

液晶可調式積體光學高分子光柵耦合式 光補/取多工元件之設計

A novel Tunable Optical Add-Drop Multiplexer Using a Liquid Crystal as the Active Layer

李昆益¹

李偉裕²

Kun-Yi Lee

Wei-Yu Lee

¹中華技術學院電機系助理教授

²中華技術學院電機系教授

Department of Electrical Engineering

China Institute of Technology

摘 要

本文提出一新型可調式積體光學光補/取多工元件，針對其元件特性作一設計並模擬。該元件以非對稱布拉格光柵耦合器架構為基礎，嘗試製作出低成本、易量產且符合現今通信系統需求之新式光波長補取多工器之原型。元件可對單一波長同時進行光補/取動作，以液晶原理進行小範圍之選擇波長調整，操作頻寬為 $32.5 \pm 8\text{GHz}$ ，波長可調範圍為 $1549.15\sim 1551.15\text{nm}$ ，即 250GHz 。

關鍵字：積體光學、可調式光補/取多工器、液晶、布拉格光柵

ABSTRACT

A novel type of tunable optical add/drop multiplexer device is presented in this paper. The structure is based on the asymmetric bragg coupler in terms of the polymer ridged waveguide and the liquid crystal as the active layer material. The operating bandwidth is about $32.5 \pm 8\text{GHz}$, and the range is about 250GHz for narrow band tuning.

Keywords: Integrated optics, tunable OADM, liquid crystals, bragg grating

I. 簡介

光波長補取多工器(Optical Add-Drop Multiplexers, OADM)[1]是高密度波長多工系統(Dense Wavelength Division Multiplexer, DWDM)中不可或缺的元件，可運用

在網路節點上處理多條經由該節點進行上、下路的波長，以簡化網路設備的架構。

至目前為止，已有很多的光波長補取多工技術被發表，例如：陣列波導光柵 (Array Waveguide Grating, AWG)與光開關組成的光補取多工器、馬克-詹德式干涉儀與光纖光柵所組成的光補取多工器 (bragg grating-assisted Mach-Zehnder interferometer-based OADM)[2]、聲光可調濾波器式光補取多工器 (acoustic-optic tunable filter OADM)，及以布拉格光纖光柵為基礎的光補取多工器 (fiber bragg grating OADM) [3]。因應 DWDM 系統之每一光纖中波長數增加，而使 OADM 的設計趨於複雜，且容納更多的波長處理能力，因此可調式光補取多工器 (tunable OADM)[4]的需求與實用性將日益擴大。

本文主要提出一新型可調式積體光學光補/取多工元件，針對其元件特性作一設計並模擬。而元件設計是以非對稱布拉格耦合器 (asymmetric bragg coupler) 架構[5]為基礎，進而設計可對單一波長同時進行光補/取之元件，並在基板中灌注液晶為主動覆層，及在基板上下各加電極板，如圖 1。以外加電壓控制液晶晶體軸向，使波導之等效折射率隨電場變化。此元件除了可改進其應用在光纖光柵時的缺點外，亦可在小範圍中調整選擇波長，是為一可調式光補/取多工元件，具有結構簡單、成本低廉等優點。

II. 設計原理

一、波導模態分析

對於光柵耦合器之分析，在本文中採用 D. Marcuse 之較準確模式耦合模態波導理論，而所設計的結構中，只考慮耦合器在單一橫向電場 transverse-electric (TE) 時的前向及後向兩種模態，耦合器之模態如圖 2 所示。單一模態波導及光柵波導的場型分佈，在第一條波導中，橫向電場之表示式如下：

$$e_{y1}(x) = E_{f1} \begin{cases} \cos(k_{f1}h_1 - \phi_{s1})\exp[-\gamma_{s1}x] & \text{at } x > 0 \\ \cos[k_{f1}(x+h_1) - \phi_{s1}] & \text{at } -h_1 \leq x \leq 0 \\ \cos(\phi_{s1})\exp[\gamma_{s1}(x+h_1)] & \text{at } x < -h_1 \end{cases} \quad (1)$$

以第二條波導來說，即光柵波導的電場為：

$$e_{y_2}(x) = E_{f_2} \begin{cases} \cos(k_{f_2}h_2 - \phi_{s_2}) \exp[-\gamma_{s_2}(x + h_1 + s)] \\ \quad \text{at } x > -(h_1 + s) \\ \cos[k_{f_2}(x + h_1 + s + h_2) - \phi_{s_2}] \\ \quad \text{at } -(h_1 + s + h_2) \leq x \leq -(h_1 + s) \\ \cos(\phi_{s_2}) \exp[\gamma_{s_2}(x + h_1 + s + h_2)] \\ \quad \text{at } x < -(h_1 + s + h_2) \end{cases} \quad (2)$$

二、波導耦合方程式

兩波導互相平行靠近時，由於波導中橫向電場之衰減場（evanescent field）的相互作用，因而產生模態的耦合現象。利用此一現象，使有效地交換能量。於是，兩波導內之傳播光場可分解成前向(forward)及後向(backward)兩種模態，此元件其中一波導具有週期性折射率光柵(periodic index grating)，必須考慮被向耦合；另一波導則否。由此耦合器之耦合方程式可表示為：

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} &= iK_{11}A_1 + iK_{21} \exp[i(\beta_2 - \beta_1)z]A_2 \\ &\quad + iK_{11} \exp(-i2\beta_1z)B_1 + iK_{21} \exp[-i(\beta_2 + \beta_1)z]B_2 \\ \frac{dA_2}{dz} &= iK_{12} \exp[i(\beta_1 - \beta_2)z]A_1 + iK_{22}A_2 \\ &\quad + iK_{12} \exp[-i(\beta_1 + \beta_2)z]B_1 + iK_{12} \exp(-i2\beta_2z)B_2 \\ \frac{dB_1}{dz} &= -iK_{11} \exp(i2\beta_1z)A_1 - iK_{21} \exp[i(\beta_2 + \beta_1)z]A_2 \\ &\quad - iK_{11}B_1 - iK_{21} \exp[-i(\beta_2 - \beta_1)z]B_2 \\ \frac{dB_2}{dz} &= -iK_{12} \exp[i(\beta_1 + \beta_2)z]A_1 - iK_{22} \exp(i2\beta_2z)A_2 \\ &\quad - iK_{12} \exp[-i(\beta_1 - \beta_2)z]B_1 - iK_{22}B_2 \end{aligned} \quad (3)$$

設 L 為波導長度，起始條件為 $A_1(0) = 1; A_2(0) = 0; B_1(L) = 0; B_2(L) = 0$ 。兩條波導上的模態分別為模態 ν 及模態 μ ，耦合係數即為 $K_{\nu\mu}$ ，它與擾動係數 $\Delta\varepsilon_{\nu\mu}$ 有著密切的關係，耦合係數為

$$K_{\nu\mu}(z) = \frac{\omega}{4} \int_{-x}^x \Delta\varepsilon_{\nu\mu}(x, z) e_{y\nu}(x) e_{y\mu}^*(x) dx \quad (4)$$

三、等效折射率法

對於脊狀波導，以光束傳播法之分析其單模態條件，本應採用三維光束傳播法得到較精確的結果，但牽扯到計算的面積太過於複雜，其所需的計算能力，已

超越 Matlab 程式所能處理的範圍。所以必須利用等效折射率之方法比較二維及三維光束傳播法的準確度問題，以期能用二維光束傳播法簡化之。

利用等效折射率之方法，可得二維與三維光束傳播法模擬所得之等效折射率結果僅相差約 0.122%，故爾後的模擬均採用二維光束傳播法進行之，若欲得較精確之結果，可將模擬所得之分光器長度乘上 1.0012207 的校正參數即可。

四、液晶特性分析

液晶很容易受外力影響而產生光學效應的變化，如電場、磁場、電流、溫度、壓力等等。以電光效應來說，一旦液晶受到外加電場的作用時，便容易被極化（Polarized）而轉向。在本研究中，利用晶體轉向而造成之折射率變化，進而使耦合器波導之等效折射率改變，以達到選擇波長可調之功能。

光是一種電磁波，吾人將其電場方向稱為光的偏極方向。光經過物質時，折射率與光偏極化的方向有關。假設 \vec{n} 為液晶之向矢方向，則在大部分向列型液晶中，光偏極化方向與 \vec{n} 相同時折射率（ $n_{//}$ ）較大，光偏極化方向與 \vec{n} 垂直時折射率（ n_{\perp} ）較小。一偏極光經過一液態晶體後其偏極方向有時會改變，且視液態晶體之排列而定。所以我們改變液態晶體之排列方式即可改變通過光之偏極性。

由於液晶分子的結構為異方性（Anisotropic），所以引起的光電效應就會因為方向不同而有所差異，也就是液晶分子在介電係數及折射係數等光電特性都具有異方性。

圖 3 為負型單光軸晶體折射率橢球示意圖， s 為入射光方向，假設因外加電場使液晶旋轉 θ 角，形成之等效折射率為

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

n_o 指對於尋常光（ordinary ray）的折射率； n_e 則是指對於非尋常光（extraordinary ray）的折射率。

III. 元件模擬設計

今以 OG 系列高分子為基板及波導材料，液晶為主動覆層（active cladding），波導為脊狀結構（ridge structure），且上下夾 ITO 玻璃以作為電極，元件操作示意圖如圖 4，經分析得最佳參數如表 1。當模態進入無光柵波導 WG 後，在長度 L 中的穿透強度為 T1、T2，而反射強度為 R1、R2。元件在完全無偏壓下，即液晶折射

率為1.485，其頻譜如圖5，在波長1549.15nm可於WG 取得極佳之強度，即 $R_2=0.9071$ ，。當電壓控制液晶折射率為1.485~1.497時，仍有良好之強度，操作頻寬控制為 $32.5 \pm 8\text{GHz}$ ，如圖6、圖7。其元件設計之波長可調範圍在1549.15~1551.15nm之間。

IV. 結論

在結構簡單、製作容易、便宜且可積體化之基礎下，設計以液晶原理進行小範圍之選擇波長調整，液晶調整波長在1549.15~1551.15nm之間，即250GHz，可得到add及drop最佳操作，該元件參數可參考表1，操作頻寬為 $32.5 \pm 8\text{GHz}$ 。

V. 參考文獻

1. C. Riziotis and M. N. Zervas, "Design considerations in optical add/drop multiplexers based on grating-assisted null couplers," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 19, No. 1, Jan. 2001.
2. T. Erdogan, T.A. Strasser, M.A. Milbrodt, E.J. Laskowski, C.H. Henry, G.E. Kohnke, "Integrated-optical Mach-Zehnder odd-drop filter fabricated by a using UV-induced grating exposure," *Appl. Opt.*, Vol.36, pp.7838-7845, 1997.
3. A. S. Kewitsch, G. A. Rakuljic, P. A. Willems, and A. Yariv, "All-fiber zero-insertion-loss add-drop filter for wavelength-division multiplexing," *Opt. Lett.*, Vol. 23, No. 2, pp. 106-108, Jan. 1998.
4. P. Tang, O. Eknayan, and H. F. Taylor, "Rapidly tunable optical add-drop multiplexer (OADM) using a static-strain-induced grating in LiNbO_3 ," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 1, Jan. 2003.
5. T. Erdogan, "Optical add-drop multiplexer based on an asymmetric Bragg coupler," *Optics Communications*, Vol. 157, pp. 249-264.

表 1 光補取元件設計參數

| | |
|--------------|--|
| Cladding | Thickness $10\mu\text{m}$ / Refractive index (n_c) 1.3 |
| Substrate | thickness $15\mu\text{m}$ / Refractive index (n_s) 1.49 |
| Waveguide I | thickness (t) $4\mu\text{m}$ / Width (w_1) $3\mu\text{m}$ / Refractive index(n_{f1}) 1.51 |
| Waveguide II | thickness (t) $4\mu\text{m}$ / Width (w_2) $5\mu\text{m}$ / Refractive index(n_{f2}) 1.52 Index modulation 5.5×10^{-3} |
| Coupler | distance (S) $4\mu\text{m}$ / Length (L) 15mm / grating period(Λ) $0.516\mu\text{m}$ |

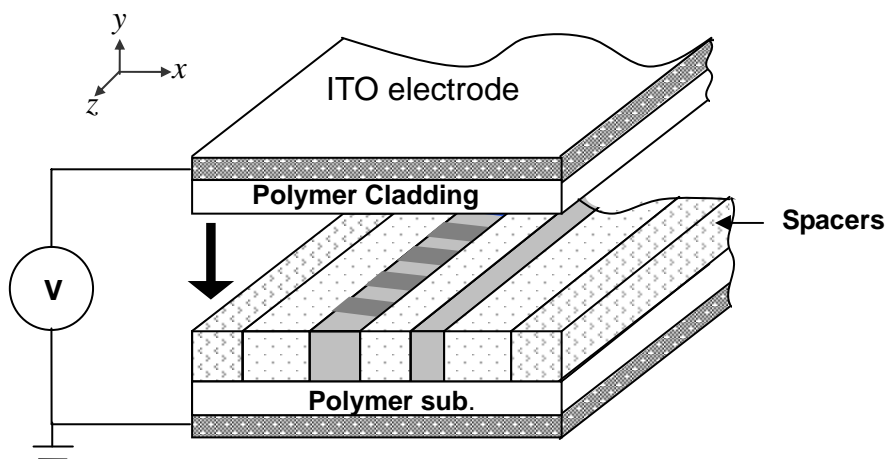


圖1 液晶可調式光補/取多工元件示意圖

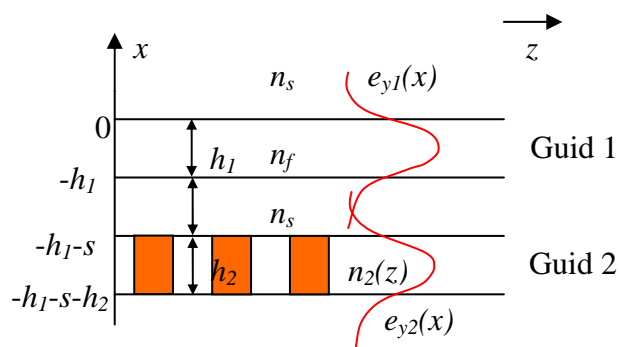


圖2 耦合器之模態示意圖

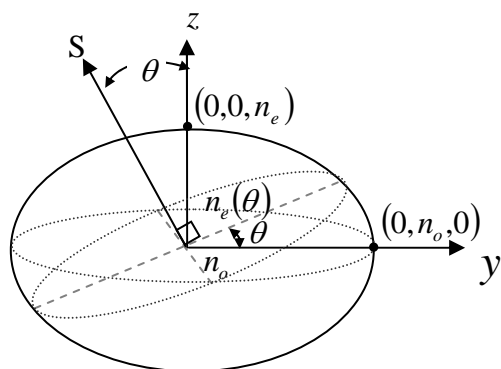


圖3 折射率椭球示意圖

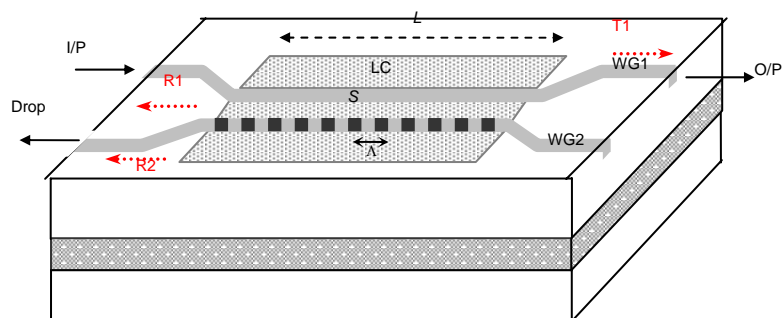


圖4 可調式光補/取多工元件操作及參數示意圖

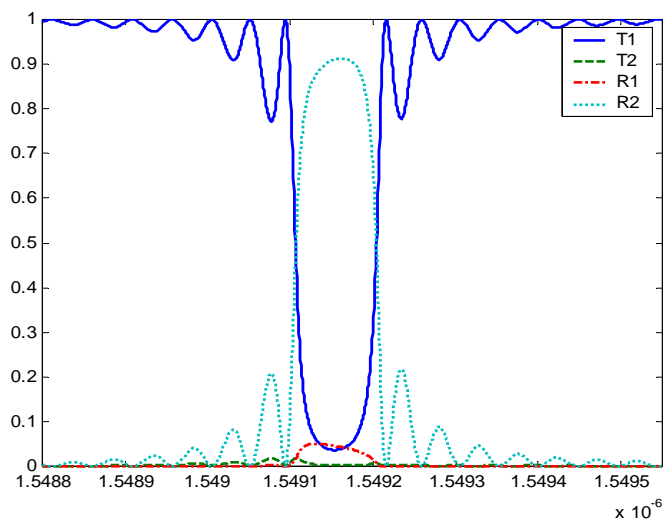


圖5 液晶折射率為1.485之頻譜圖

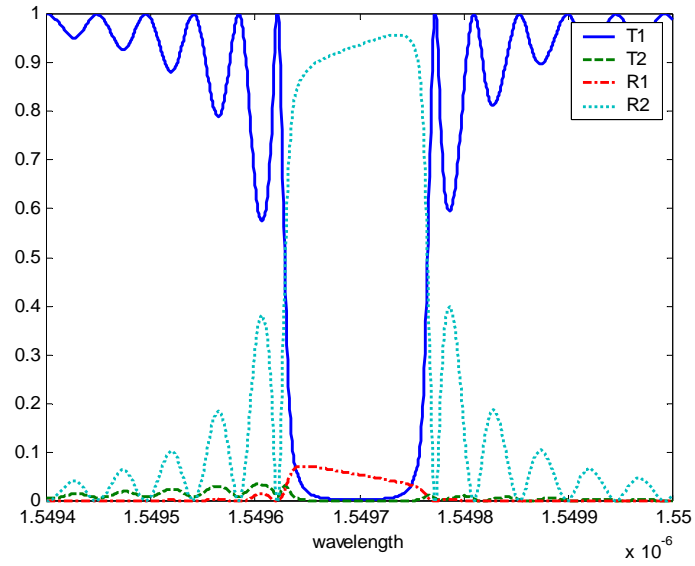


圖6 液晶折射率為1.49之頻譜圖

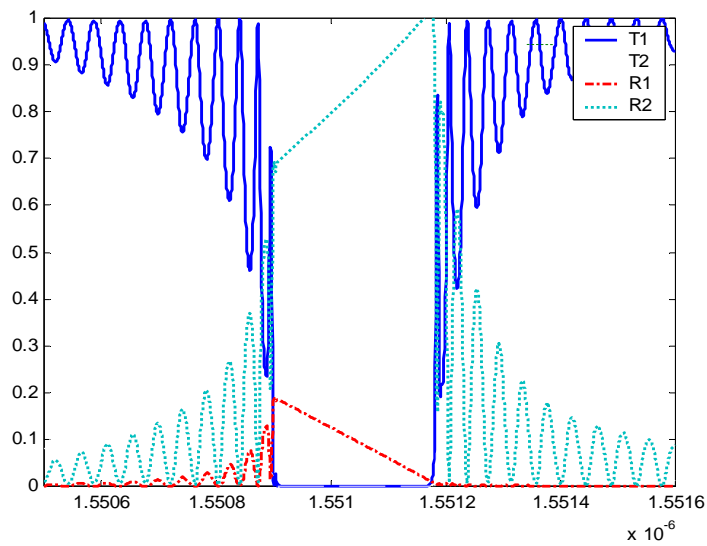


圖7 液晶折射率為1.497之頻譜圖