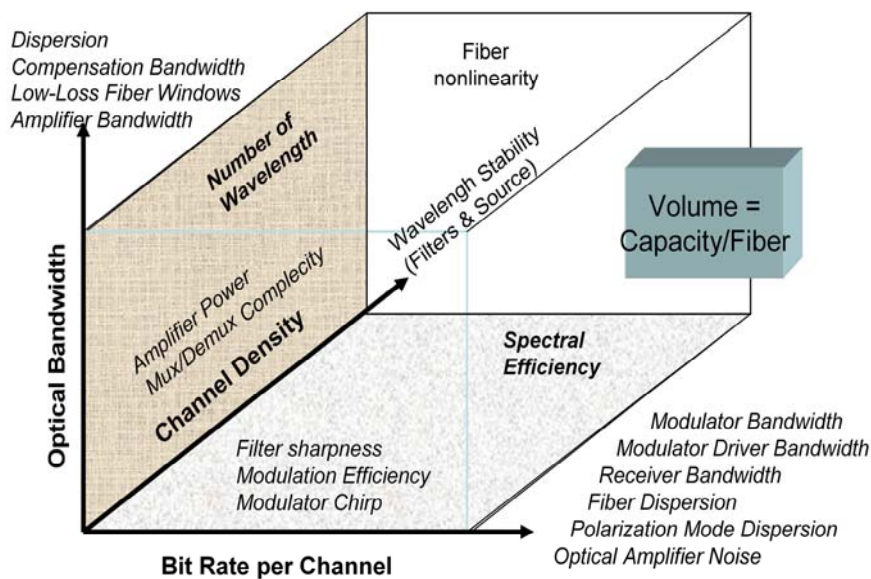



Fig. 4.1 決定光纖網路的資訊量三大因素[1]。

在現今的光纖發展中，為了充分使用有限的通訊頻寬，並且也為了能更完整地利用光纖放大器的有效增益頻寬，通訊信號中的頻道與頻道間隔也就愈來愈狹窄，當這些頻道間隔變窄，相對地，通訊系統中的密分波多工/解多工器(DWDM multi-/demultiplexer)在製作上也就需要變得更精密，導致整體系統需負擔更高成本；使用在本章中所提到的波長交織技術(wavelength interleaving technology)可解決此問題[6,7]，使用波長交織技術的通訊系統架構可大大地降低系統的成本，並舒緩系統中對於 DWDM 濾波元件的精密需求。

4.2 波長交織技術

4.2.1 特性



波長交織技術是一種可將多頻道混合在內的光訊號，透過濾波元件後，將頻道間隔為 f 的光訊號，以 $2f$ 、 $4f$ 、 $8f$...等頻道間隔分離開，並以個別的輸出方式由濾波元件輸出，亦稱為『群組濾波』。通常以此技術所製作的濾波元件，且能獨立地將群組訊號分別地由不同輸出端輸出的元件，稱之為 interleaver，以 Fig. 4.2 中所繪的 1×2 interleaver 為例，該元件能將訊號間隔為 50GHz 的訊號分離成 100GHz 的訊號，並分別地由兩種不同的輸出埠輸出，在習慣上，與該濾波元件的中心波長間隔 $(2m+1)f$ 的頻道組(m 為整數)，通稱為 odd-channel，與該濾波元件的中心波長間隔 $2mf$ 的頻道組，則通稱為 even-channel。除此之外，根據濾波元件的分波能力，亦有 1×4 interleaver、 1×8 interleaver 等元件紛紛被製作出[8]，如 Fig 4.3 與 4.4 所示。

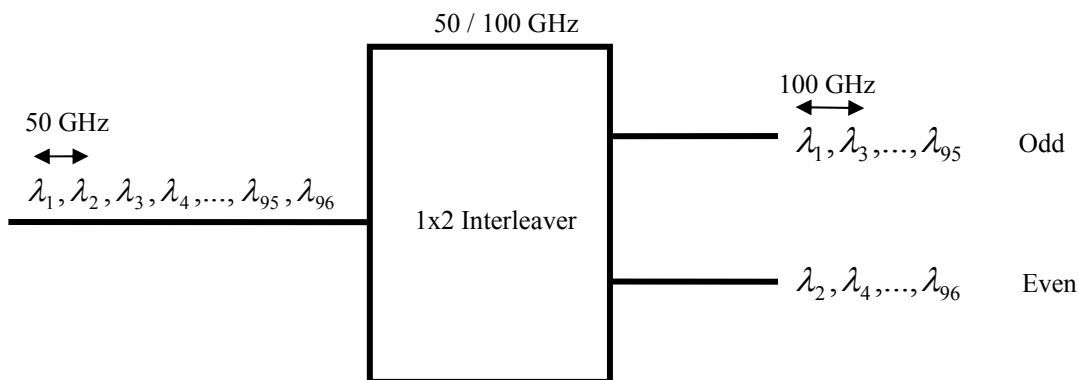


Fig. 4.2 Interleaver 可將週期性的波長訊號分離。

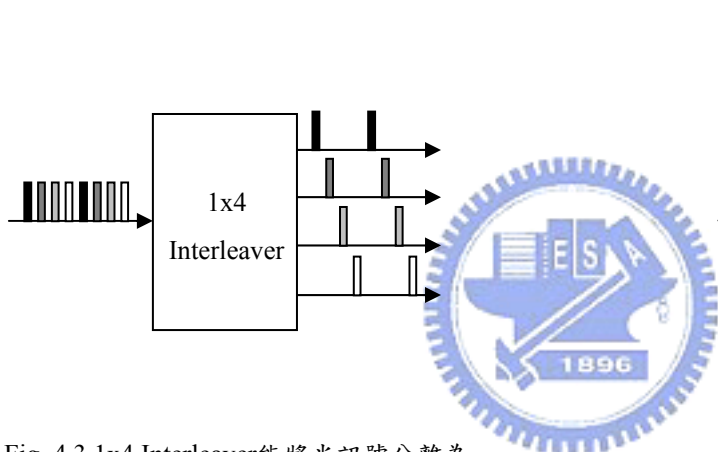


Fig. 4.3 1x4 Interleaver能將光訊號分離為四個群組輸出。

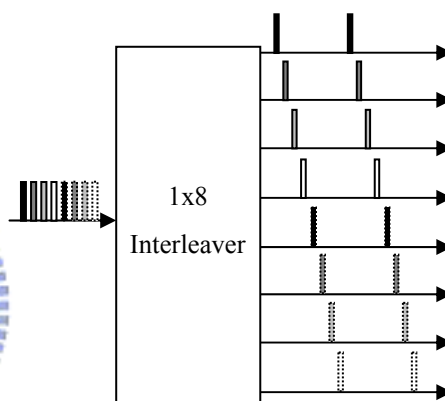


Fig. 4.4 1x8 Interleaver能將光訊號分離為八個群組輸出。

4.2.2 應用

面對目前超高密度的資訊量傳輸，許多已被鋪設的光纖可被 interleaving 技術增加其傳輸量密度[9]，常見的技術就是在訊號發送端，利用波長交織技術所做的 interleaver 交織兩組群組訊號，並在接收端使用 interleaver 分離該二群組，再使用解多工器解碼，如 Fig.4.5 所繪的架構，該系統中使用了 100GHz 的頻道間隔來傳送訊號，在發送端處使用了 50GHz 的 interleaver，讓兩個群組的訊號交織在一起後發送，並使用完全相同的 50GHz interleaver 分離兩個群組的訊號分離，然後以 100GHz 的姊多工器解調輸出，因此在相同的光纖中可多容納一倍的資訊量。

目前，許多的 interleaver 架構已被研究出來[9]，現階段有許多不同的濾波核心元件的設計，如：(1)晶體式濾波器(lattice filters)[10,11]，(2)Gires-Tournois 干涉儀(或稱 GT-based Michelson interferometer)[12]，以及(3)陣列波導路由器(array-waveguide router, AWG)[13-15]等架構；其中，GT-based 的架構架構如 Fig. 4.6 所示，在一個干涉儀其中一干涉臂上，使用了 GT 鏡組(Gires-Tournois mirror)來代替常見的全反射鏡，該鏡組可視做一個共振腔結構，其中一面鏡反射率為 100%而另一面具有較低的反射率，模組中的干涉臂臂長決定了通過 interleaver 訊號的週期間隔，而 GT 鏡組的反射率決定了濾波頻譜的平坦與否，此模組易有色散較大的問題。

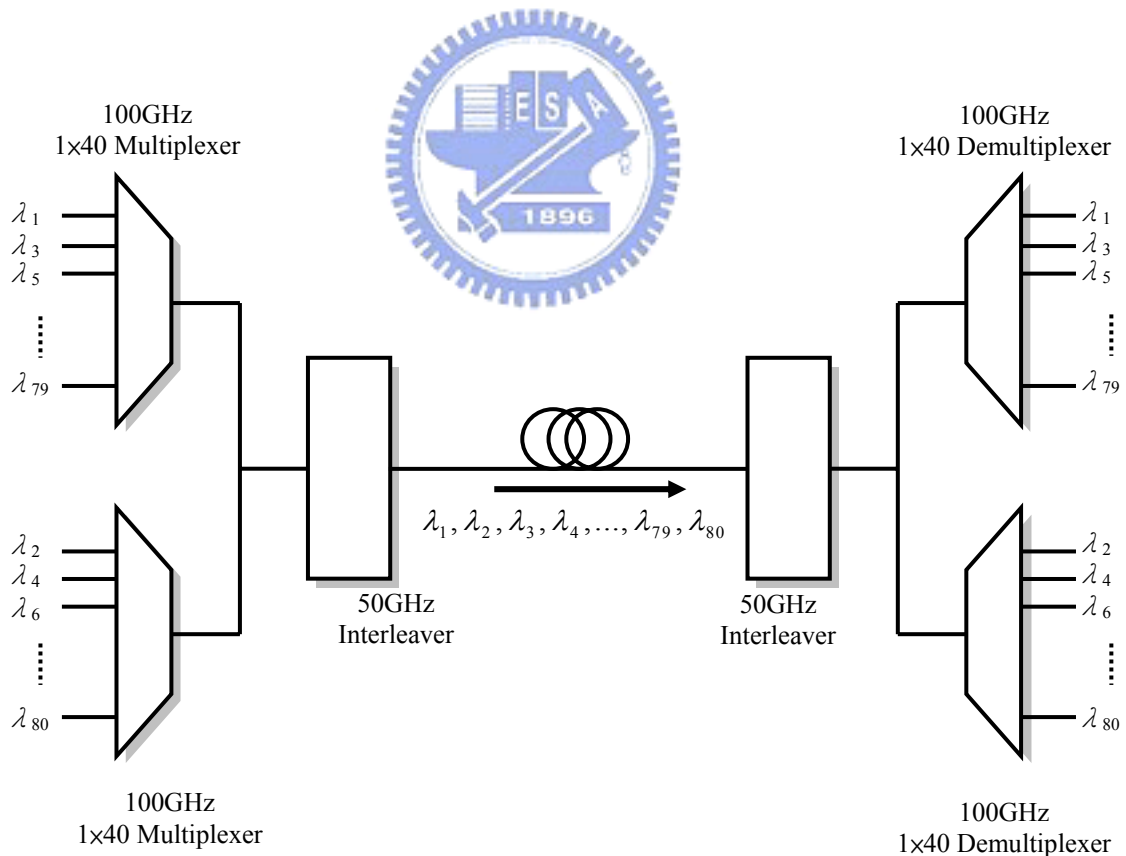


Fig. 4.5 利用 interleaver 可增加 DWDM 架構下的系統傳輸量

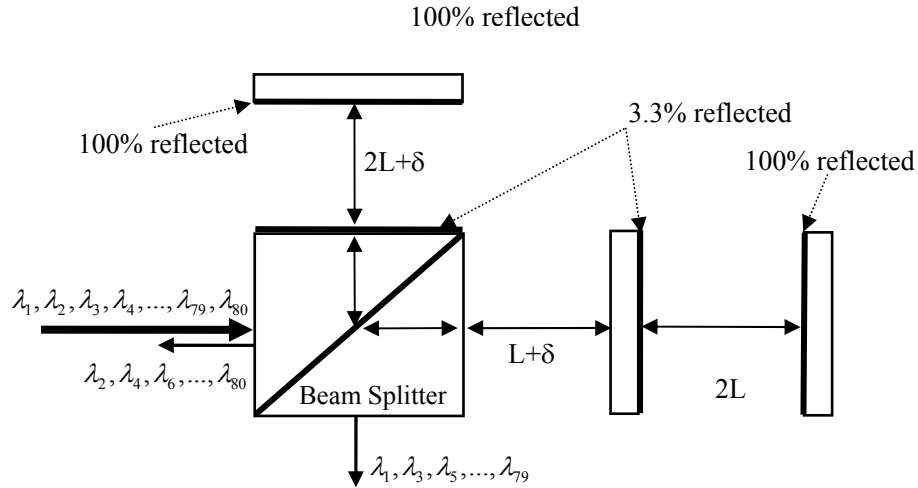


Fig. 4.6 GT-based Michelson interferometer 架構的 interleaver。

而 AWG 架構如 Fig. 4.7 中所示，原本該架構係使用單模光纖加上數個耦合器而得，目前 WaveSplitter 等公司仍有相關產品問世，此架構稱為 F³T (flat-top Fourier filter)，該架構中每個耦合器皆可視作一個 Mach-Zehnder 干涉儀，干涉臂臂長可決定該模組在群組濾波下的週期間隔，而耦合器的多寡則決定了濾波頻譜的平坦度，目前由於波導型的 Mach-Zehnder 干涉儀可在干涉臂上加入相位控制器或是移相元件，因此較為容易調整需要高精密度的干涉臂長差，此架構的缺點是插入損失大，且對訊號的偏極態較為敏感，除此此外，前述的兩種架構的 interleaver 皆容易因溫度改變而影響到濾波的效果，因此往往使用上會受到牽制。

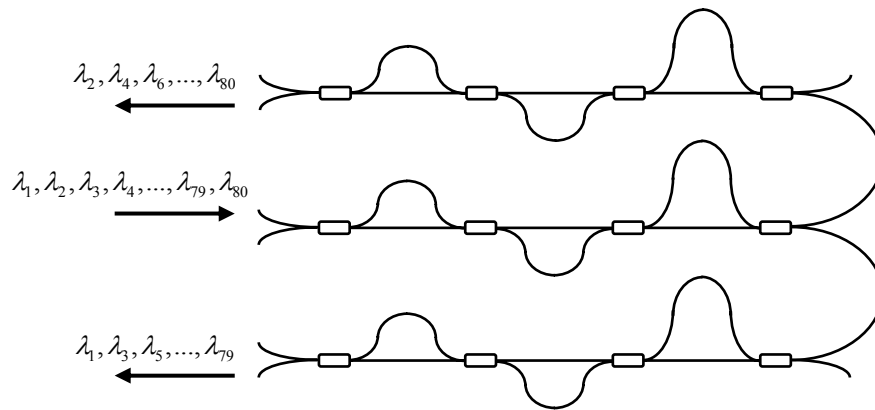


Fig. 4.7 運用 Mach-Zehnder 干涉之波導式架構的 interleaver。
(摘自 Hitachi Cable 公司的 50GHz flat-top interleaver)

而最後一種 lattice filters 的架構，主要是以雙折射晶體當做光延遲元件，使其達到群組濾波的效果，在這架構下亦有衍伸出類似於 AWG 架構使用 Mach-Zehnder 干涉儀 [10,11] 的方式，利用數個 delay elements 的串聯法，使其達成通頻(pass band)上的平整，一般稱為 flat-top，但缺點是當雙折射晶體有著大體積時較不利於量產，但是好處是與其他架構比較起來，晶體可利用溫度補償晶體的方式，省略額外的成本負擔在溫度的控制上。

除了上述幾種方法以外，另外也有以多層薄膜干涉的方式達到濾波的效果[16]，然而，此方式由於本身多層薄膜在製作上難以達到 50GHz 以上的高精密濾波效果，且成本昂貴與生產耗時，因此較不受歡迎。

4.3 Lyot-Öhman 濾波器

4.3.1 組成與原理



Lyot-Öhman[17-22] 濾波器為一個特殊的 Lattice filter，其功能為製作 1:2 interleaver[9,23-24] 的核心元件。該濾波器係由雙折射晶體以及半波片所組成，其原始架構如 Fig. 4.8 所示，其架構與 Fan Šolc filter[17,21,22] 類似，但在使用上有所差別：Lyot-Öhman filter 架構是以調整模組中波片快軸的角度來調整濾波頻譜的平坦度，而 Fan Šolc filter 則是調整雙折射晶體的角度來調整濾波頻譜的平坦度；在 Fig. 4.8 的模組中，所使用的雙折射晶體為了避免操作溫度所產生的影響，在光路上放置另一個材質不同且快軸方向與主雙折射晶體快軸方向互相垂直的溫度補償晶體，藉以優化最佳的濾波效果。

在 Fig. 4.8(a) 中，為一個最簡單的 Lyot-Öhman filter 架構，該架構由兩片半波片、與一個 YVO₄ 晶體及一個溫度補償晶體 TiO₂ 構成的 delay element 所組成，由於僅有一組

晶體組，為了利於分辨，依照晶體組的配置，此架構可稱為 1L 架構。在 Fig. 4.8(b) 中，為一個 L-2L 架構的 Lyot-Öhman filter，由於這個架構使用了較多的 delay element，在通頻(passband)上會比 1L 的架構擁有較佳的平坦度。圖中，兩個 Lyot-Öhman filter 的功能是相同的：輸入端以一個線性偏極光輸入，訊號光中的 even-channel，將不被改變偏極態輸出；而 odd-channel 則將被轉向為與原偏極光相互垂直的偏光狀態輸出。在相反方向的輸入下，even-channel 的訊號則將被旋轉偏極態，成為與原偏極態垂直之線性偏極光輸出，odd-channel 則保持原偏極態不變。

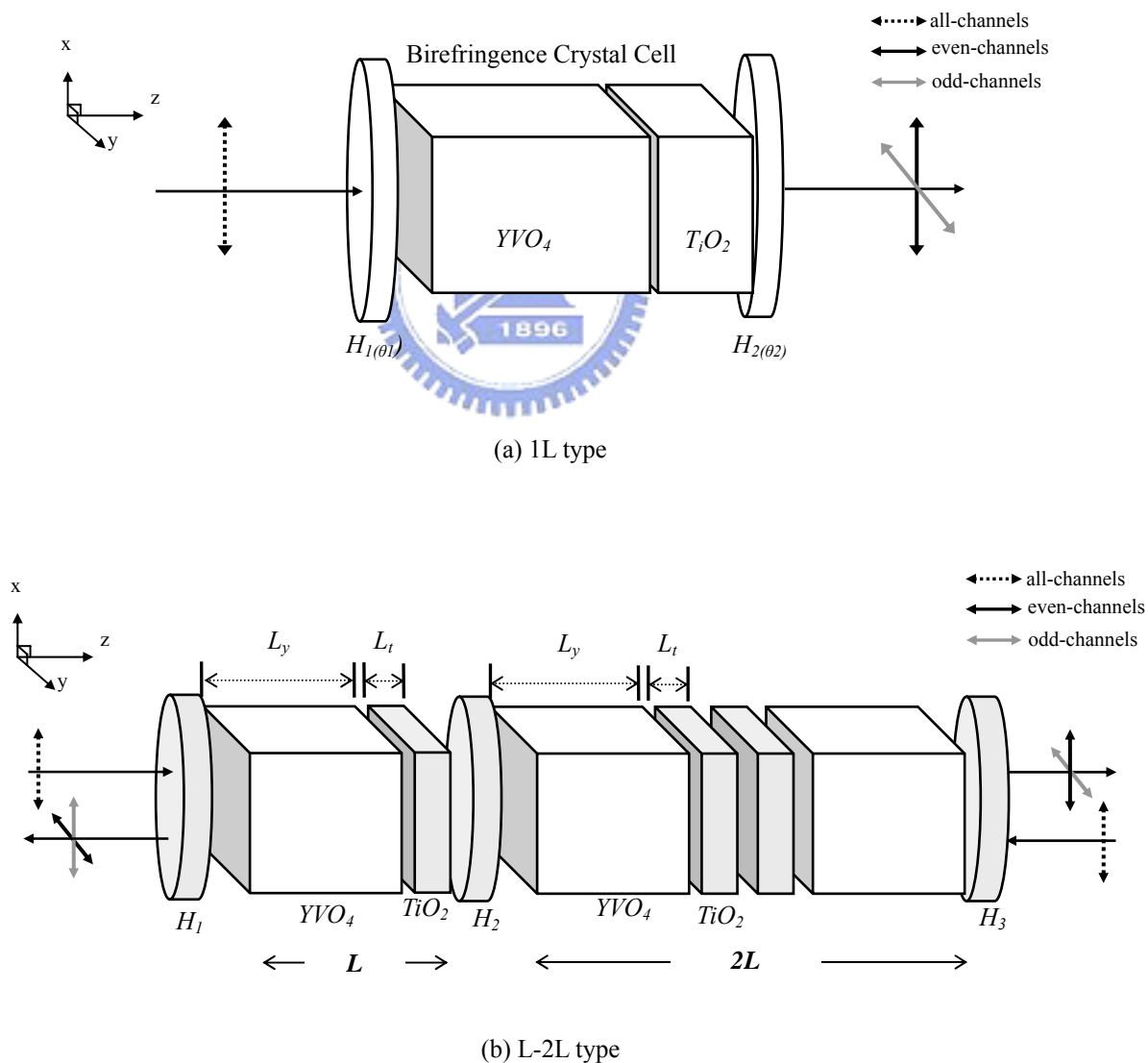


Fig. 4.8 Lyot-Öhman filter 的架構以及正反向輸入操作圖。

如 Fig. 4.8(a)所示，以忽略溫度補償晶體的前提下，在此先假設雙折射晶體組的長度為 L ，並定義入射 Lyot-Öhman filter 的電場 E_{in} 為

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4-1)$$

經過方位角為 θ_1 的半波片，訊號之電場形式可如下式所示，

$$\begin{aligned} E_1 = W_{hp1(\theta_1)} \cdot E_{in} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\pi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta_1 + e^{i\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta_1 \\ e^{-i\frac{\pi}{2}} \cos \theta_1 \sin \theta_1 - e^{i\frac{\pi}{2}} \cos \theta_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} = -i \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4-2)$$

其中， $W_{hp1(\theta_1)}$ 是方位角 θ_1 的半波片 H_1 之 Jones matrix；為了簡化問題，在設計時先不予考慮溫度補償晶體，而一個長度 L 的雙折射晶體的 Jones matrix 形式為

$$W_L = \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{bmatrix}, \quad (4-3)$$

其中，

$$\begin{aligned} \Gamma &= (n_s - n_f) \frac{\omega L}{c} = \Delta n \frac{\omega L}{c} \\ &= \pi \frac{f}{FSR}, \end{aligned} \quad (4-4)$$

在上式中， n_s 與 n_f 分別為雙折射晶體的慢軸與快軸的折射率， Δn 則為快、慢軸的折射率差， f 為通過的訊號光頻率， FSR 為入射訊號的頻道間隔 (free spectral range)。

將(4-4)式的結果代入下式，可得輸出電場 E_{out} ，

$$E_{out} = W_{hp2(\theta_2)} \cdot W_L \cdot W_{hp1(\theta_1)} * E_{in} = W_{hp2(\theta_2)} \cdot W_L \cdot -i \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4-5)$$

其中， $W_{hp2(\theta_2)}$ 為方位角 θ_2 的半波片 H_2 之 Jones matrix。將 $W_{H_2(\theta_2)} = -i \begin{bmatrix} \cos(2\theta_2) & \sin(2\theta_2) \\ \sin(2\theta_2) & -\cos(2\theta_2) \end{bmatrix}$

代入上式後，可將(4-5)式寫成

$$\begin{aligned} E_{out} &= -i \begin{bmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{bmatrix} \cdot -i \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{bmatrix} \\ &= - \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 e^{-i\frac{\Gamma}{2}} + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 e^{i\frac{\Gamma}{2}} \\ \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_2 e^{-i\frac{\Gamma}{2}} - \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2 e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4-6)$$

藉由(4-4)與(4-6)式，於 FSR 為已知的情況下，可以推得 Lyot-Öhman filter 的穿透譜分佈：

$$\begin{aligned} T_x &= |E_x|^2 \\ &= (\cos^2 2\theta_1 \cos^2 2\theta_2 + \sin^2 2\theta_1 \sin^2 2\theta_2) + 2(\cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2) \cos \frac{\pi f_c}{FSR}, \end{aligned} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} T_y &= |E_y|^2 \\ &= (\cos^2 2\theta_1 \sin^2 2\theta_2 + \sin^2 2\theta_1 \cos^2 2\theta_2) - 2(\cos 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2) \cos \frac{\pi f_c}{FSR}, \end{aligned} \quad (4-8)$$

為了要能得到接近理想的穿透譜，方位角 $\theta_i (i=1,2)$ 可取特殊條件來近似 square Fourier 級數所描繪的圖形，為了達到此條件，我們設(4-7)、(4-8)式中的第一項為 1/2，便可計算得 $\theta_1 = \theta_2 = 22.5^\circ$ ，代入式(4-7)、(4-8)中可得方程式為

$$\begin{aligned}
T_x &= \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi f_c}{FSR} \right) \\
&= \begin{cases} 1 & f = f_c \pm 2m \cdot FSR \\ 0 & f = f_c \pm (2m+1) \cdot FSR \end{cases}
\end{aligned} \tag{4-9}$$

$$\begin{aligned}
T_y &= \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi f_c}{FSR} \right) \\
&= \begin{cases} 0 & f = f_c \pm 2m \cdot FSR \\ 1 & f = f_c \pm (2m+1) \cdot FSR \end{cases}
\end{aligned} \tag{4-10}$$

在上式中， m 為整數，可證明當一 x 偏光沿 z 軸入射至 Lyot-Öhman filter，在 even-channel ($f_c \pm 2m \cdot FSR$) 時，訊號光將維持與原入射光相同的偏極態(即 x 軸向直線偏極態)射出，而 odd-channel ($f_c \pm (2m+1) \cdot FSR$) 的訊號偏極態則與原入射光偏極態正交(y 軸向直線偏極態)；同理可證，我們將反向的訊號經過 Lyot-Öhman filter 中，可得 odd-channel 的訊號將與原入射光偏極態相同，even-channel 的訊號的偏極態與原入射光偏極態正交。

進一步地，為了能夠估算出雙折射晶體組的晶體厚度，本文在此所選擇的雙折射晶體與溫度補償晶體分別為 YVO_4 (Yttrium orthovanadate) 與 TiO_2 (Rutile)，同樣地，針對操作在中心波長 1550nm 的訊號頻寬之下，兩個晶體的快軸與慢軸的折射率差值分別為 $\Delta n_1=0.21396$ (CASIX Inc.) [25]， $\Delta n_2=0.2652$ (Marketch International Inc.) [26]，為了能夠達到溫度改變而濾波效果仍能維持相同的條件，各晶體的厚度可藉由下列二式推得：

$$\Delta n_1 L_1 - \Delta n_2 L_2 = \frac{c}{2ITU} = \frac{c}{FSR}, \tag{4-11}$$

$$\Delta n_1 L_1 \beta_1 - \Delta n_2 L_2 \beta_2 = 0, \tag{4-12}$$

$$\beta \equiv \frac{d\lambda}{\lambda_c dT} \left(= \frac{d\Delta n}{\Delta n dT} + \frac{dL}{L dT} \right), \tag{4-13}$$

其中，晶體溫度係數分別為 $\beta_1=-26.54\times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ 與 $\beta_2=-99.06\times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ ， λ_c 為使用頻寬的中心波長， m 為正整數，在此，為了設計出擁有 50GHz 頻道密度的交織能力，中心波長 1550nm、 $m=1$ ，以及 $FSR=100\text{GHz}$ 代入，計算得最短晶體厚度分別為 $L_1=9.57\text{mm}$ 與 $L_2=2.068\text{mm}$ 。利用所得的參數在 1L 架構中，以 x 方向偏極光正向入射且涵蓋整個 C-band (1530nm~1565nm) 的訊號，針對 y 方向偏極光的輸出訊號做模擬，其結果如 Fig. 4.9 所示，y 方向偏極光的分量上僅剩下 odd-channel 訊號。進一步地，為了證明晶體個數與濾波訊號的平坦度之關係，在此另針對 L-2L 的 Lyot-Öhman filter 模擬，其規格及輸入訊號與 Fig. 4.9 之條件相同，針對 x 方向偏極光的輸出，在 Fig. 4.10 中可得知，在 x 方向偏極光的分量上僅剩下 even-channel 訊號。

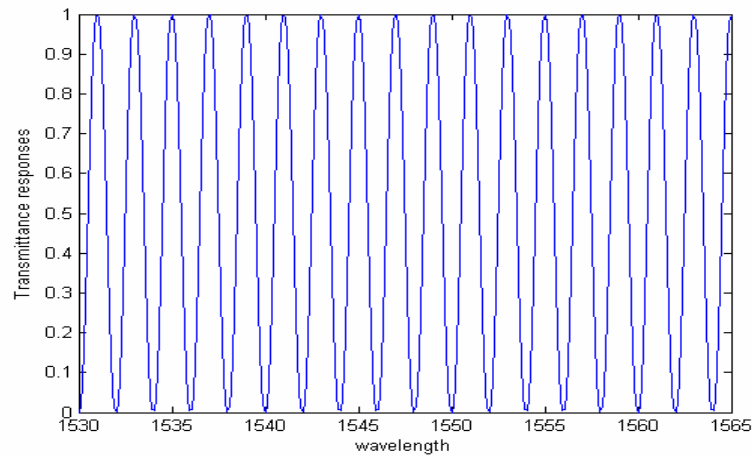


Fig. 4.9 1L 架構下的 y 方向偏極光輸出譜。

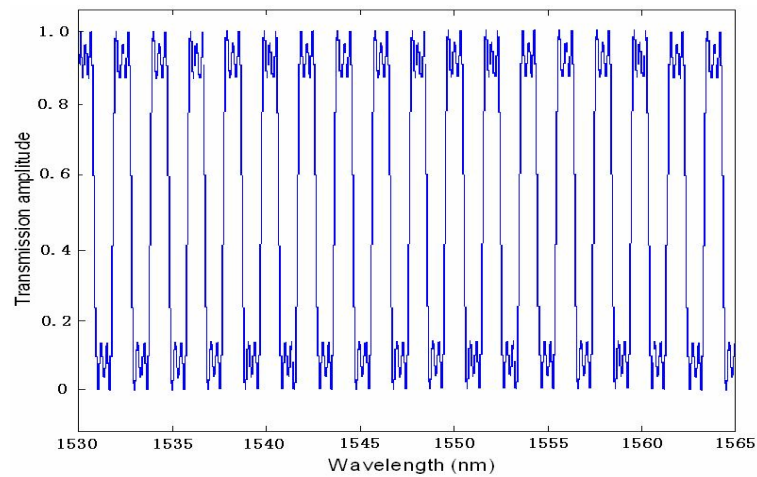


Fig. 4.10 L-2L 架構下的 x 方向偏極光輸出譜。

4.3.2 相關參數

利用 Lyot-Öhman 濾波器所製作的 interleaver 目前皆用在現有的光纖通訊系統中 [27]，所以其規格自然也跟隨著常見的光通訊元件之協定，以下是以目前光纖通訊規格為出發點，所討論相關於 interleaver 的參數需求[9]：

- (1) 色散(dispersion)：現有的 interleaver 皆被控制在 ± 20 ps/nm 的範圍內，但由於 lattice filter 的架構擁有較低的色散，可被控制在 ± 15 ps/nm 以下。
- (2) 頻道間隔(channel spacing)：為了能夠符合現有 ITU 通訊規格的主流，一般的 1x2 interleaver 通常以 50GHz 作默認值；而 1x4、1x8 interleaver...等特殊規格者則以 50GHz 的整數倍數決定；在目前已被發展出的設計中，Gires-Tournois 架構可設計出 6.25GHz~200GHz 的頻道間隔，其餘的設計架構可製作出 25GHz~200GHz 的頻道間隔。
- (3) 插入損失(insertion loss)：由於雙折射晶體本身透光率較差，在厚度相對較高的 L-2L 架構下，約為 1.5dB 左右，單純的 1L 架構約為 0.7dB，但因 L-2L 架構的濾波效果較佳，故 L-2L 架構較為實用。
- (4) 隔離值(isolation)：在 DWDM 系統下，針對多工器(multiplexer)的需求，常見的規格不可低於 14dB，解多工器(demultiplexer)則要求較高，約在 25dB 左右方可解調。
- (5) 通頻(passband)：由於 Lyot-Öhman 濾波器需要靠雙折射晶體組成的 delay cell 做濾波，因此，delay cell 愈多，通頻就愈平坦；以業界可用的標準而言，一般在-0.5dB 的規格下，通頻約 ± 0.08 nm (± 10 GHz)，在-3dB 的要求下，通頻則約 ± 0.1282 nm (± 16 GHz)，此規格亦被頻道間隔所決定。
- (6) 操作溫度：一般光纖系統中通用的商業規格為 -5° ~ $+70^{\circ}$ C，但是 AWG 架構下的 interleaver 則需恆溫方有理想的濾波效果。
- (7) 偏極模色散(polarization mode dispersion, PMD)：在一個理想的光纖通訊元件中，偏極模色散應低於 2ps[24]，而 interleaver 除了 AWG 架構擁有 ~ 0.3 ps 的 PMD 外，其餘

架構皆擁有 $<0.2\text{ps}$ 的 PMD 之能力。

- (8) 頻寬(bandwidth)：理想上需涵蓋整個通訊頻寬，如 C-band (1530nm~1565nm)等，以 Lyot-Öhman filter 為例，該濾波器可完整的涵蓋 C-band，並具有極為優異的平坦度。

4.4 討論

Lyot-Öhman filter 雖可將波長交織或分離，但是對輸入該濾波器的訊號卻有偏極選擇性，若在輸入端送入非偏極光訊號，則在輸出端上仍無法將兩組群組訊號分離出，因此，要能達到偏極獨立的波長交織濾波，Lyot-Öhman filter 尚需搭配具有偏離偏極能力的模組，才可將非偏極光訊號整理成線性偏極光輸入/出。

此外，與其他波長交織術的架構相比，Gires-Tournois 架構的可用頻寬較小，而利用 Mach-Zehnder 原理的架構則對偏極敏感性較高，陣列波導架構則對溫度變化敏感，因此，Lyot-Öhman filter 在使用上較為穩定，且頻寬亦為所有架構中最廣泛的。

4.5 小結

在本章中介紹了波長交織術與 Lyot-Öhman filter。由於光纖通訊本身應用非常的廣泛，但是頻寬在今日日趨飽和的情況下，如何能夠提升資訊的傳輸量是令人關切的問題，波長交織術提供了一個極為有效的解決方案，該方法可將兩組不同的訊號編入更為密集的群組訊號中傳輸，利用此方法不但可增加現有光纖的傳輸容量，也避免的分波多工/解多工器在高密集訊號處理的精確度與成本問題。

本章中所提到的 Lyot-Öhman filter，其本身具有光學群組濾波的能力，但卻有偏極選擇的問題，本章中在此詳述通過該濾波器的原理以及特性：輸入的線性偏極光訊號，可被 Lyot-Öhman filter 將輸入訊號分割成 odd-channel 以及 even-channel 兩部份，並分別地以兩個相互正交的偏極態輸出，此外，本章中也模擬了實際操作在 C-band 下，以 Lyot-Öhman filter 作為濾波核心的 interleaver 之效能。



参考文献

- [1] Ivan Kaminow, Tingye Li, *Optical Fiber Telecommunications IVB, systems and impairments*, Academic press, chap. 12 (2002).
- [2] D. K. Mynbaev, and L. L. Scheiner, *Fiber-optic communications technology*, 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, chap. 6 and 13 (2001).
- [3] J. Hecht, *Understanding fiber optics*, 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, Chap. 14-16 (2002).
- [4] A. Fabert, G. Mohs, S. Spalter, J. P. Elbers, C. Furst, A. Schopflin, E. Gottwald, C. Scheerer, and C. Glingener, "7Tb/s (176×40 Gb/s) bidirectional interleaved transmission with 50 GHz channel spacing," *ECOC, Tech. Dig.*, PD 1-3 (2000).
- [5] K. Aida, H. Masuda, and K. Nakagawa, "Bi-directional Repeatered Transmission Over 400 km Using Gain Stabilized Linear Repeaters," *Opt. Commun.* **2**, 169-172 (1996).
- [6] J. C. Chon, C. H. Huang and J. Bautista, "Ultra small dispersion, low loss, flat-top, and all fiber DWDM and NWDM devices for high speed optical network applications," *European Conference on Optical Communication 2000*, paper 11.3.1 (2000).
- [7] C. H. Huang, Y. Li, J. Chen, E. Sidick, J. Chon, K. G. Sullivan, and J. Bautista, "Low-loss flat-top 50GHz DWDM and add/drop modules using all-fiber Fourier filters," *NFOEC 2000*, 311-316 (2000).
- [8] WaveSplitter Technologies Inc., <http://www.wavesplitter.com/>.
- [9] S. Cao, J. Chen, J. N. Damask, C. R. Doerr, L. Guiziou, G. Harvey, Y. Hibino, H. Li, S. Suzuki, K.-Y. Wu, and P. Xie, "Interleaver technology: comparisons and applications requirements," *J. Lightwave Technol.*, **22**, 281-289 (2004).
- [10] M. Oguma, K. Jinguji, T. Kitoh, T. Shibata, and A. Himemo, "Flay-pass-band interleave filter with 200GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure," *Electron, Lett.*, **36**, 1299-1300 (2000).

- [11] K. Jinguji and M. Oguma, "Optical half-band filters," *J. Lightwave Technol.*, **18**, 252-259 (2000).
- [12] B. Dingel and M. Izutsu, "Multifunction optical filter with a Michel-sn-Gires- Tournois interferometer for wavelength-division-multiplexed system applications," *Opt. Lett.*, **23**, 1099-1101 (1998).
- [13] C. Dragone, "Planar 1×N optical multiplexer with nearly ideal response," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 1545-1547 (2002).
- [14] K. Okamoto and A. Sugita, "Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic horns," *Electron. Lett.*, **32**, 1661-1662 (1996).
- [15] M. R. Amersfoort, J. B. D. Soole, H. P. Leblanc, N. C. Andreadakis, A. Rajhel, and C. Caneau, "Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers," *Electron. Lett.*, **32**, 449-451 (1996).
- [16] H. Chen, P. Gu, Y. Zhang, H. Li, and L. Xu, "Optical interleaver based on multicavity Fabry-Perot thin film filter," *Proc. SPIE*, **4906**, 561-566 (2002).
- [17] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, New York: Wiley-Intersci.; Wiley, Chap. 5, 151 (2003).
- [18] B. Lyot, "Optical apparatus with wide field using interference of polarized light," *C. R. Acad. Sci, Paris*, **197**, 1593-1 (1933).
- [19] S. E. Harris, E. O. Ammann, and I. C. Chang, "Optical network synthesis using birefringent crystals. I. Synthesis of lossless networks of equal length crystals," *J. Opt. Soc. Amer.*, **54**, 1267-1279 (1964).
- [20] J. W. Evans, "The birefringent filter," *J. Opt. Soc. Amer.*, **39**, 229-242 (1949).
- [21] I. Solc, "Birefringent chain filters," *J. Opt. Soc. Amer.* **55**, 621 (1965).
- [22] W. J. Rosenberg and A. M. Title, "Solc filter engineering," *SPIE Polarizers and Applications*, **307**, 106-111 (1981).
- [23] *Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid*, International

Telecommunication Union Std. ITU-T G.694.1 June (2002).

[24] C. K. Madsen and J. H. Zhao, *Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach*. New York: Wiley-Intersci.; Wiley, Chap. 7, 326 (1999).

[25] CASIX Inc., http://www.casix.com/product/prod_cry_yvo4.html

[26] Marketech International Inc., <http://www.marketech-crystals.com/pages/alphadir.htm>.

[27] M. F. Huang, J. Chen, J. Yu, S. Chi, and G. K. Chang, "A novel dispersion-free interleaver for bidirectional DWDM transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, **25**, 3543-3554 (2007).



第五章 四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器

5.1 前言

在傳統的單向光纖傳輸中，在同一條光纖中所有光訊號傳送方向是一致的，相反方向的訊號傳輸則需要配置另一條光纖來達成，因此目前有許多學者考慮到，若能以單一光纖同時完成雙向的傳輸，則現有已被架設的都會網路，甚至是更遠程的光纖網路，便能做傳輸容量的升級。

而要組成一個完整雙向的通訊系統，往往需使用光學循環器交換訊號或做訊號導向[1-5]，此外，現今單向光纖網路與雙向網路的連結上，若能以雙向的光學循環器做訊號交換，可以簡化網路的複雜度以及簡化網路升級的難度[1]，如 Fig. 5.1 所示，這是本論文的目標所在；在 Fig. 5.1 中，每個小黑點表示一個網路節點，虛線的上半部份為全雙向網路，下方則為舊有的單向網路，兩個網路的傳輸資訊則由圖中的 common port 所聯繫，以此類推，可將單向的環型網路逐漸地轉換為雙向網路。

本論文在第三章中介紹了改良式的光學循環器[6,7]，該模組中以全像空間偏離偏極器來取代原本在傳統光學循環器的偏離偏極元件[8]，得以將循環器模組優化。第四章中亦介紹了以 Lyot-Öhman filter[9]作核心的波長交織術[10,11]，有鑑於此，基於相同的想法與概念，在此本文延伸為雙向光學循環器的設計基礎。

本章在此介紹一個四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器設計，該設計主要使用一對具有獨特操作特性之三維全像空間偏極模組(3D- holographic spatial- and polarization- modules, 3D-HSPMs)，對入射光之 s-和 p-偏極分量進行操控，除了 3D-HSPMs 外，其組成尚包含 Lyot-Öhman filter，用以將兩端入射的線性偏極光訊號，

依模組所選擇的頻道間隔分離出兩種不同的頻道群組，並分配在兩種相互垂直的偏極態輸出，因此在雙向傳輸上可避免同頻道卻方向相反的訊號相互影響，該模組同時兼具了 interleaver 以及光學循環器的兩種特性，因此可用作單-雙向光纖網路聯結。

為了驗證該設計的可行性，本章中亦組裝了適用於波長 1550nm 之四埠波長交織雙向光學循環器模組。並同時在本章中討論此元件之操作原理以及效能。此波長交織雙向循環器的設計具有偏極獨立(polarization-independence)、密集(compactness)、高隔離(high isolation)、低偏極模色散(low polarization mode dispersion, PMD)和易於製作(easy fabrication)等優點。

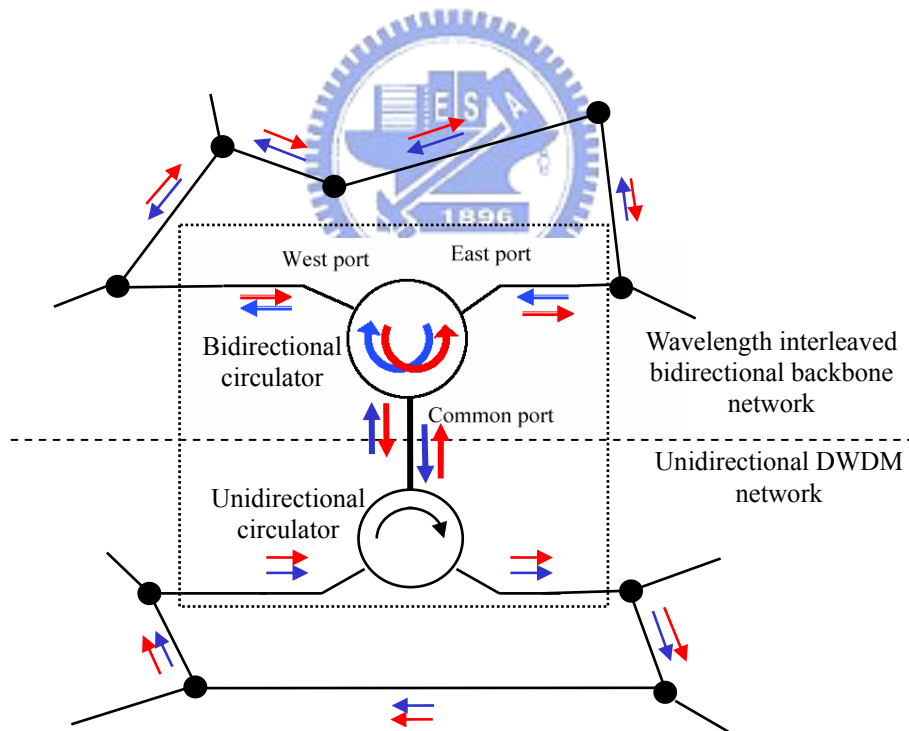


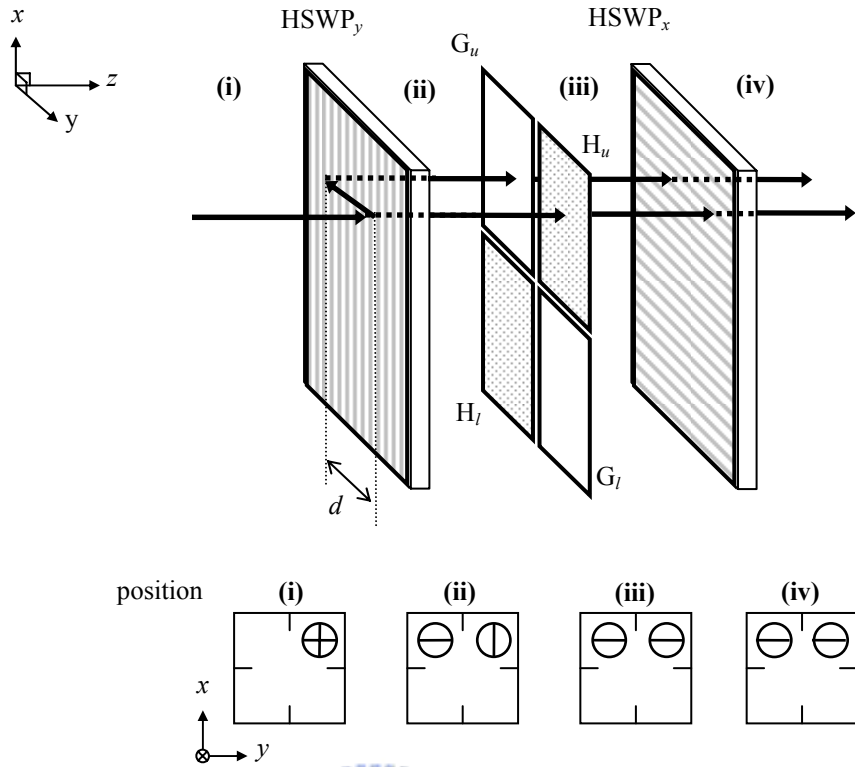
Fig. 5.1 運用雙向循環器用做雙向網路與單向網路之連結。

5.2 三維全像空間偏極模組

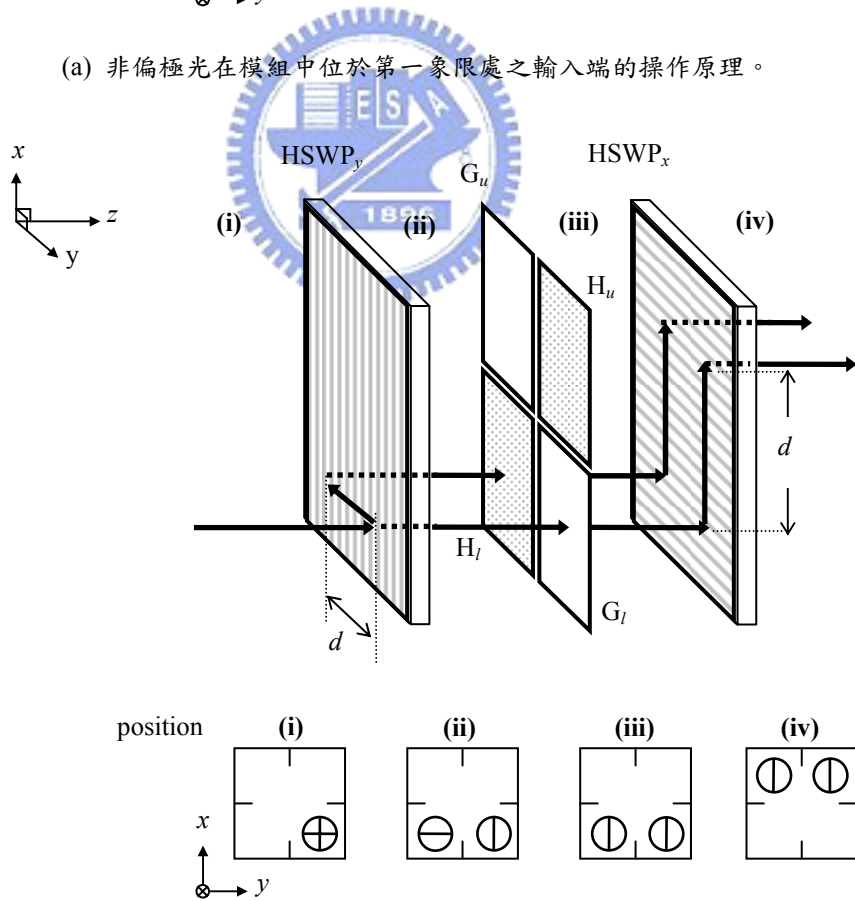
在本章中所提的四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器中，需使用三維全像空間偏極模組(3D-HSPMs)，此模組係利用了全像空間偏離偏極器的特性，使訊號光的 s-、p-偏光能在空間中結合或分離，在此節中將詳細地介紹這個模組的架構與特性。

在第三章中討論了全像空間偏離偏極器的構造與特性，該模組係利用基片型體積全像片以特殊曝光條件所製成的偏極選擇元件，可將非偏極光分離成二道偏光狀態互相垂直的光訊號平行輸出，且出射光與原入射光的方向相同；利用該元件的特性，可設計一個三維全像空間偏極模組，其架構如 Fig. 5.2 及 Fig. 5.3 所示，模組中包含了兩片全像空間偏離偏極器 HSWP、兩片二分之一波片 H，以及薄玻璃片 G 等，所有元件皆擺置在 xy 平面上，下標 u 、 l 則用以表示該元件在上方及下方的位置；在圖中，HSWP_x 表示全像空間偏離偏極器中所記錄的全像光柵，將對 x 軸向的偏極光作用，且偏光位移的方向為沿著 x 軸位移距離 d ，HSWP_y 則表示對 y 軸向的偏極光作用，並在 y 軸上位移 d ；二分之一波片 H _{u} 、H _{l} 的方位角與 x 軸夾角 45°，該元件的作用是扮演著將通過的線性偏極光之偏極狀態(States of polarization)在 x-、y-軸之間互相做轉換。為了使模組中避免偏極模色散(polarization mode dispersion, PMD)的產生，我們擺放了薄玻璃片 G _{u} 、G _{l} ，該玻璃片與二分之一波片具有相同的光學厚度，使未通過二分之一波片的訊號光仍保有與通過波片的訊號光相同的延遲。

每個三維全像空間偏極模組皆擁有兩個輸入端以及輸出端，在 Fig. 5.2 中，全像偏離偏極器的乳劑面向 -z 方向，其作用可將非偏極光的訊號分離成兩部份，在 Fig. 5.2 中，我們把模組中的空間分成(i)、(ii)、(iii)、(iv)四處，並針對每個空間上，將往+z 方向上的訊號光之偏極態，以 \oplus 表示非偏極光， \odot 和 \ominus 分別表示偏極方向在 x-軸及 y-軸的線性偏極光，繪於模組架構的下方，並將每個模組空間中的 xy 平面分為四個象限表示，以便於了解其位置關係。



(a) 非偏極光在模組中位於第一象限處之輸入端的操作原理。



(b) 非偏極光在模組中位於第四象限處之輸入端的操作原理。

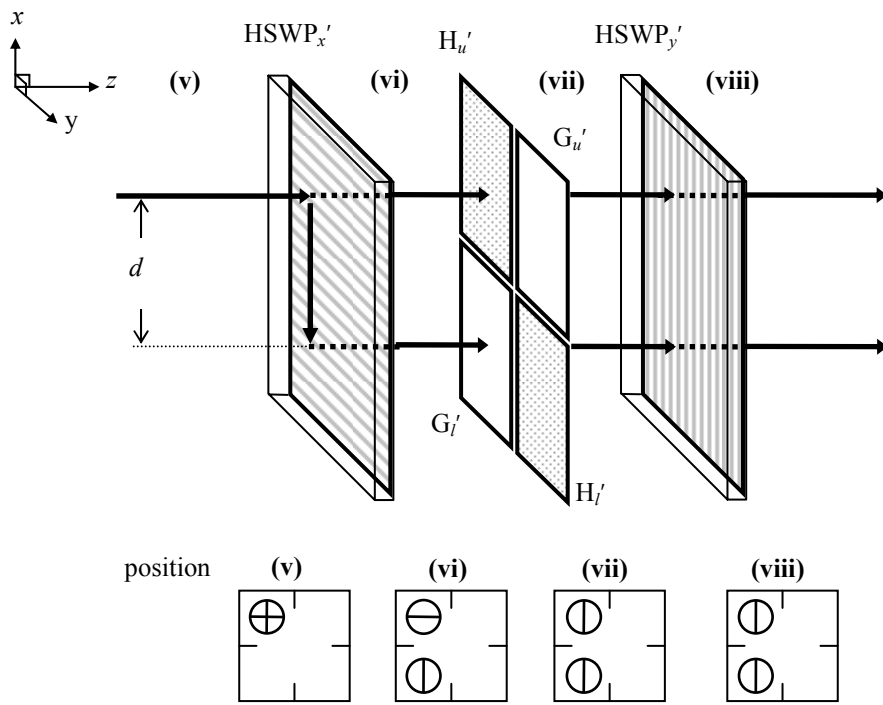
Fig. 5.2 乳劑面向-z 擺置的三維全像空間偏極模組操作圖。

在 Fig. 5.2(a) 中，一非偏極光以 $+z$ 方向入射至模組的上端，其輸入端位於 xy 平面上的第一象限，其相對位置與偏極態被標示在該圖的下方處，在經過 HSWPy 後，訊號光被分離成兩道偏極態相互垂直的訊號光，其中 y -方向的偏極光在 y 軸上位移 $-d$ ，並沿著 $+z$ 方向入射至 G_u 中；而 x -方向的偏光則沿原路徑直進，在通過 H_u 後， x -方向的偏極光將被改變為 y -方向的偏極光，後與另一道 y -方向偏極光入射至 HSWPx 中。由於 y -方向的偏極光不對 HSWPx 作用，故兩道訊號光仍保持相同的偏極態，並在第一、第二象限處出射。

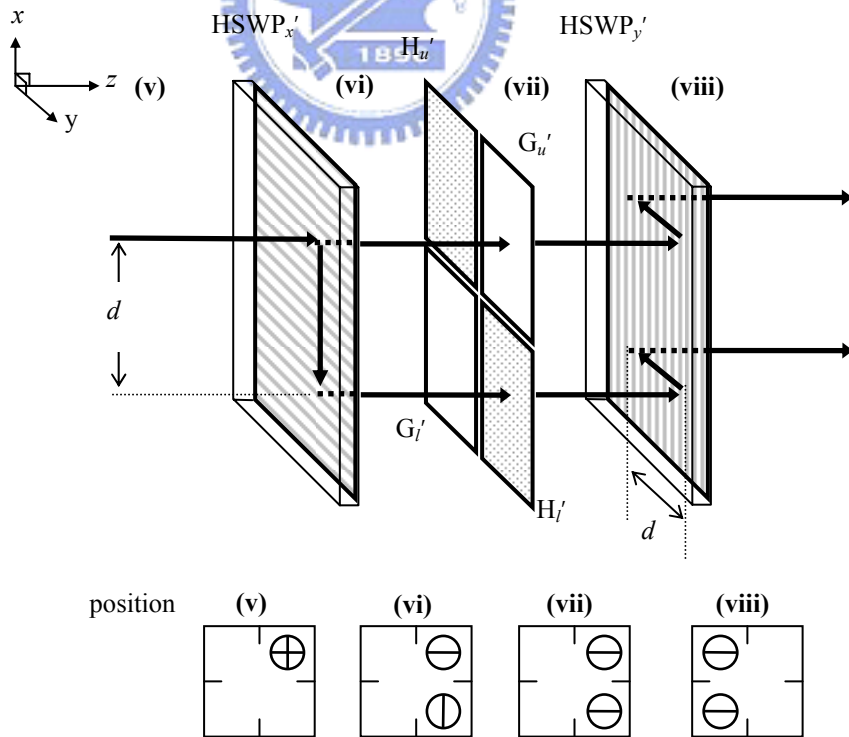
在 Fig. 5.2(b) 中，非偏極光以 $+z$ 方向入射至模組的下端處，該輸入端位於 xy 平面上的第四象限，經過 HSWPy 後，訊號光亦被分離成二相互垂直的偏極光，其中 y -方向的偏極光在 y 軸上位移 $-d$ ， x -方向的偏極光則筆直前進，且在穿過 G_l 後入射至 HSWPx；被位移後的 y -方向偏極光在通過 H_l 後， y -方向的偏極光將被改變為 x -方向的偏極光，並入射至 HSWPx。由於 HSWPx 對這兩道 x -方向的偏極光作用，因此這二訊號光將在 x 軸上位移距離 d ，並於 Fig. 5.2(a) 中相同的輸出端上輸出。

在 Fig. 5.3 中為 Fig. 5.2 中的三維全像空間偏極模組對 x 軸倒轉 180° ，使乳劑面向 $+z$ 方向擺置，模組內部元件的相對位置並未改變。為了與 Fig. 5.2 加以區別，模組上所有元件均加上『 $'$ 』記號，本三維全像空間偏極模組亦可視為 Fig. 4.1 中的模組的反向輸入。

在 Fig. 5.3(a) 中，同樣地，令一非偏極光在 xy 平面上的第二象限處之輸入端入射，訊號光被 HSWP' x 以相似於正向入射的原理分離成兩道偏極態相互垂直的訊號光，其中， x -方向的偏極光對 HSWP' x 作用而在 x 軸上位移距離 $-d$ ，而後經過玻璃片 G_l' 入射至 HSWP' y ；而 y -方向的偏極光分量則不對 HSWP' x 作用，在通過 HSWP' x 後入射至 H_u' 並被轉換為 x -方向的偏極光。由於 x -方向的偏極光不對 HSWP' y 作用，故兩道偏極光分別直接輸出在第二、三象限上的輸出端上。



(a) 非偏極光在 MSPM' 模組中位於第二象限處之輸入端的操作原理。



(b) 非偏極光在 MSPM' 模組中位於第一象限處之輸入端的操作原理。

Fig. 5.3 乳劑面向+z 擺置的三維全像空間偏極模組操作圖。

在 Fig. 5.3(b)中，一非偏極光在對應於 xy 平面上的第一象限處輸入，訊號光如同 Fig. 5.3(a)中被 HSWP' x 分離成兩道偏極態相互垂直的訊號光， x -方向的偏極光在 x 軸上被位移距離 $-d$ ，而 y -方向的偏極光則筆直前進，在下方處的 x -方向的偏極光將被 H/轉換為 y -方向的偏極光，兩道 y -方向的偏極光將入射至 HSWP' y ，由於 y -方向的偏極光對 HSWP' y 作用，因此兩道光皆在 y 軸上被位移 $-d$ ，並分別在第二、三象限上輸出。

根據上述的操作原理，在此可歸納出本模組的操作，如 Fig. 5.4 所示，分別為正向 (3D-HSPM)入射以及反向(3D-HSPM')入射的模式，Fig. 5.4 中，當入射光沿 $+z$ 方向入射，且入射處位於 xy 平面上的第一、四象限處之非偏極光，分別在圖中以藍、紅兩種顏色表示其訊號，在通過該模組後將分別被轉換成兩道 y -方向偏極光及 x -方向偏極光，並同於第一、三象限處輸出；而訊號光沿 $-z$ 方向入射時，位於第一、二象限入射的非偏極光，則分別在第二、三象限處分別以 y -方向、 x -方向的偏極態輸出。

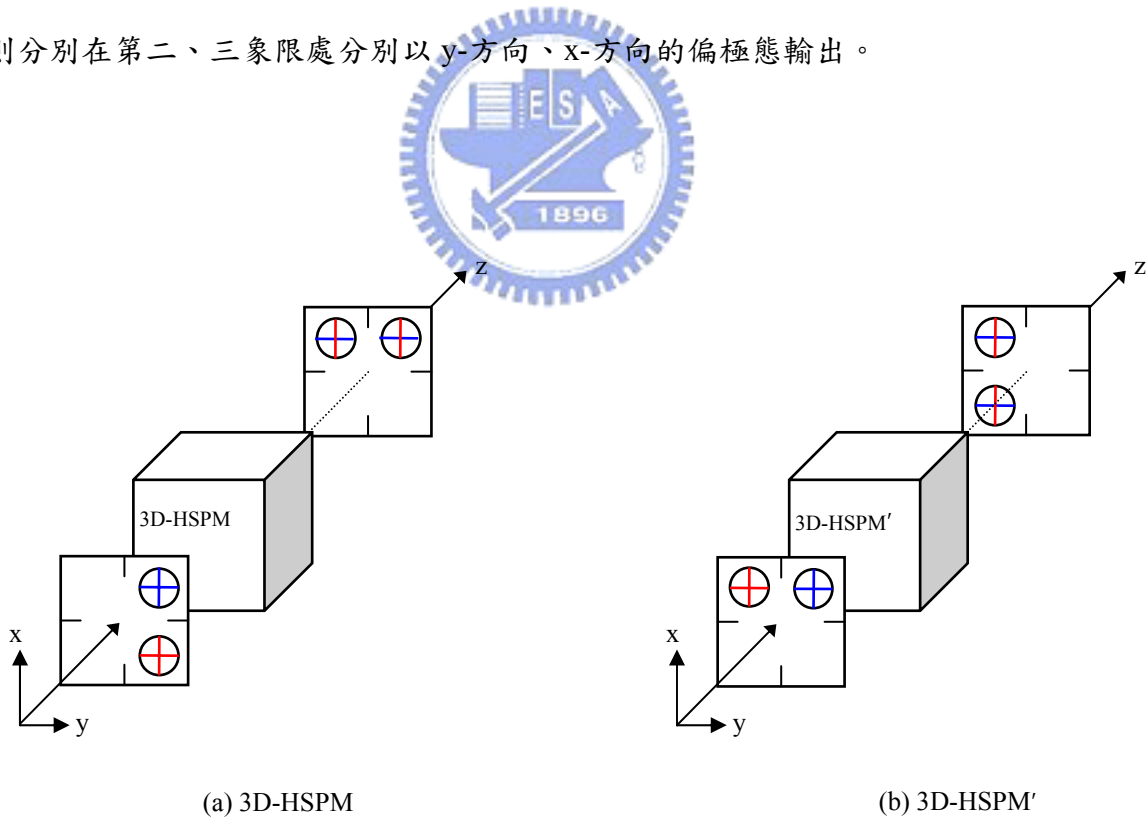


Fig. 5.4 三維全像空間偏極模組在不同方向上的輸出效果。

5.3 工作原理與特性

5.3.1 設計與組成

在第四章中介紹了一光學群組濾波器——Lyot-Öhman filter (LOF)，該濾波器本身具有將線性偏極光的訊號群組，在通過濾波器後分離為 odd-channel 及 even-channel 兩組偏極態相互正交的訊號組。然而，單一濾波元件無法運作在偏極獨立的通訊系統中，因此，本小節在此介紹一利用 Lyot-Öhman filter 加上 5.2 小節中所提到的三維全像空間偏極模組，所組成的四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器，該循環器中的每一個埠所輸入的光訊號，經由 Lyot-Öhman filter 濾波後，訊號將依 odd-channel 與 even-channel 的不同，個別地被不同的埠所輸出。

在 Fig. 5.5~5.8 的(a)小圖中，為本雙向循環器模組的架構以及面對不同輸入埠時的操作原理，模組中的三維全像空間偏極模組，分別是 Fig. 5.3 與 Fig. 5.4 中所描述的 3D-HSPM 及 3D-HSPM'，而在這二個模組之中，放置了一個 L-2L 架構的 Lyot-Öhman 濾波器使 odd-channel 與 even-channel 訊號分離。為了能夠更清楚的表達模組中各訊號的偏極態轉換，在 Fig. 5.5~5.8 的(a)小圖中以虛線表示包含所有頻道的訊號，黑色箭號表示 even-channel 訊號的光程，灰色箭號則表示 odd-channel 訊號的光程；由 Port-1 至 Port-4 埠輸入的操作情形，分別依序由 Fig. 5.5~5.8 中所繪，為了明確表達每個訊號在空間中的位置，在 Fig. 5.5~5.8 的(b)小圖中，為模組中各個空間 xy 平面的示意圖，圖中的第一象限、第二象限、第三象限以及第四象限分別對應 Port-1、Port-2、Port-3 及 Port-4 的位置，並且與 Fig. 5.2、5.3 同樣地以 \oplus 表示非偏極光， \odot 和 \ominus 分別表示偏極方向在 x-軸及 y-軸的線性偏極光， \odot 中的線條以虛線表示所有的頻道在該空間上所保持的偏極態，灰色則表示 odd-channel，黑色表示 even-channel 的偏極態；以下我們針對每個輸入埠在兩種不同的訊號操作下的表現作說明。

(a) 由 Port-1 入射之訊號：

如 Fig. 5.5 中所示，含有 odd-以及 even-channel 的非偏極光訊號由 Port-1 入射，在通過 3D-HSPM 後，由 Fig. 5.4 所得之結論，可知在 xy 平面上 $(0,0)$ 、 $(0,-d)$ 中，所有的訊號皆被處理成 y -方向的偏極光，並垂直入射至 Lyot-Öhman filter 之中；在經過 Lyot-Öhman filter 的處理後，由前面的章節中，我們提過在正向入射時 even-channel 將不被轉變偏極態，而 odd-channel 則將被 Lyot-Öhman filter 轉變為與原偏極態垂直的偏極光，利用這個原理，我們將進入 3D-HSPM' 的兩種訊號個別分析：odd-channel 訊號的部份，將被 Lyot-Öhman filter 轉變為 x -方向的偏極光，在通過 3D-HSPM' 之後，由 Fig. 5.4 的關係可知，訊號將被 HSWPx' 在 x 軸上位移 $-d$ ，而後分別通過 G'_l 、 H'_l ，利用全像空間偏離偏極器的特性，兩道相互垂直的偏極光將被 HSWPy' 結合由 Port-4 輸出。而 even-channel 訊號由於並不對 HSWPx' 作用，故直接地穿過 HSWPx' 後分別通過 H'_u 、 G'_u ，之後被 HSWPy' 結合由 Port-2 輸出。

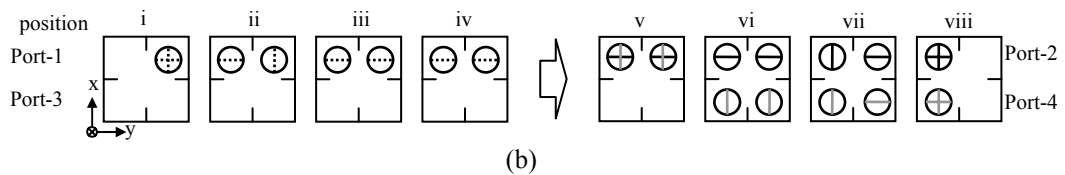
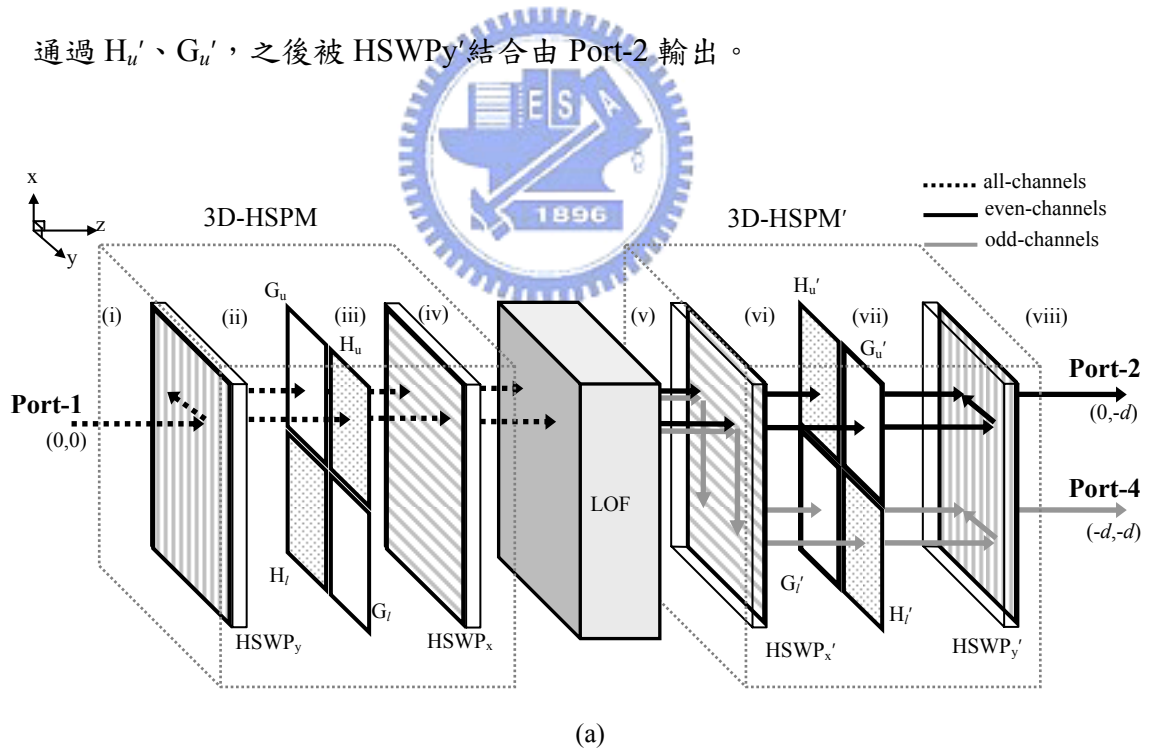
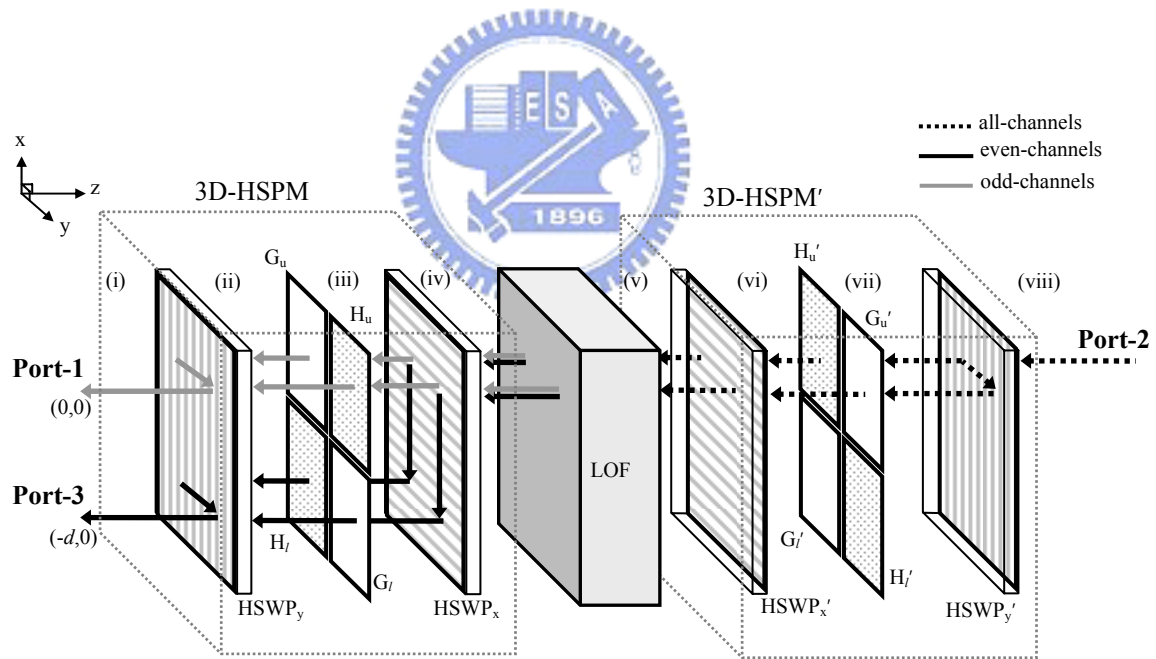


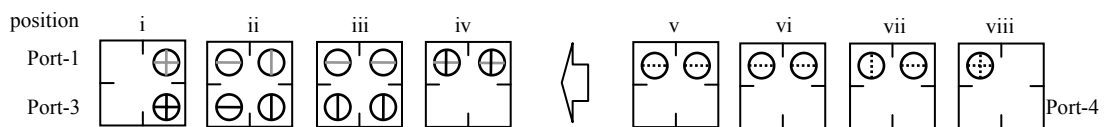
Fig. 5.5 於 Port-1 輸入四埠雙向光學循環器模組的工作原理 (a) 模組架構，(b) 各偏光之分佈圖。

(b) 由 Port-2 入射之訊號：

如 Fig. 5.6 中所示，含有 odd-以及 even-channel 的非偏極光訊號由 Port-2 入射，在通過 3D-HSPM' 後，由 Fig. 5.4 的關係圖中可知所有的訊號皆被處理成 y-方向的偏極光，並在 xy 平面上的(0,0)、(0,-d)處沿-z 方向入射至 Lyot-Öhman filter 之中；在經過 Lyot-Öhman filter 的處理後，由於反向入射時，odd-channel 會保持原偏極態，而 even-channel 則轉為與原偏極態垂直的偏極光。如同(a)中所述，在此仍將進入 3D-HSPM 的兩種訊號個別分析：在 even-channel 訊號的部份，訊號將被 Lyot-Öhman filter 轉變為 x-方向的偏極光，而在 HSWPx 處於 x 軸上位移距離-d，而後分別通過 G_u' 、 H_u' ，後被 HSWPy 結合由 Port-1 輸出。而 odd-channel 訊號由於不對 HSWPx 作用，二道 odd-channel 的訊號光將會直接地穿過 HSWPx 後分別通過 H_u 、 G_u ，之後被 HSWPy 結合並由 Port-1 輸出。



(a)

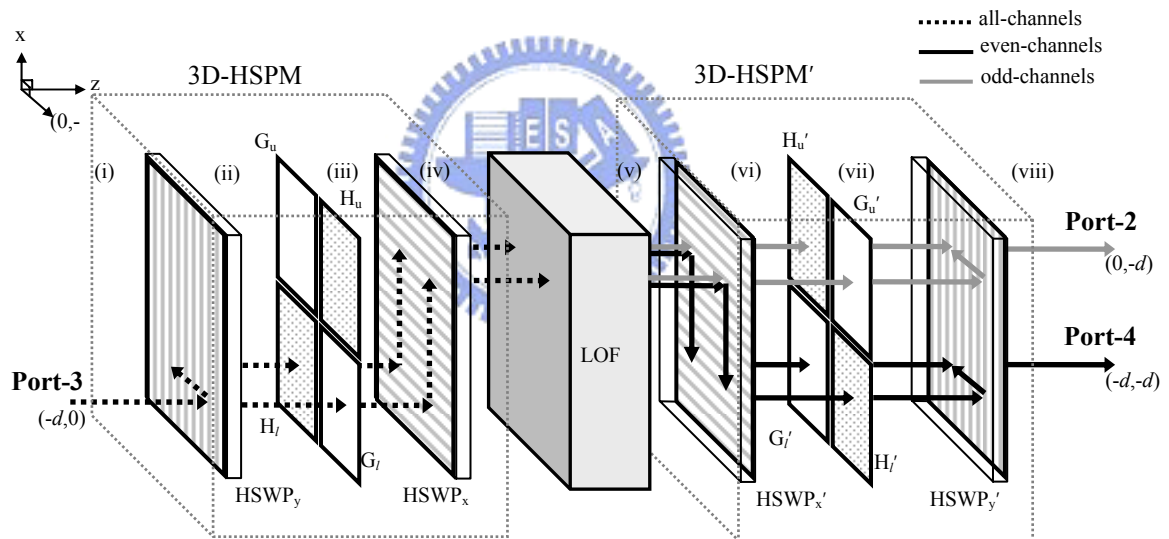


(b)

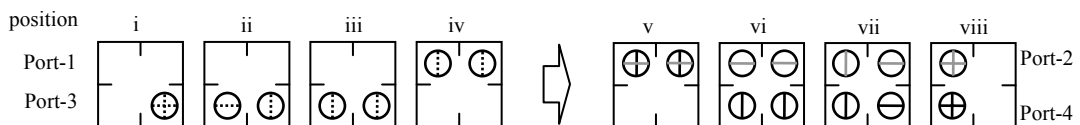
Fig. 5.6 於 port-2 輸入四埠雙向光學循環器模組的工作原理 (a)模組架構，(b)各偏光之分佈圖。

(c) 由 Port-3 入射之訊號：

在 Fig. 5.7 中，訊號光於 xy 平面上座標 $(-d,0)$ 處入射，在通過 3D-HSPM 後，在 $(-d,0)$ 、 $(-d,-d)$ 處，所有的訊號皆被處理成 x -方向的偏極光，並垂直入射至 Lyot-Öhman filter 之中，由於正向入射時，even-channel 會保持原偏極態，而 odd-channel 則轉為與原偏極態垂直的偏極光。因此，odd-channel 在通過 Lyot-Öhman filter 後被轉換為 y -方向偏極光，由於該偏極光不對 HSWP $_x'$ 作用，因此在通過 3D-HSPM' 後，將直接由 HSWP $_y'$ 結合由 Port-2 輸出。而 even-channel 在通過 Lyot-Öhman filter 後屬於 x -方向偏極光，故將被 HSWP $_x'$ 作用，而在 x 軸上位移 $-d$ 的距離，而後被 HSWP $_y'$ 結合由 Port-2 輸出。



(a)

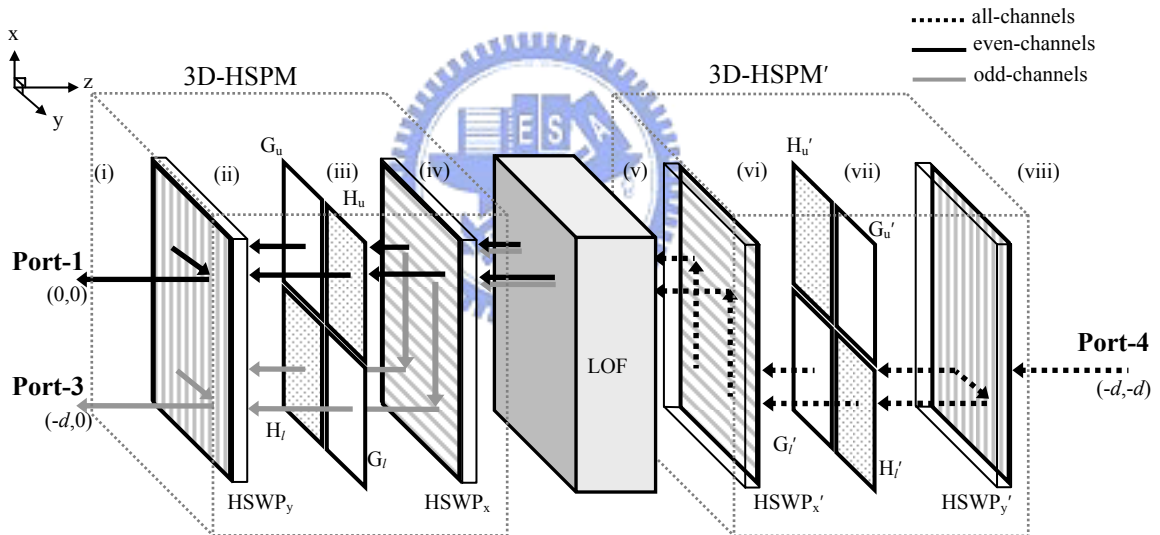


(b)

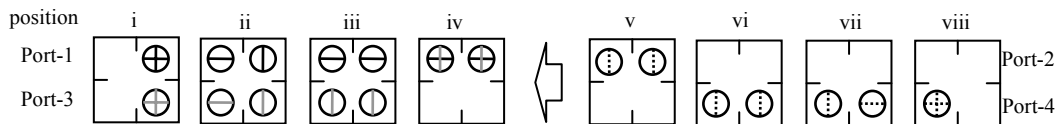
Fig. 5.7 於 Port-3 輸入四埠雙向光學循環器模組的工作原理 (a) 模組架構，(b) 各偏光之分佈圖。

(d) 由 Port-4 入射之訊號：

如 Fig. 5.8 中所示，訊號光於 xy 平面上座標 $(-d,-d)$ 處入射，通過 3D-HSPM' 後，所有的訊號皆被處理成 x -方向的偏極光，並在 xy 平面上的 $(0,0)$ 、 $(0,-d)$ 處沿- z 方向入射至 Lyot-Öhman filter 之中；經過 Lyot-Öhman filter 後，由於反向入射時，odd-channel 會保持原偏極態，而 even-channel 則轉為與原偏極態垂直的偏極光。因此，even-channel 訊號將被 Lyot-Öhman filter 轉變為 y -方向的偏極光，由於不對 HSWPx 作用，二訊號光將會直接地穿過 HSWPx 後分別通過 H_u 、 G_u ，之後被 HSWPy 結合並由 Port-1 輸出。odd-channel 訊號將被 Lyot-Öhman filter 轉變為 x -方向的偏極光，並在 HSWPx 處於 x 軸上位移距離 $-d$ ，而後分別通過 G_l 、 H_l ，後被 HSWPy 結合由 Port-3 輸出。



(a)



(b)

Fig. 5.8 於 Port-4 輸入四埠雙向光學循環器模組的工作原理 (a) 模組架構，(b) 各偏光之分佈圖。

5.3.2 特性

根據 5.3.1 之中關於各埠輸入情況的介紹，可歸納得一個結果，如 Fig. 5.9 所示，當系統被操作在 even-channel 的訊號時，本循環器將會沿著 Port-1→Port-2→Port-3→Port-4→Port-1 的方向作循環動作；相反地，若是被操作在 odd-channel 的訊號時，循環器將成為 Port-1→Port-4→Port-3→Port-2→Port-1 循環方向的逆向循環器。

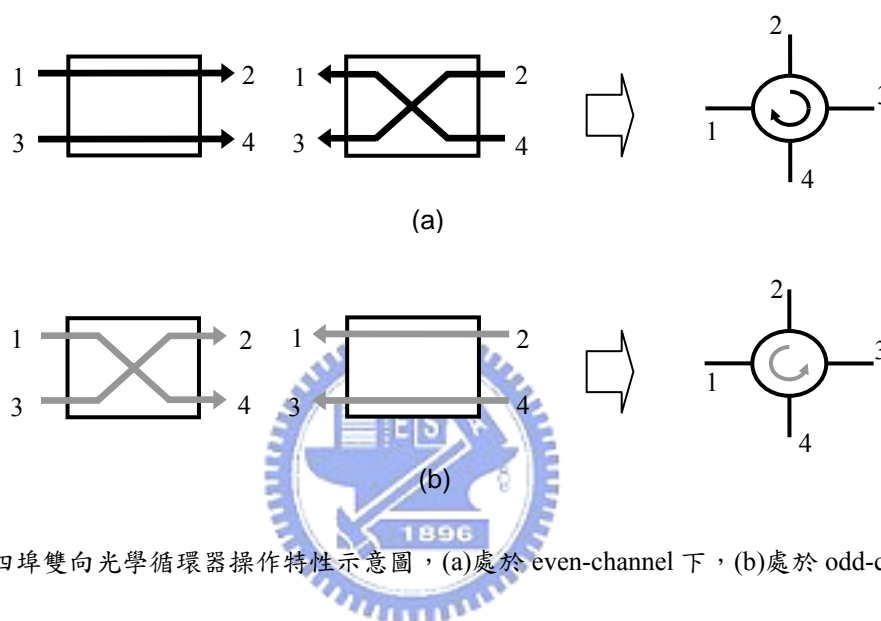


Fig. 5.9 四埠雙向光學循環器操作特性示意圖，(a)處於 even-channel 下，(b)處於 odd-channel 下。

5.4 實驗分析結果

為驗證其可行性，適用於波長 1550nm 之雙向四埠光學準循環器模型在實驗上將被加以組裝。在本模組中，使用以重鉻酸鉍明膠作感光材料製作的全像空間偏離偏極器，其繞射效率分別為 $\eta_s = 3\%$ 以及 $\eta_p = 90\%$ ，分光間距為 3.2mm。為了製作出的雙向循環器能符合國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)所制定的規格，操作在中心波長 1550nm (193.4THz)下，以 50GHz(~0.4nm)作為各頻道的 channel spacing，Lyot-Öhman filter 的濾波效果則取 100GHz(~0.8nm)為 FSR，且濾波器本身具有約 1.5dB 的插入損失，薄玻璃片 G 與二分之一波片的穿透率分別為 96%與 97%。測得各輸入、輸出埠之間的效率如 Table 5.1 所示。

Table 5.1. 四埠雙向光學循環器的相關損耗以及隔離度(不含 fiber coupler)。

Even/Odd-channel		Output Port			
Input Port	1	2	3	4	
1	14.26 ^b / 14.26 ^b	3.20 ^c / >24.72	>38.53 / >38.53	>29.74 / 3.50 ^c	
2	>24.72 / 3.20 ^c	14.26 ^b / 14.26 ^b	3.52 ^c / >25.12	>38.53 / >38.53	
3	>38.53 / >38.53	>25.12 / 3.52 ^c	14.26 ^b / 14.26 ^b	3.84 ^c / >30.28	
4	3.50 ^c / >29.74	>38.53 / >38.53	>30.28 / 3.843 ^c	14.26 ^b / 14.26 ^b	

^aAll values without a superscript are isolation values; ^bReturn losses; ^cInsertion losses

此外，擷取鄰近中心波長的訊號分析，以證明在不同波段下，odd-channel 與 even-channel 能被有效地分隔開，並分別地以不同方向循環。如 Fig. 5.10~ Fig. 5.13 所示，圖中依序為 Port-1、Port-2、Port-3，以及 Port-4 中所取得的輸出訊號，並分別以黑色表示 even-channel 的訊號輸出，灰色則表示 odd-channel 的訊號輸出。

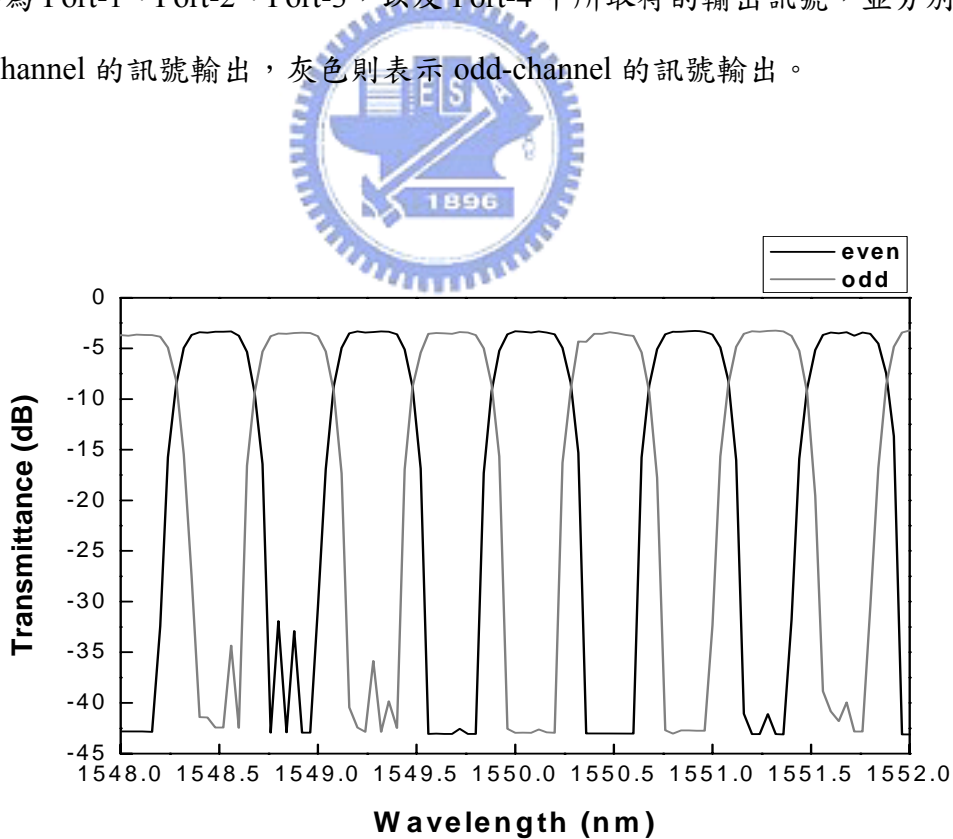


Fig. 5.10 Port-1 在 odd-channel (2→1)以及 even-channel (4→1)操作下的光訊號輸出效率頻譜。

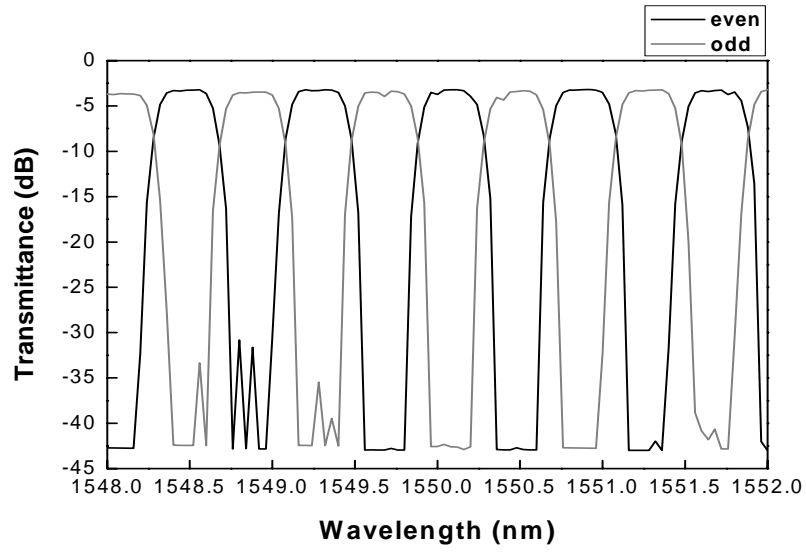


Fig. 5.11 Port-2 在 odd-channel (3→2)以及 even-channel (1→2)操作下的光訊號輸出效率頻譜。

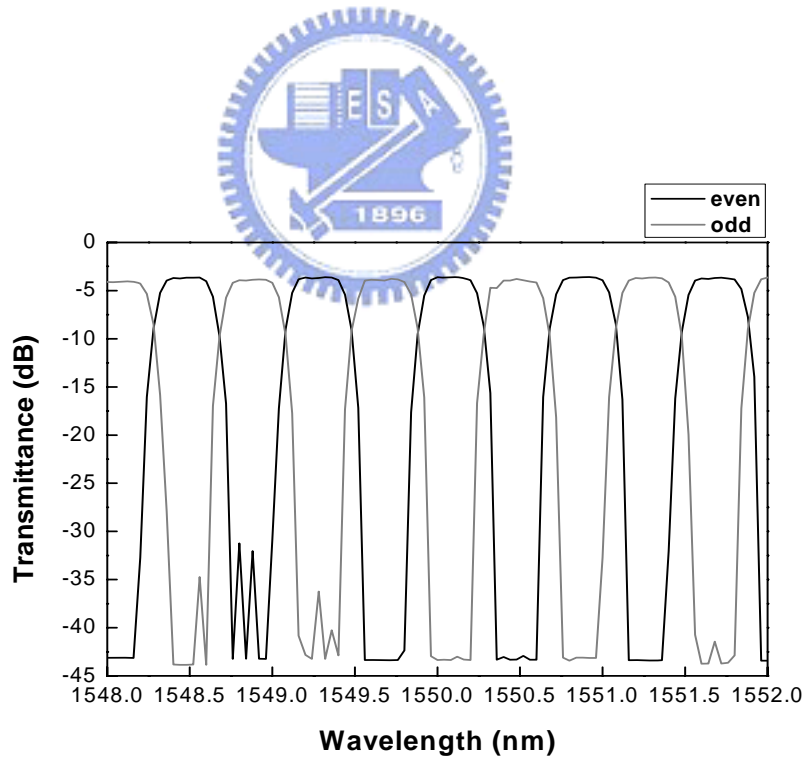


Fig. 5.12 Port-3 在 odd-channel (4→3)以及 even-channel (2→3)操作下的光訊號輸出效率頻譜。

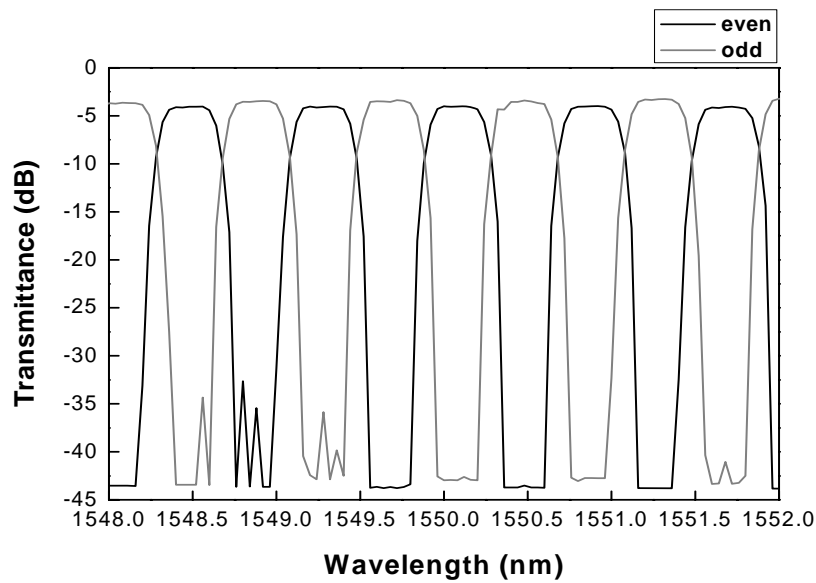


Fig. 5.13 Port-4 在 odd-channel (1→4)以及 even-channel (3→4)操作下的光訊號輸出效率頻譜。



5.5 討論

在 Table 5.1 中可知，該模組的效能並未接近現今商用循環器的標準，忽略 LOF 的插入損耗 1.5dB 後，其餘的元件約有 1.7dB~2.3dB 左右的插入損耗，這是由於本實驗室所製作的全像空間偏離偏極器並未有抗反射鍍膜的處理，且繞射效率並非完美地達到理論值所致，所以在每個模組的材料-空氣介面上仍存在 4% 的反射損耗；若是經過抗反射處理後，介面中的反射損耗可降至小於 0.1%；此外，在製作時曝光以及化學顯影程序上並未能夠精確地控制，故元件並未能夠接近該材料的理論值效能[12]，即： $\eta_s < 1\%$ 與 $\eta_p > 99\%$ 。將前述改進後的反射損耗值以及繞射效率之理論值代入整體模組中，並再度做系統效能的估算，所得的結果列於 Table 5.2，可發現經由前述的效能改進，可將原本的插入損耗(insertion losses)降至 1.83dB，反射損失(return losses)降至 30dB 以上，最低的隔離值(isolation)則為 41.73dB。

此外，由Fig. 5.14所示，為針對全像空間偏離偏極器在中心波長1550nm處所做之繞射效率的模擬圖，在圖中可了解到在完整的C-band頻寬內(1530nm~1565nm)，其元件的效率並非完美地對應每個頻道，若在此取 $\eta_p > 90\%$ 以及 $\eta_s < 1\%$ 為門檻值的話，換算可得本模組的操作頻寬約為16nm (1542nm~1558nm)，約可容納41個頻道；若以 $\eta_p > 80\%$ 以及 $\eta_s < 1\%$ 為門檻值，則可容納61個頻道，且頻寬幾乎可含蓋整個C-band。在Fig. 5.15中，利用Table 5.2中修正後的理論值模組之效能，針對在整個C-band頻寬中，由Port-1輸入，而由Port-2輸出的even-channel訊號做計算，在圖中可得知相鄰的各個even-channel訊號之間的隔離值相當大，應用在通訊系統中將會有良好的訊號鑑別度。

Table 5.2. 四埠雙向光學循環器的相關損耗以及隔離度(不含 fiber coupler)。

Even/Odd-channel

Input Port	Output Port			
	1	2	3	4
1	$>30^b / >30^b$	$<1.83^c / >41.73$	$>60.13 / >60.13$	$>41.73 / <1.82^c$
2	$>41.73 / <1.83^c$	$>30^b / >30^b$	$<1.82^c / >41.73$	$>60.13 / >60.13$
3	$>60.13 / >60.13$	$>41.73 / <1.82^c$	$>30^b / >30^b$	$<1.83^c / >41.73$
4	$<1.82^c / >41.73$	$>60.13 / >60.13$	$>41.73 / <1.83^c$	$>30^b / >30^b$

^aAll values without a superscript are isolation values; ^bReturn losses; ^cInsertion losses

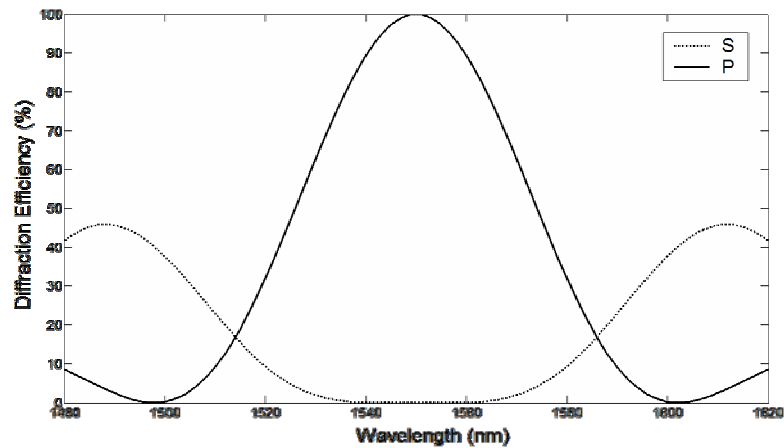


Fig. 5.14 針對中心波長在 1550nm 所製作之全像空間偏離偏極器之繞射效率頻譜圖。

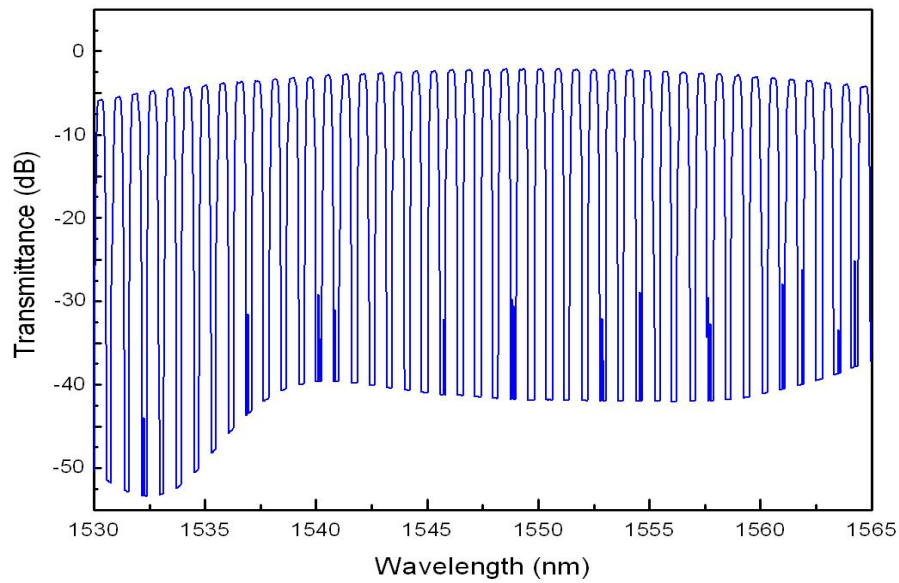


Fig. 5.15 在 C-band 中，even-channel 由循環器的 Port-1 至 Port-2 的輸出效率頻譜圖。



5.6 小結

本章節中，在此提出一個四埠雙向光學循環器，該模組係利用特殊角度及曝光條件所製作的全像空間偏離偏極器，搭配二分之一波片所設計出的三維全像空間偏離偏極模組，以及 Lyot-Öhman 濾波器所製成。利用 Lyot-Öhman 濾波器能將 odd-channel 及 even-channel 分割成相互垂直的偏極態的特性，加上三維全像空間偏離偏極模組，可設計出偏極獨立的雙向光學循環器。同時並針對製作出的模組的效能以及理論值做比較及分析。此設計具有偏極獨立(polarization-independence)、密集(compactness)、高隔離(high isolation)、低偏極模色散(low polarization mode dispersion, PMD)等優點，並適合運用在雙向通訊網路架構之中。

參考文獻

- [1] H. Obara and et al., “Bidirectional WDM Transmission Technique Utilizing Two Identical Sets of Wavelengths for Both Directions Over a Single Fiber,” *J. Lightwave Technol.* **25**, pp. 297-304 (2007).
- [2] C. H. Kim, C. H. Lee, and Y. C. Chung, “A novel birectional add/drop amplifier (BADA),” *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10**, 1118-1120 (1998).
- [3] C. H. Kim, H. Yoon, S. B. Lee, C.-H. Lee, and Y. C. Chung, “Automatic Gain-Controlled Bidirectional Add-Drop,” *IEEE Photonics Technol. Lett.* **12**, 894-896 (2000).
- [4] J. Kim and B. Lee, “Bidirectional wavelength add-drop multiplexer using multiport optical circulators and fiber Bragg gratings,” *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10**, 561-563, (2000).
- [5] A. V. Tran, C. J. Chae, and R. S. Tucker, “A bidirectional optical add-drop multiplexer with gain using multiport circulators, fiber Bragg gratings, and a single unidirectional optical amplifier,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15**, 975-977 (2000).
- [6] Jing-Heng Chen, Po-Jen Hsieh, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, “Multi-port polarization-independent optical quasi-circulators by using a pair of holographic spatial- and polarization- modules,” *Optics Express* **12**, 601-608 (2004).
- [7] Jing-Heng Chen, Po-Jen Hsieh, Jiun-You Lin, and Der-Chin Su, “Improved N-port optical quasi-circulator by using a pair of orthogonal holographic spatial- and polarization-modules,” *Optics Express*, **12**, 6553-6558. (2004).
- [8] J. Nicholls, “Birefringent crystals find new niche in WDM networks,” *WDM Solutions* **Dec.** (2001).
- [9] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, J New York: Wiley-Intersci.; Wiley. Chap. 5, 149-150 (1984).
- [10] S. Cao, J. Chen, J. N. Damask, C. R. Doerr, L. Guiziou, G. Harvey, Y. Hibino, H. Li, S. Suzuki, K.-Y. Wu, and P. Xie, “Interleaver technology: comparisons and applications

requirements,” *J. Lightwave Technol.*, **22**, 281-289 (2004).

[11] M. Oguma, K. Jinguji, T. Kitoh, T. Shibata, and A. Himemo, “Flay-pass-band interleave filter with 200GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure,” *Electron, Lett.*, **36**, 1299-1300 (2000).

[12] B. J. Chang, “Dichromated gelatin as a holographic storage medium,” *SPIE*, **177**, 71-81, (1979).



第六章 多埠偏極獨立的波長交織雙向準光學循環器

6.1 前言

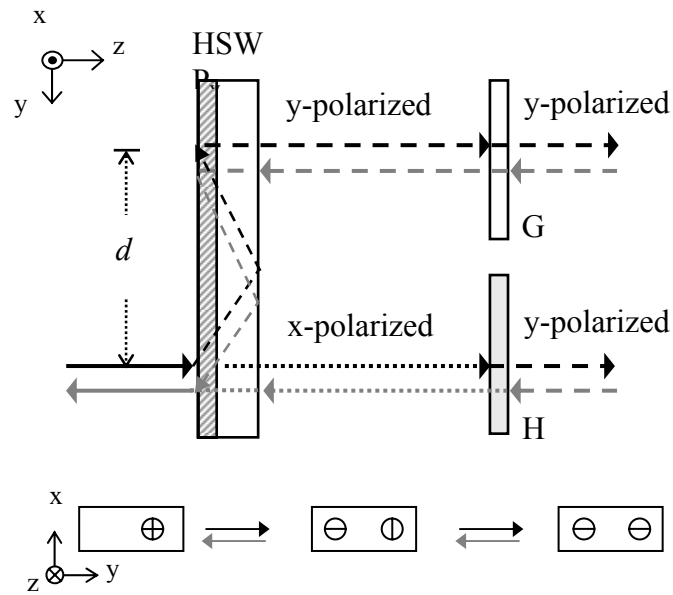
隨著光通訊系統設計之日趨複雜，具有多個輸入/輸出埠(port)已成為高度的需求，各種不同形式之光學循環器設計已被提出[1-4]，並且也隨之應用在一些雙向光通訊系統中[6-10]的設計中，另外，在這些已被提出的架構之中可以發現，在一些使用到多埠循環器的系統[9,10]中，該系統內部僅需準循環器即可滿足，因此，完美的循環傳輸結構並非是傳輸系統必要的需求。

而為了能夠進一步地配合現今的發展趨勢，基於與第五章中相同的理念，在本章中提出一多埠偏極獨立的波長交織雙向準光學循環器的設計，此設計使用包含一對全像空間偏離偏極器、數個全像空間偏極模組、一組全像空間偏離偏極器、一個四分之一波片、一個面鏡，以及一組 Lyot-Öhman 濾波器。其操作原理及效能在本章中將被詳細地解釋，且為了驗證本設計的可行性，在本章中報告了實驗中組裝了適用於中心波段 1550nm 的 5-port 波長交織雙向準光學循環器的效能。本準循環器的設計，除具有雙向的通訊能力外，還有偏極獨立(polarization-independence)、密集(compactness)、高隔離(high isolation)、低偏極模色散(low polarization mode dispersion, PMD)等優點。此外，輸入/輸出埠的數目亦可隨使用系統的需求輕易地被增加。

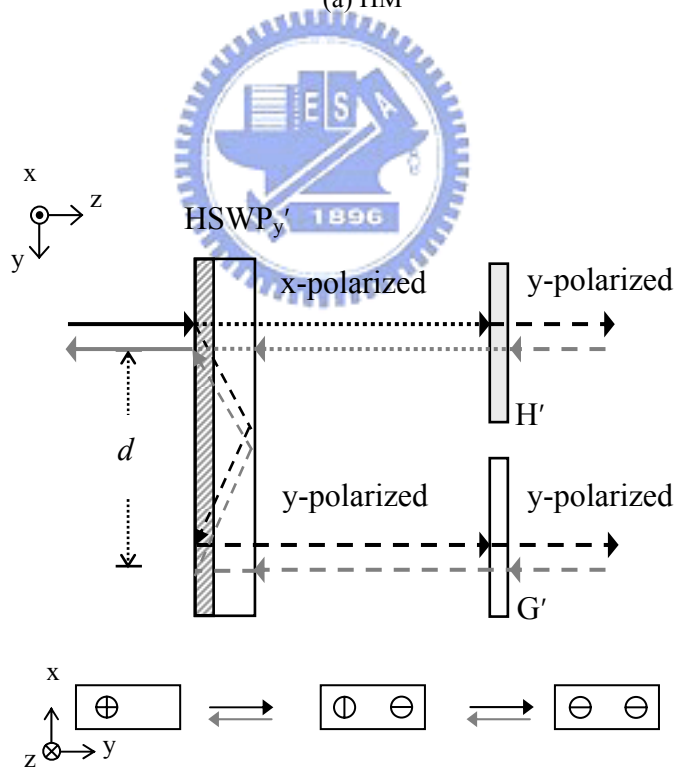
6.2 全像空間偏極模組

與第三章中所提到的傳統光學循環器，以及第五章中所提到的四埠雙向光學循環器情況相類似，多埠雙向光學循環器為了對輸入訊號不具選擇性，需要額外的偏光選擇元件組成的子系統，將輸入/輸出端中非偏極光中的各種偏極光在不同光程中操作，一個好的偏光選擇模組為了要減輕光纖系統中元件的偏極模色散($<0.2\text{ps}$)要求[11]，還需要額外的偏光補償元件輔助；因此，針對多埠雙向光學準循環器的設計，本文在此提出一個簡單的全像空間偏極模組(holographic spatial- and polarization- modules, HMs)，該模組的特點為構造簡單、密集、易於製作，且在可在循環器所對應的輸入/輸出埠上，以對稱擺置的方式避免偏極模色散在模組中發生。

在此所提出的全像空間偏極模組，係利用一片全像空間偏離偏極器 HSWPy、一片二分之一波片 H，以及一薄玻璃片 G 所組成，每個元件皆平行地擺置在 xy 平面上，其中，HSWPy 對 y 方向的偏極光作用，能將 y-方向的偏極光在 y 軸上位移距離 d ，而 H 的方位角與 x 軸夾角為 45° ，其功能是將 x-方向、y-方向的偏極態互相轉換，G 則是為了補償偏極模色散所加入的薄玻璃片，其光學厚度與 H 相同，每個空間中，在+z 方向上的訊號光之偏極態，分別以 \oplus 表示非偏極光， \odot 和 \ominus 分別表示偏極方向在 x-方向及 y-方向的偏極光，並將 xy 平面上的分佈繪於模組架構的下方；如 Fig. 6.1(a)所示，為一組 HM，當一非偏極光沿著+z 方向傳播，在通過 HSWPy 後將被分離成偏極態相互垂直的兩道光，由第 2.5 節中的原理可知，x-方向的偏極光將筆直地前進，在通過二分之一波片 H 後，將被轉換成 y-方向偏光出射，另一道 y-方向偏極光則在 y 軸上位移距離- d ，並於透過薄玻璃片 G 後與原入射光的方向平行出射。圖中灰色線條所示，為模組在偏極光訊號反向輸入時的操作，可看出兩道 y-方向的偏極光可透過本模組結合，並由模組下方以具有兩個偏極分量的形式出射。



(a) HM



(b) HM'

Fig. 6.1 兩種全像空間偏極模組的架構與操作圖：(a)將 y 偏光位移 $-d$ 的 HM，以及 (b) 將 y 偏光位移 d 的 HM'。

在 Fig. 6.1(b) 中，將 Fig. 6.1(a) 中的 HM 對 z 軸轉 180°，內部元件本身的相對位置並未改變，為了便於比較兩模組之間的不同，在此稱該模組為 HM'，且此模組上所有元件均加上『』記號以示區別。當一非偏極光沿著 +z 方向傳播，並在圖上方處入射至 HSWPy'，在通過 HSWPy' 後訊號光被分離成偏極態相互垂直的兩道光，其中，x-方向的偏極光將沿原入射光方向前進，並在通過二分之一波片 H' 後轉換成 y-方向偏極光出射，而另一道 y-方向偏極光在通過 HSWPy' 後位移距離 d ，而後透過薄玻璃片 G' 與原入射光的方向平行出射。同樣地，圖中灰色線條所示的反向輸入操作，可推得模組以類似 HM 的操作將兩道 y-方向的偏極光結合，並由模組上方以具有兩個偏極分量的形式出射。

由上述的原理可得，HMs 的特性可做以下的結論：在沿 +z 方向入射的非偏極光，在經過模組後被轉換為兩道 y-方向的偏極光輸出，其距離為 d ，相反地，若兩道距離為 d 的 y-方向的偏極光沿 -z 方向入射，將被 HMs 結合為同時具有兩個偏極分量的形式，由同一處出射。



6.3 工作原理與特性


6.3.1 工作原理

在本章中所提出的多埠雙向光學準循環器，係利用數個 HMs、一組全像空間偏離偏極器 HSWPx、一個四分之一波片 Q 、一個面鏡 M ，以及一組 Lyot-Öhman 濾波器所組成，其架構如 Fig. 6.2 所示。為了能詳細地描繪出模組中各個元件之間，每道不同的訊號光之偏極態，在此仍與前幾章中的描述方式一致，以 \odot 和 \ominus 分別表示偏極方向在 x-軸及 y-軸的線性偏極光， \oplus 表示擁有兩種分量的非偏極光，並將空間中的訊號光偏極態分別繪於模組架構的下方的對應圖中。

圖中的 HM 以及 HM' 皆以相同的方式製作，而模組中採用 HM、HM'、HM... 這樣

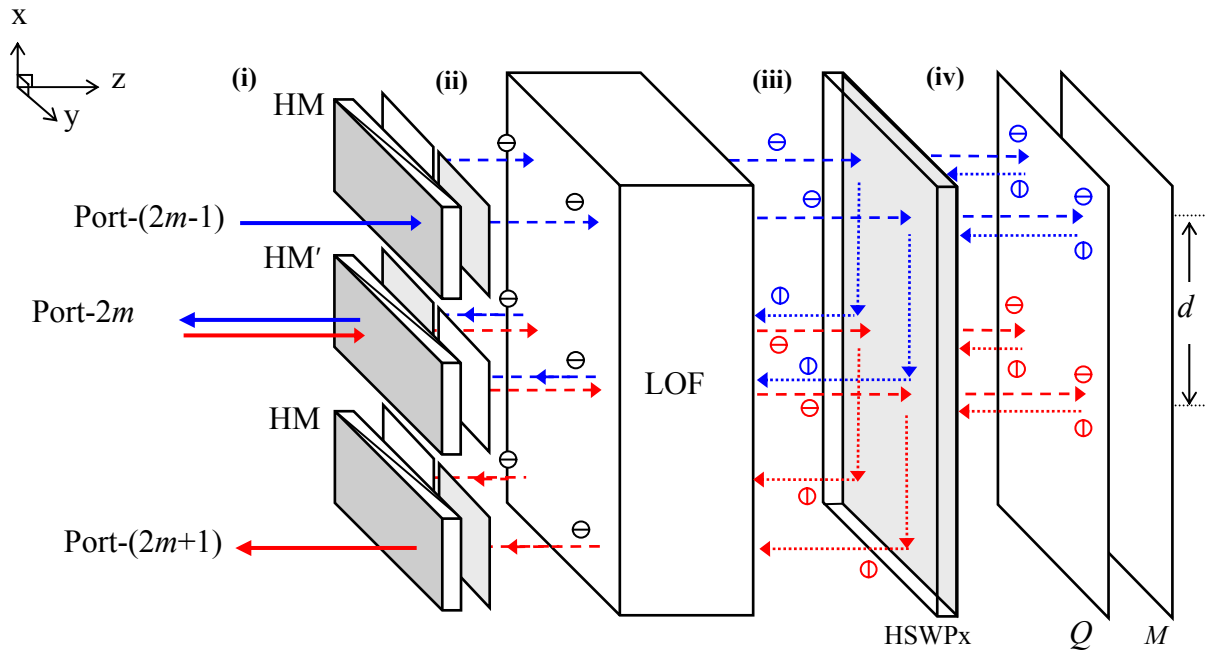
的交叉擺置方式，是為了要讓埠與埠之間的光程上能擁有對稱的光程，可以避免偏極模色散的發生，HM、HM'元件中的全像空間偏離偏極器之乳劑面皆朝向-z方向放置，而偏離在y-方向的偏極分量與原入射光程在y-軸上相隔距離 d 。

另外，模組中的全像空間偏離偏極器 HSx，其位置在 Lyot-Öhman 濾波器的後方，乳劑面朝向+z方向擺置，該元件由於擺放位置的關係，將僅對x-方向的偏極光作用，能將+z方向入射的x-方向偏極光在x軸上位移距離 d ，而在-z方向入射的x-方向偏極光則在x軸上位移距離 $-d$ 。模組中的四分之一波片 Q 以及面鏡 M 的作用，在於將反射後的線性偏極光的偏極態作 90° 的轉換。為了能夠清楚地表達模組的操作，本節將該模組操作的情形分為：(i) 當在 even-channel 訊號下操作的工作情形，以及(ii) 在 odd-channel 訊號操作下的工作情形兩種來分別地說明。

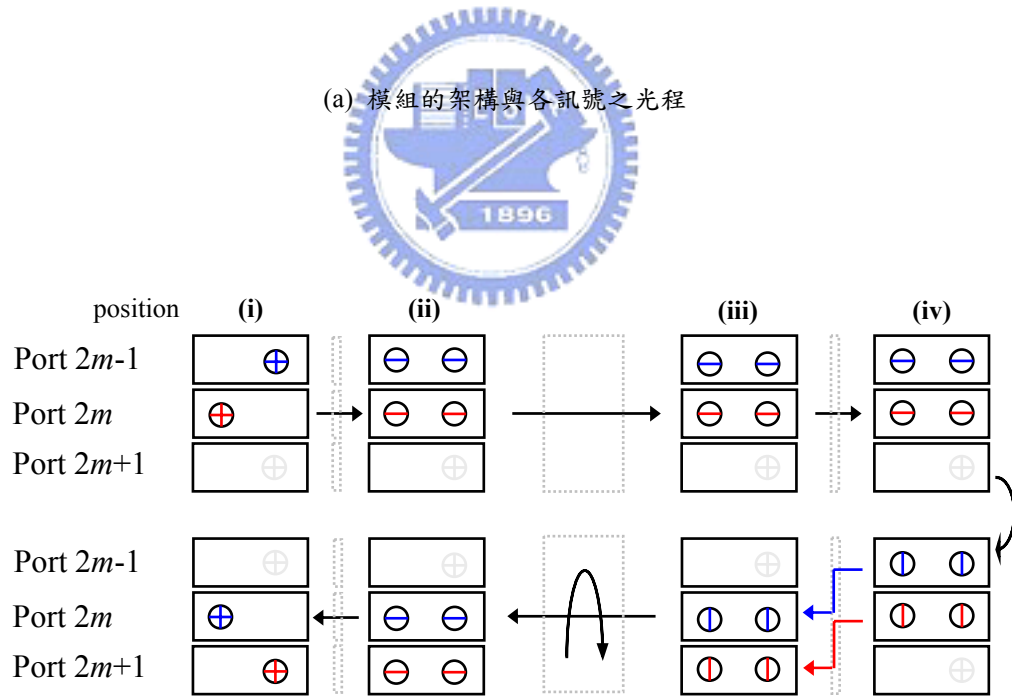


首先，在 Fig. 6.2 中，為模組在 even-channel 訊號下操作，圖中以藍色表示由 Port-(2m-1)入射的訊號光，紅色表示由 Port-2m 入射的訊號光以利分辨。在 Port-(2m-1)入射的訊號光中，非偏極光的訊號在通過 HM 後將被分離成兩道 y-方向的偏極光入射至 Lyot-Öhman 濾波器中，even-channel 訊號在穿過濾波器以及 HSWPx 後仍維持原偏極態，在通過 Q 以及 M 之後，訊號的偏極態將被轉 90° 而成為x-方向偏極光，由於該偏極分量將對 HSWPx 作用，因此在x-軸上位移距離 $-d$ ，由於 even-channel 訊號在反向輸入 Lyot-Öhman filter 中將被濾波器轉換為與原偏極態相垂直的方向，因此訊號光又轉換為y-方向的偏極光，並在 HM'結合後由 Port-2m 處輸出。

而在 Port-2m 處入射的訊號光，該處的非偏極光訊號在通過 HM'後被分離成兩道 y-方向的偏極光入射至 Lyot-Öhman filter，兩道 y-方向偏極光在通過 Lyot-Öhman filter 與 HSWPx、 Q 、 M 等元件中的操作原理與由 Port-(2m-1)入射的訊號光完全相同，因此，該訊號光最後在 HM 結合，由 Port-(2m+1)處輸出。



(a) 模組的架構與各訊號之光程



(b) 操作訊號於模組中空間內的偏極態

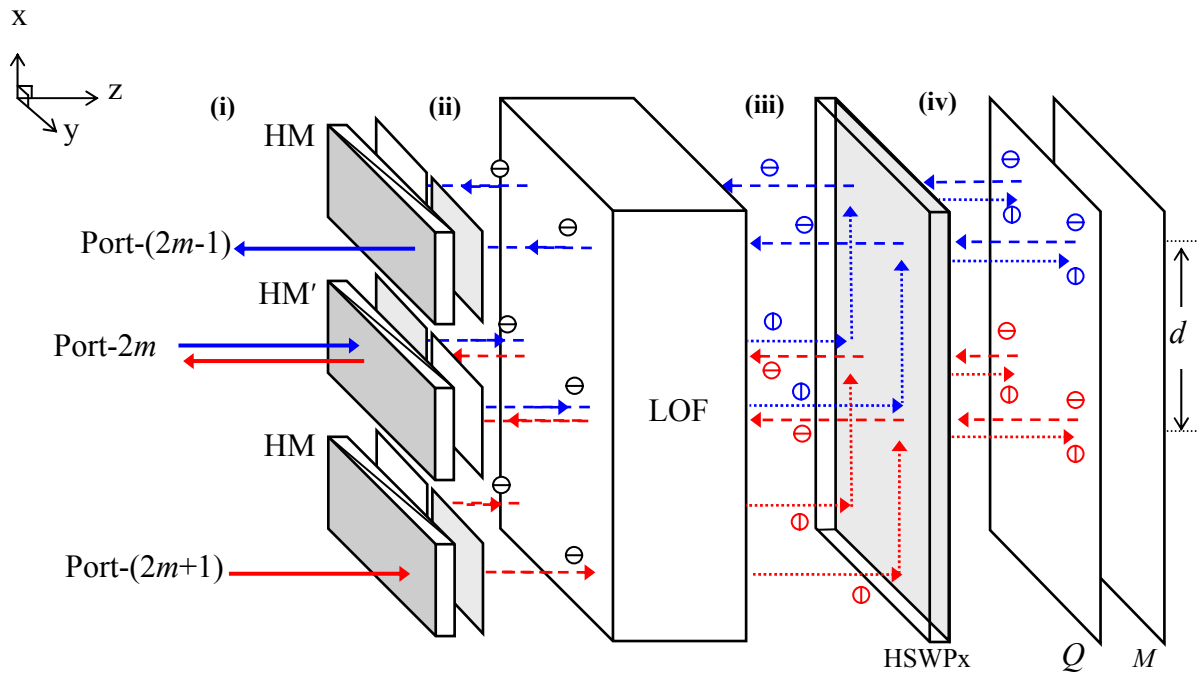
Fig. 6.2 在 even-channel 操作下的多埠雙向光學準循環器。

在 Fig. 6.3 中，模組在 odd-channel 訊號下操作，圖中以藍色表示由 Port- $2m$ 入射的訊號光，紅色表示由 Port- $(2m+1)$ 入射的訊號光。在 Port- $2m$ 入射的訊號光中，非偏極光的訊號在通過 HM' 後分離成兩道 y-方向的偏極光入射至 Lyot-Öhman filter 中，由於 odd-channel 訊號在穿過 Lyot-Öhman filter 中，偏極態將被濾波器轉換為與原偏極態相垂直的 x-方向，且該偏極態對 HSWPx 作用，因此在 x-軸上位移距離 d ，在通過 Q 以及 M 之後，訊號的偏極態將被轉 90° 而成為 y-方向偏極光，由於 odd-channel 訊號在反向輸入濾波器時將不被轉換偏極態，因此訊號光將直接地通過 Lyot-Öhman filter，而後由 HM' 結合後由 Port- $(2m - 1)$ 處輸出。

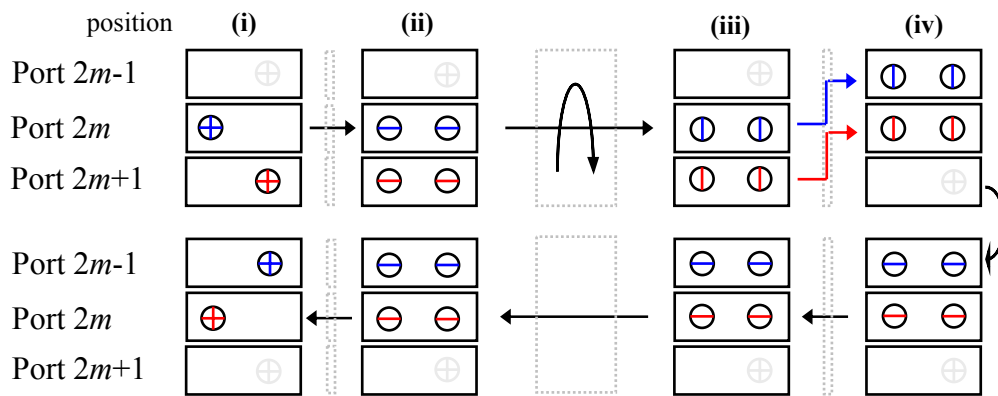
而在 Port- $(2m + 1)$ 處入射的訊號光，該處的非偏極光訊號在通過 HM 後，被分離成兩道 y-方向的偏極光沿 +z 方向入射至 Lyot-Öhman filter，而後的操作原理與 Port- $2m$ 入射的訊號光類似，因此，同理可證該訊號光的兩個分量最後將被 HM' 所結合，並在 Port- $2m$ 處輸出。



以此類推，無論需求任意埠數的循環器，皆可以此方式推演出架構來，此外，在各埠之間，所有元件的位置與關係不變的情況下，模組的每個相鄰的埠之間都擁有相同的插入損失以及隔離值。



(a) 模組的架構與各訊號之光程



(b) 操作訊號於模組中空間內的偏極態

Fig. 6.3 在 odd-channel 操作下的多埠雙向光學準循環器。

6.2.2 特性

根據前述的介紹，在此將其特性做歸納，如 Fig. 6.4 所示，當系統被操作在 even-channel 的訊號時，本循環器將會等效於 Port-1→Port-2→Port-3→...→Port-(N-1)→Port-N 的方向作循環動作，但 Port-N 的訊號無法循環至 Port-1 的準循環器；相反地，若是被操作在 odd-channel 的訊號時，循環器將等效為 Port-N→Port-(N-1)→...→Port-3→Port-2→Port-1 循環方向的逆向準循環器。

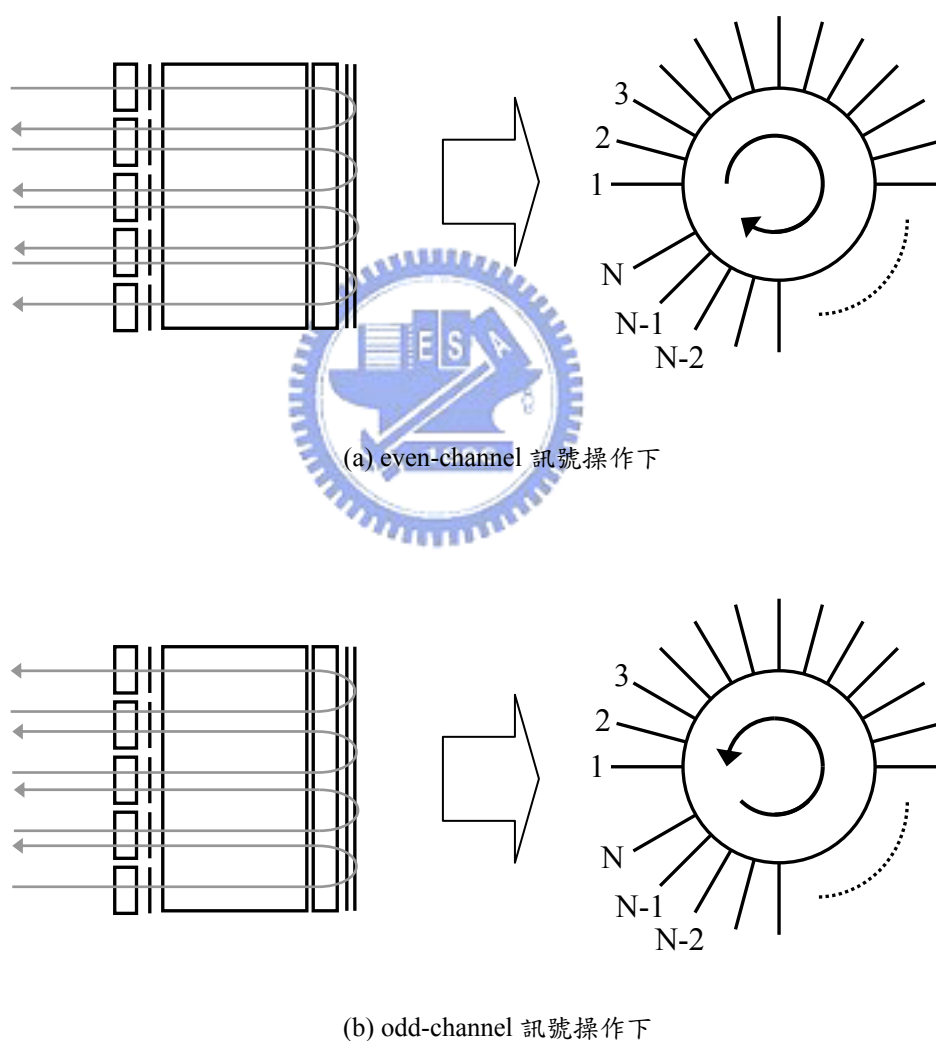


Fig. 6.4 多埠雙向光學準循環器之操作特性，以及等效之循環器示意圖，(a)在 even-channel 訊號操作之下，以及(b)在 odd-channel 訊號操作之下。

在模組中，定義Port-1在xy平面上的位置為(0,0)，如Fig. 6.5(a)所示，則我們可以(6-1)、(6-2)式來推得其他輸入/輸出埠在xy平面上的相對位置，其相關位置之關係整理後可得Fig. 6.5(b)。

$$[x_{2m-1}, y_{2m-1}] = [d - d(2m-1), 0], \quad \text{for odd-ports;} \quad (6-1)$$

$$[x_{2m}, y_{2m}] = [-d(2m-1), -d], \quad \text{for even-ports.} \quad (6-2)$$

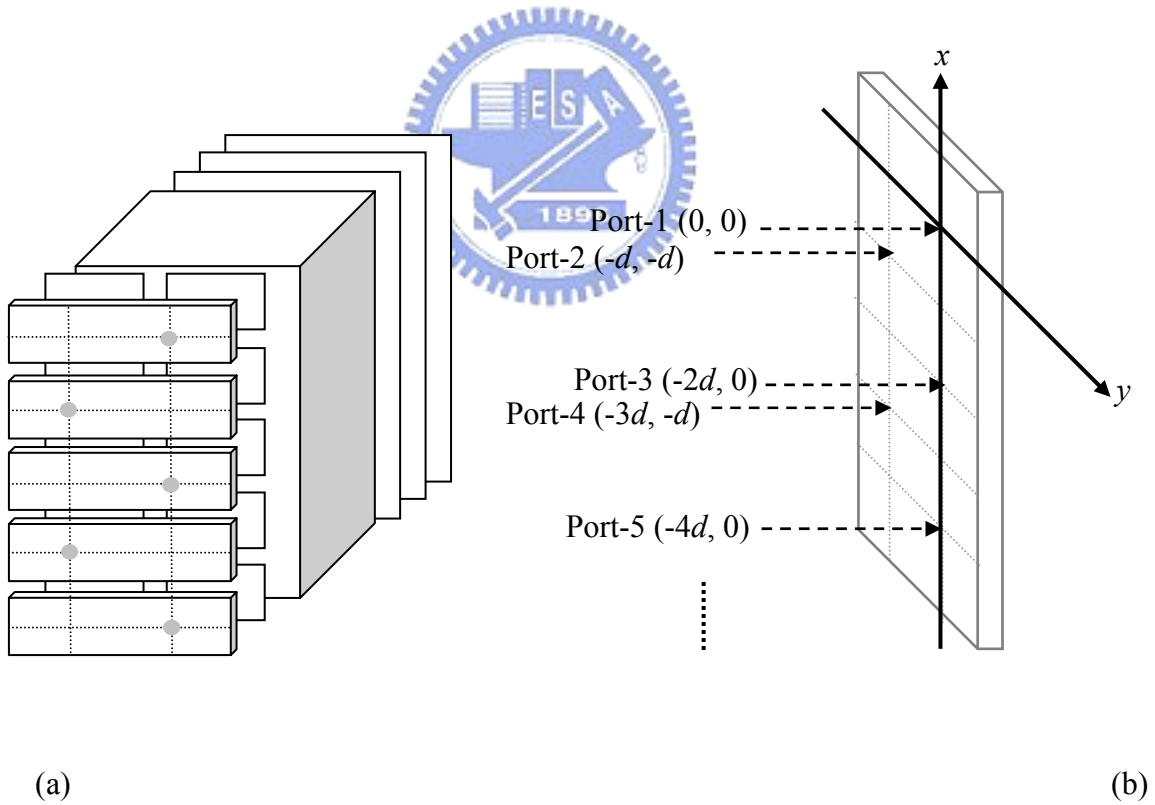


Fig. 6.5 模組中各埠在 xy 平面上的相關位置圖。

6.4 實驗分析結果

為了能夠驗證其可行性，一 5-port 的雙向光學循環器模組在此被組裝，該模組的相關參數，我們可藉由 HSWPs 的繞射效率、二分之一波片以及四分之一波片的穿透率、面鏡反射率，以及 Lyot-Öhman 濾波器的插入損失等參數計算得之。以 DCG 感光材料製作的全像空間偏離偏極器，其繞射效率分別為 $\eta_s = 3\%$ 以及 $\eta_p = 90\%$ ，分光間距為 3.2mm。為了製作出的雙向循環器能符合國際電信聯盟(ITU)所制定的規格，操作在中心波長 1550nm (193.4THz)下，我們以 50GHz(~0.4nm)作為各頻道的 channel spacing，Lyot-Öhman filter 的濾波效果則取 100GHz(~0.8nm)為 FSR，濾波器本身具有約 1.5dB 的插入損失，二分之一波片 H 與四分之一波片 Q 的穿透率皆約為 97%。為了能清楚模組運作在通訊頻寬上的表現，我們將由 Port-1 輸入，於 Port-2 輸出的 even-channel 訊號在整個 C-band 的表現展現在 Fig. 6.5 中。

Table 6.1 操作在中心波長 1550nm 下，所製作的 5-port 雙向光學循環器的相關參數(不含 fiber coupler)。

Even-channel					
Input	Out Port				
Port	1	2	3	4	5
1	14.26 ^b	6.47 ^c	29.09	26.94	49.09
2	19.77	14.26 ^b	6.47 ^c	29.09	26.94
3	56.35	19.77	14.26 ^b	6.47 ^c	29.09
4	39.77	56.35	19.77	14.26 ^b	6.47 ^c

Odd-channel					
Input	Out Port				
Port	None	1	2	3	4
1	6.345 ^c	14.26 ^b	19.77	56.35	39.77
2	29.09	6.345 ^c	14.26 ^b	19.77	56.35
3	26.94	29.09	6.345 ^c	14.26 ^b	19.77
4	49.09	26.94	29.09	6.345 ^c	14.26 ^b

^aAll values without a superscript are isolation values;

^bReturn losses; ^cInsertion losses

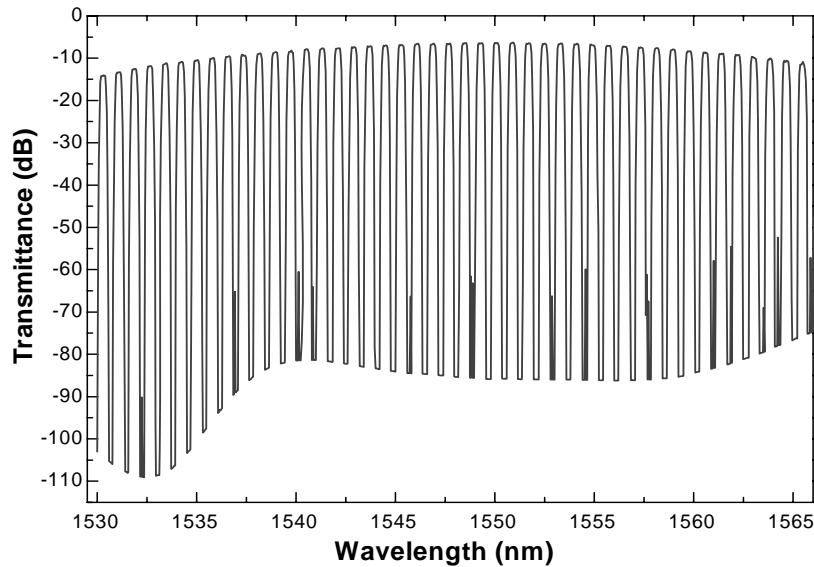


Fig. 6.6 even-channel 訊號在 Port-1→Port-2 操作下所得之頻譜。

6.5 討論

在 Table 6.1 中，模組的隔離值(isolation)大於 29dB，反射損耗(return losses)約為 14dB，插入損失(insertion losses)約 6.47dB，整體而言，本模組具有相當高的隔離度，但是，在插入損失上仍相當地高，這是因為在模組中的訊號光需要來回兩次 Lyot-Öhman 濾波器所造成，由於 Lyot-Öhman 濾波器中有相當厚的雙折射晶體，而該雙折射晶體並未具備良好的穿透率，且模組中所使用的 HSWPs 並未施加抗反射鍍膜處理，所以材料-空氣的介面上亦存在著 4%的反射損耗，若是在元件上經過抗反射鍍膜的處理，反射損失將降低至小於 0.1%。此外，若是全像光學曝光和化學顯影程序能夠具有精確的控制，則元件可具有接近理論值的良好效能[12]，亦即 $\eta_y \doteq 0\%$ and $\eta_x \doteq 100\%$ 。在前述兩個可改進的前提下，再次考慮 HSWPs 之效率 $\eta_y < 1\%$ 和 $\eta_x > 99\%$ ，並重新計算此模組之效能的相關重要參數。計算所得之結果如 Table 6-2 所示，由於前述改進的結果，使得元件之效能獲得有效地提升；隔離值(isolation)大於 46dB 以上，反射損耗(return losses)亦在 30dB 以上，插入損失(insertion losses)則降至 3.34dB。

Table 6.2 操作在中心波長 1550nm 下，以理論值製作的全像空間偏離偏極器與抗反射處理所製作的 5-port 雙向光學循環器的相關參數(不含 fiber coupler)。

Even-channel					
Input Port	Out Port				
	1	2	3	4	5
1	30 ^b	3.34 ^c	46.22	43.34	86.22
2	26.34	30 ^b	3.34 ^c	46.22	43.34
3	66.34	26.34	30 ^b	3.34 ^c	46.22
4	66.30	66.34	26.34	30 ^b	3.34 ^c

Odd-channel					
Input Port	Out Port				
	None	1	2	3	4
1	3.34 ^c	30 ^b	26.34	66.34	66.30
2	46.22	3.34 ^c	30 ^b	26.34	66.34
3	43.34	46.22	3.34 ^c	30 ^b	26.34
4	86.22	43.34	46.22	3.34 ^c	30 ^b

^aAll values without a superscript are isolation values;

^bReturn losses; ^cInsertion losses

為了易於瞭解這些參數的相對關係和趨勢，如 Fig. 6.7 所示，為 even-channel 在 Port-1 → Port-2 操作下，對應於 Table 6-2 之參數的分析圖。HSWPs 在中心波長 1550nm 之操作頻寬約為 20nm。為了易於了解實驗值與理論值之間的差距，Fig. 6.8 之中擷取 1549nm 至 1551nm 頻寬的範圍內，以 even-channel 的訊號在 Port-1 → Port-2 操作下的訊號輸出做比較。根據相同的原理，此模組亦可設計在中心工作波長為 1300 nm 或其他波長下操作。

此外，在此設計中，由於入射光之 x-和 y-偏極分量，在各傳輸路徑之光程具有良好的對稱性，因此 x-偏極分量與 y-偏極分量具有完全相同之光程，亦即光程差幾乎為 0，因此本設計亦不具有偏極模色散的問題。

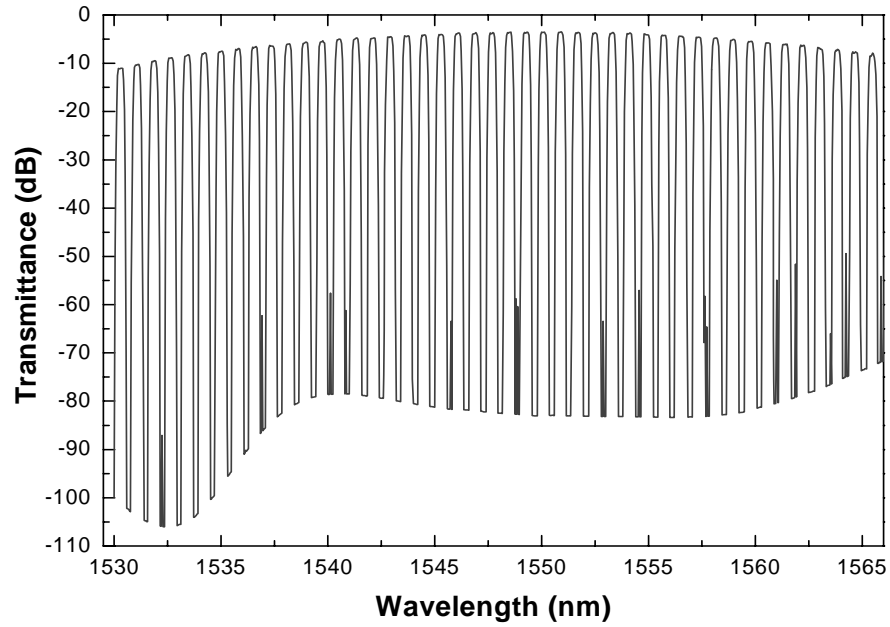


Fig. 6.7 Port-1→Port-2 的 even-channel 訊號在理想的模組下所得之頻譜。

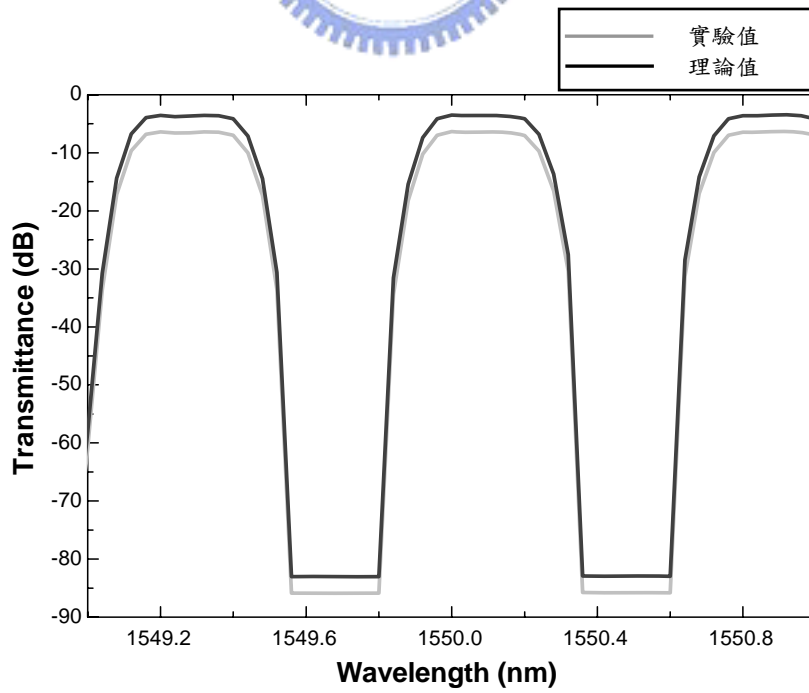


Fig. 6.8 Port-1→Port-2 的 even-channel 訊號在中心波長附近的實驗頻普及理論頻譜。

6.6 小結

在本章中，基於第五章的想法，本章中提出了一多埠偏極獨立之波長交織雙向光學準循環器的設計，此設計使用包含一對全像空間偏離偏極器、數個全像空間偏極模組、一組全像空間偏離偏極器、一個四分之一波片、一個面鏡，以及一組 Lyot-Öhman 濾波器。在此，為了驗證本設計的可行性，一中心波段於 1550nm 的 5-port 雙向光學準循環器。此外，在此章中也討論了該準循環器的特性、操作原理和效能。此設計具有雙向通訊能力外、偏極獨立性(polarization-independence)、密集(compactness)、高隔離(high isolation)、低偏極模色散(low polarization mode dispersion, PMD)和易於製作(easy fabrication)等優點。此外，輸入/輸出埠的數目可隨使用者的需求輕易地被增加，適用於各種雙向通訊網路的需求。



参考文献

- [1] M. Shirasaki et al. "Compact polarization-independent optical circulator," *Appl. Opt.* **20**, 2683-2687 (1981).
- [2] I. Yokohama et al., "Polarisation-independent optical circulator consisting of two fibre-optic polarising beam splitters and two YIG spherical lenses," *Electron. Lett.* **22**, 370-372 (1986).
- [3] M. Koga, "Compact quartzless optical quasi-circulator," *Electron. Lett.* **30**, 1438-1440 (1994).
- [4] L. D. Wang, "High-isolation polarization-independent optical quasi-circulator with a simple structure," *Opt. Lett.* **23**, 549-551 (1998).
- [5] A.V. Tran, C. -J. Chae, and R. S. Tucker, "All-optical gain control for bidirectional optical add-drop multiplexer using ASE noise path through multi-port circulators," *Electron. Lett.*, **39**, 1839-1840 (2003).
- [6] A.V. Tran, C. -J. Chae, and R. S. Tucker, "A bidirectional optical add-drop multiplexer with gain using multiport circulators, fiber Bragg gratings, and a single unidirectional optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 975-977 (2003).
- [7] K. -P. Ho and S. -K Liaw, "Eight-channel bidirectional WDM add/drop multiplexer," *Electron. Lett.*, **34**, 947-948 (1998).
- [8] C. H. Kim, C. H. Lee, and Y. C. Chung, "Bidirectional WDM self-healing ring network on simple bidirectional add-drop amplifier modules," *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **10**, 1340-1342 (1998).
- [9] A.V. Tran, C. -J. Chae; and R. S. Tucker, "Bidirectional optical add-drop multiplexer based Bragg gratings and circulators," *Appl. Optics*, **42**, 3495-3499 (2003).
- [10] J. Kim and B. Lee, "Birectional wavelength add-drop multiplexer using multiport optical circulators and fiber Bragg gratings," *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **12**, 561-563 (2000).

- [11] C. K. Madsen and J. H. Zhao, *Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach*. New York: Wiley-Intersci.; Wiley Chap. 7(1999).
- [12] B. J. Chang, "Dichromated gelatin as a holographic storage medium," *SPIE*, **177**, 71-81, (1979).



第七章 結論

本論文的研究方向，主要是例用特殊曝光條件下，製作出具有偏光選擇能力的全像光學元件，將其運用在光纖通訊元件中。而為了提升現今的光纖通訊系統中的傳輸容量，雙向的光纖通訊網路是一個極為可行的辦法之一，在此網路架構之中，光學循環器便是一個重點元件；因此，本論文在此以全像偏極選擇元件的基礎，提出數種雙向光學循環器的設計。

在第二章之中，主要是介紹全像元件之特性與原理，藉由耦合波理論的幫助，可推導出體積型全像片的偏極選擇條件；利用該條件，輔以基片型全像元件的架構，可設計出具有平行輸出/入能力的全像偏離偏極器。該元件在製作上，除了藉由耦合波理論推算出的特殊角度外，為了能夠操作在更高波長的通訊頻寬上，亦使用了短波長拍攝長波長技術，而關於全像元件在製作上會遭遇的乳劑收縮問題，在製作時考慮了本實驗室所提出的預補償辦法來降低誤差。

在第三章中介紹了傳統的光學循環器之架構與操作原理，同時也介紹了該元件的應用與相關參數；進一步地，藉由第二章中所製作的元件，提出將傳統的光學循環器改良為兩種多埠光學準循環器。所提到的二種循環器分別運用了以全像偏離偏極器所製作出的二維與三維空間偏離偏極模組，其操作原理以及效能在該章中有詳盡的描述；此外，亦同時討論了在改善製作條件下，兩種模組所改善的效能變化；此多埠光學循環器皆具有密集、獨立、低成本、易於製作等優點，且埠的數目更可隨使用者需求輕易地被增減，而三維多埠光學循環器更是二維多埠光學循環器之改良設計，除了原有的優點外，更改善了每個輸入訊號的兩種偏極分量皆擁有相同的光程，並減少了模組中偏極分光鏡與反射稜鏡的數目。

在第四章中提到一種群組濾波的方式，稱為『波長交織術』，該技術可將傳輸訊號以特殊的波長間隔做基準，將一連串的訊號切割為 odd-channel 與 even-channel 兩部份，或是將兩組訊號合併為一組週期更為密集的訊號群組。同時，在本章中也介紹具有波長交織能力的 Lyot-Öhman 濾波器的架構與特性，並針對現有的光纖通訊規格，提出該濾波器以及波長交織術相關的參數。

在第五章中，利用全像偏極選擇元件組成的三維全像空間偏極模組以及 Lyot-Öhman 濾波器，設計出一具有雙向循環能力的四埠偏極獨立的波長交織雙向光學循環器，其模組架構與特性在該章中有詳盡的解釋。為驗證其可行性，適用於波長 1550nm 之四埠雙向光學循環器模組在實驗中組裝，並討論此模組之效能及改進效能之方案。此設計具有密集、偏極獨立、低偏極模色散、高獨立性等優點。

第六章中，根據第三章中的多埠循環器設計，以及第五章中的雙向波長交織循環器的概念，進一步地著手發展出多埠雙向光學準循環器，其組成係利用數個全像空間偏極模組、一組全像空間偏離偏極器、一個四分之一波片、一個面鏡，以及一組 Lyot-Öhman 濾波器所組成，其中，全像空間偏極模組由一片全像空間偏離偏極器、一片二分之一波片，以及一片薄玻璃片所組成。由於設計的理念改變，所以該模組的架構較四埠雙向光學循環器簡單許多，且具有更佳的隔離值。為驗證其可行性，適用於波長 1550nm 之 5 埠雙向光學循環器模組在此被組裝。此外亦討論了此元件之操作原理及效能。此設計具有密集、偏極獨立、低偏極模色散、高獨立性等優點，且埠數可隨使用系統的需求輕易地擴充。

簡 歷

基本資料：

姓 名：謝博任 (Po-Jen Hsieh)

出生日期：民國 66 年 8 月 6 日

性 別：男

血 型：A

籍 貫：台灣省桃園縣

地 址：桃園縣楊梅鎮青山六街 51 巷 2 號

電 話：(03) 4961521



主要學經歷：

畢業學校	主修學系	學位	起迄年月
交通大學	光電工程研究所	博士	91/9-97/6
元智大學	電機工程研究所	碩士	89/9-91/6
中原大學	物理學系	學士	86/9-89/6

著作 (Publication List)

(A)期刊論文：

1. Jing-Heng Chen, **Po-Jen Hsieh**, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, “Multi-port polarization-independent optical quasi-circulators by using a pair of holographic spatial- and polarization- modules,” *Optics Express*, Vol. 12, No. 4, pp. 601-608, 2004.
2. Jing-Heng Chen, **Po-Jen Hsieh**, Jiun-You Lin, and Der-Chin Su, “Improved N-port optical quasi-circulator by using a pair of orthogonal holographic spatial- and polarization-modules,” *Optics Express*, Vol. 12, No. 26, pp.6553-6558, Dec. 2004.
3. Zhi-Cheng Jian, **Po-Jen Hsieh**, Hung-Chih Hsieh, Huei-Wen Chen, Der-Chin Su, “A method for measuring two-dimensional refractive index distribution with the total internal reflection of p-polarized light and phase-shifting interferometry,” *Optics Communications*, Vol. 268, pp.23-26, 2006.
4. **Po-Jen Hsieh**, Jing-Heng Chen, Hung-Chih Hsieh, Zhi-Cheng Jian and Der-Chin Su, “4-Port polarization-independent wavelength-interleaving bidirectional circulator,” *Optics Communications*, Vol. 281, Issue 2, pp. 225-231, 2008.
5. **Po-Jen Hsieh** and Der-Chin Su, “Multi-port Polarization-Independent Wavelength Interleaving Bidirectional Quasi-Circulator,” *Optical Engineering*, Vol. 47, No. 5, 2008.
6. **Po-Jen Hsieh**, Jing-Heng Chen and Der-Chin Su, “The polarization dependent AND-gate and NAND-gate by using holographic spatial- and polarization-modules,” will submit to *Applied Optics*.
7. **Po-Jen Hsieh** and Der-Chin Su, “The polarization independent wavelength interleaver by using holographic spatial- and polarization-modules,” will submit to *Optics Communications*.

(B)會議論文：

1. Jing-Heng Chen, **Po-Jen Hsieh**, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, “A optical circulator with holographic spatial walk-of polarizers,” Optics and Photonics Taiwan '02, Taipei, Taiwan, Dec. 2002, pp. 466-468.
2. **Po-Jen Hsieh**, Jing-Heng Chen, and Der-Chin Su, “Fabrication of polarization beam-splitting element by using thin holographic materials,” Optics and Photonics Taiwan '02, Taipei, Taiwan, Dec. 2002, pp. 295-297.
3. Jing-Heng Chen, **Po-Jen Hsieh**, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, “Multi-port polarization-independent optical quasi-circulators by using holographic optical elements,” Optics and Photonics '03, Taipei, Taiwan, Dec. 2003, pp. 269-271.
4. **Po-Jen Hsieh**, Jing-Heng Chen, and Der-Chin Su, “1-to-4ⁿ holographic optical array elements,” Optics and Photonics Taiwan '03, Taipei, Taiwan, Dec. 2003, pp. 605-607.
5. Jing-Heng Chen, **Po-Jen Hsieh**, Der-Chin Su, and Jung-Chieh Su, “3-port polarization-independent optical quasi-circulator with holographic spatial walk-off polarizers,” Photonics Europe '04, Strasbourg, France, Apr. 2004.
6. 謝博任、林俊佑、簡志成、陳揮文、蘇德欽, “使用一般全像材料製作偏極選擇元件的改進法,” Optics and Photonics Taiwan '04, Taipei, Taiwan, Dec. 2004, E-SU-V-9-1.
7. 林俊佑、謝博任、簡志成、陳揮文、蘇德欽, “測量散射性對掌性物質光學旋轉角之方法,” Optics and Photonics Taiwan '04, Taipei, Taiwan, Dec. 2004, PE-SA2-73.
8. 簡志成、林俊佑、謝博任、陳揮文、蘇德欽, “測量具有吸收性液體複數折射率的方法,” Optics and Photonics Taiwan '04, Taipei, Taiwan, Dec. 2004, E-SU-V-6-4.
9. 陳揮文、林俊佑、簡志成、謝博任、蘇德欽, “以小角度弱吸收材料量測其複數折射率的方法,” Optics and Photonics Taiwan '04, Taipei, Taiwan, Dec. 2004, E-SU-V-6-2.
10. **Po-Jen Hsieh**, Huei-Wen Chen, Zhi-Cheng Jian, and Der-Chin Su, “A method for measuring two-dimensional distribution of refractive index of a material,” ETOP2005,

- Marseill, France, Oct. 2005. Ref ETOP065, 461, pp.279-281.
11. **Po-Jen Hsieh**, Zhi-Cheng Jian, and Der-Chin Su, “An Alternative Method for Evaluating the Coherence Length of a Laser Diode,” ETOP2005, Marseill, France, Oct. 2005. Ref ETOP065, 461, pp.282-285.
 12. **謝博任**，簡志成，謝鴻志，楊惠婷，蘇德欽，“使用全像空間偏離元件的 4-埠雙向偏極獨立光學循環器，”2005 台灣光電科技研討會，台南市，2005 年 12 月，論文集 E-SA-VII-11-1.
 13. 簡志成，**謝博任**，謝鴻志，楊惠婷，蘇德欽，“使用 p-偏光全反射及移像干涉術測二維空間折射率分布，”2005 台灣光電科技研討會，台南市，2005 年 12 月，論文集 E-FR-VIII-2-1.
 14. 謝鴻志，簡志成，**謝博任**，楊惠婷，蘇德欽，“利用布魯斯特角入射觀察蓋玻片內透明物體的影像，”2005 台灣光電科技研討會，台南市，2005 年 12 月，論文集 PE-SA1-023.
 15. 陳彥良，謝鴻志，簡志成，**謝博任**，蘇德欽，“共光程外差干涉術測量二維相位延遲分佈，”2006 台灣光電科技研討會，新竹市，2006 年 12 月，論文集 EO-04.
 16. 謝鴻志，簡志成，**謝博任**，楊惠婷，吳旺聰，蘇德欽，“以旋光移相干涉術量測材料之二維折射率分佈，”2006 台灣光電科技研討會，新竹市，2006 年 12 月，論文集 EO-18.
 17. 楊惠婷，謝鴻志，簡志成，**謝博任**，吳旺聰，蘇德欽，“利用雙波長移相干涉術測量二維階高分佈，”2006 台灣光電科技研討會，新竹市，2006 年 12 月，論文集 EO-19.
 18. **謝博任**，簡志成，謝鴻志，楊惠婷，吳旺聰，蘇德欽，“偏極獨立的多埠雙向光學準循環器，”2006 台灣光電科技研討會，新竹市，2006 年 12 月，論文集 EO-21.
 19. 簡志成，**謝博任**，陳彥良，謝鴻志，楊惠婷，吳旺聰，蘇德欽，“全場外差干涉術的取樣誤差分析，”2006 台灣光電科技研討會，新竹市，2006 年 12 月，論文集 EP-094.