

新型 1.3/1.55 μm 波長分波解多工器

A Novel 1.3/1.55 μm Wavelength Demultiplexer

林晏瑞¹ 林坤成¹ 李昆益¹ 李偉裕²
Yen-Juei Lin Kuen-Cherng Lin 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兼教評委員
China Institute of Technology

摘 要

我們提出一種新型的 1.3/1.55 μm 波長解多工器，並使用磷化銦材料系統，因此方便與雷射和光偵測器積體化在一起。為了縮短元件長度並增加波長變動容忍度，我們在多模干涉結構裡面放置一個週期漸變光柵。藉由雙向光束傳播法來模擬此元件，結果顯示此解多工器具有很低的插入損耗和高的隔離度。本文也將描述光柵的製作方法。

關鍵詞：波長解多工器、多模干涉、週期漸變光柵、積體光學

ABSTRACT

We propose a novel 1.3/1.55 μm wavelength demultiplexer for integration with lasers and detectors on the InP material system. A chirp grating is placed inside a multimode interference (MMI) structure to shorten the device length and increase wavelength tolerance. The simulation using the bi-directional beam propagation method proves that the demultiplexer can have very low insertion loss and high isolation ratio. The approach of grating fabrication is also described.

Keywords: Wavelength demultiplexer, Multimode interference, Chirp grating, Photonic integration

一、前言

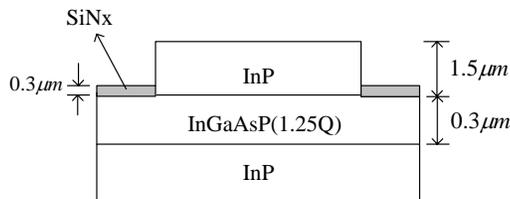
WDM 技術在光纖通訊系統中扮演一個很重要的角色，因為它可以增加網路的頻

寬和彈性。在 WDM 傳輸系統中，波長多工器(Mux)和解多工器(Demux)是不可或缺的元件，可以將載送不同資訊的波長分別進行合併或解離。其中 1.3/1.55 μm 系統經常被使用在雙向傳輸的光纖網路中，並且對存取應用而言是不錯的解決方案，舉例來說，如光纖到家的應用[1]。而要使系統更低價的關鍵因素，就是要把雷射及光偵測器與多工器或解多工器積體化在一起，如此可靠度也可提高。目前已經有很多積體光學的概念被提出來，用來實現 1.3/1.55 μm 的解多工，包含方向耦合器(directional coupler)[2]、非對稱性 Y-分支元件[3]、非對稱性馬赫任德干涉器[4]、和多模干涉元件[5]等。其中 MMI 解多工器特別受到矚目，因為它具有體積小、損耗低、和比較大的製程容忍度等優點。

大部分現存的 1.3/1.55 μm 多工器及解多工器都是製作在離子交換玻璃或是矽基板上[5]，但是光源及光偵測器卻主要以 InP/InGaAsP 材料為基底，因此彼此很難積體化在一起。在本文中，我們成功設計出以 InP/InGaAsP 材料為基底的 1.3/1.55 μm 新型 MMI 解多工器 與別人不一樣的地方是：我們把一個週期漸變光柵反射鏡放進於 MMI 區域裡，如此元件長度可以大幅縮短。我們透過雙向光束傳播法來模擬此新型元件的特性，並分別就頻寬及製程容忍度二項目與傳統的 MMI 解多工器作比較。

二、傳統 MMI 解多工器設計

傳統的MMI波長分解多工器其架構如圖 1 所示。輸入及輸出存取波導的寬度為 1 μm 。MMI元件的操作是以多模波導的自我成像效應為基礎[5]。為了使元件能夠盡量地縮短，我們採用了限制型的干涉條件。因此，存取波導的中心點位於MMI寬度 W 的 1/3 和 2/3 處。為了達成解多工器的功能，針對波長 1.55 μm 和 1.3 μm ，MMI波導必須分別當作交叉耦合器及直條耦合器。當我們選擇耦合器寬度為 8.4 μm 時，則最短的耦合器長度 $L_d=6L_{\pi,1.3\mu\text{m}}=7L_{\pi,1.55\mu\text{m}}=1700\mu\text{m}$ 可以被解出來，其中 $L_{\pi,1.3\mu\text{m}}$ 和 $L_{\pi,1.55\mu\text{m}}$ 分別是 1.3 μm 及 1.55 μm 光波的共振長度。



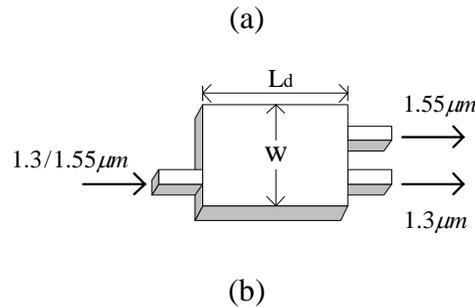


圖 1 (a)脊型波導的剖面圖和(b)MMI 波長解多工器的上視圖。

三、新型光柵輔助式 MMI 解多工器設計

圖 2 是週期漸變光柵輔助式 MMI 波長分波解多工器的上視圖，其波導的結構與圖 1(a)所示的一樣。週期漸變光柵的反射率頂點落在 $1.55\mu\text{m}$ 。此光柵週期選擇漸變的方式，是為了增加反射頻寬。在 MMI 耦合器中引入週期漸變光柵可以使元件具有波長選擇性。 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 的訊號在經過一個 $L_{\pi,1.3\mu\text{m}}$ 的距離後可由交叉埠輸出。 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 的訊號被光柵反射，而繞一圈所經過的距離為一個 $L_{\pi,1.55\mu\text{m}}$ 。在我們的設計中，當 MMI 耦合器的寬度為 $15\mu\text{m}$ 時，光訊號 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 的共振長度分別是 $850\mu\text{m}$ 及 $632\mu\text{m}$ 。MMI 區域的寬度理論上可以設小一點以求縮短共振長度，然而，為了得到最佳的光柵反射效率，需要加大 MMI 寬度以容納更多模態。在此，輸入和輸出存取波導的寬度是 $2\mu\text{m}$ 。光柵的週期變動由 0.241 到 $0.243\mu\text{m}$ 。

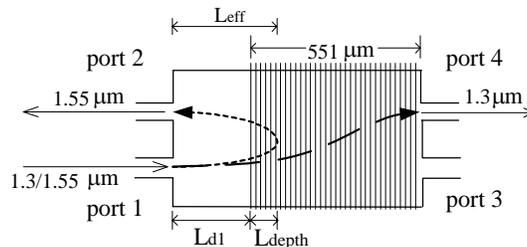


圖 2 週期漸變光柵輔助式 MMI 波長解多工器的上視圖

週期漸變光柵可以使用電子束微影法(electron beam lithography, EBL) [6]或是相位光罩法(phase mask) [7]來實現。使用 EBL 法雖然可以製作任何複雜形式的光柵，然而，在製作週期漸變光柵時其光束聚焦位置的解析度必須要很高。另一方面，相位光罩技術的優點是製作程序較簡單，因此已被用來製作週期漸變或等週期性光纖光柵。使用市售的相位光罩來製作週期漸變光柵，其週期漸變率(chirp rate)大約可做到

40nm/cm。

必須再補充的是，理論上，光柵也可以放在MMI區域的外面，如圖 3 所示。這種結構已經有人用來實現高密度波長分波多工(DWDM)的光塞取多工器(add/drop multiplexer) [8]，然而，跟我們設計的架構比起來這需要很長的長度。在圖 3 中，當 1.3/1.55- μm 的多工訊號由輸入埠入射後，只要光柵的反射率頂點落在 1.55- μm ，則 1.55- μm 的訊號就可以被反射因此與 1.3- μm 的訊號分離。1.3- μm 的訊號被導引至輸出埠。依據自我成像效應，2-點影像將出現在 $(p/2)L_{\pi}$ 處，其中 p 為奇整數。在這個情況下，MMI耦合器的長度必須符合下面的關係式：

$$L_{d1} = \frac{p_1}{2} \cdot L_{\pi,1.55\mu\text{m}} = \frac{p_2}{2} \cdot L_{\pi,1.3\mu\text{m}}$$

其中 p_1 和 p_2 是奇整數。

以 InP 為基板的光波導其材料損耗約為 5dB/cm。因此，較長的 MMI 將導致較大的插入損耗。我們提出在 MMI 的中間區域置入光柵用以反射 1.55 μm 的光，如此可以有效地縮短元件長度。

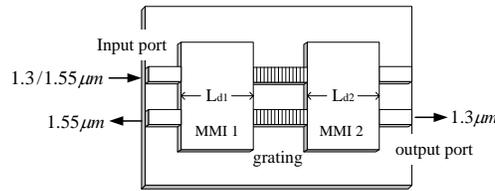


圖 3 傳統的光柵輔助式 MMI 光塞取多工器示意圖。

四、分析與討論

要分析 MMI 波導結構，我們首先要計算所有波導模態的傳播常數和其場分佈。然後，利用模態延展法可以得到前向和反向的輸出場型，這個方法的好處是可以簡單地先快速最佳化元件結構。接著，我們用雙向光束傳播法來研究光場在新型 MMI 解多工器中的傳播特性。

經由光柵反射的光場其模態 m 的反射係數可以表示如下[9]：

$$r_m(\lambda) = |r_m(\lambda)| \exp(j\psi_m(\lambda))$$

其中 $\psi_m(\lambda)$ 是反射光的相位。為了提供 1.55 μm 光的波長容忍度， $r_m(\lambda)$ 的頻寬需要加大，而使用週期漸變光柵可以達成這個目標。穿透光柵的光場其模態 m 的穿透係數可以表示如下：

$$t_m(\lambda) = |t_m(\lambda)| \exp(j\theta_m(\lambda)),$$

其中 $\theta_m(\lambda)$ 是穿透光的相位。在向前傳播的方向， $1.3\mu\text{m}$ 的訊號可以忽略光柵的干擾，所以在 $z=L_d$ 處多個模態干涉所得到的輸出場型是

$$\Phi_t(y, L_d) = \sum_{m=0}^{M-1} |t_m(\lambda)| c_m \varphi_m(y) \cdot \exp(j(\beta_0 - \beta_m)L_d) \exp(j\theta_m(\lambda))$$

另一方面，於反向傳播的方向，在 $z=0$ 處多個模態干涉所得到的輸出場型可以表示成

$$\Phi_r(y, 0) = \sum_{m=0}^{M-1} |r_m(\lambda)| c_m \varphi_m(y) \cdot \exp(j(\beta_0 - \beta_m)2L_{eff}) \exp(j\psi_m(\lambda))$$

如果所有的模態都有相同的反射係數和穿透係數，則上式可以改寫如下

$$\begin{aligned} \Phi_t(y, L_d) &= t(\lambda) \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp\left[j \frac{m(m+2)\pi}{3L_\pi} L_d\right] \varphi_m(y), \\ &\cong t(\lambda) \Phi(-y, 0) \quad \text{when } L_d = L_\pi \\ \Phi_r(y, 0) &= r(\lambda) \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp\left[j \frac{m(m+2)\pi}{3L_\pi} 2L_{eff}\right] \varphi_m(y). \\ &\cong r(\lambda) \Phi(-y, 0) \quad \text{when } L_{eff} = \frac{L_\pi}{2} \end{aligned}$$

因為材料及波導的折射率色散，所以 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 光波的共振長度不一樣。對於傳統的MMI解多工器而言，其MMI耦合器的長度必須是 $L_{\pi, 1.3\mu\text{m}}$ 及 $L_{\pi, 1.55\mu\text{m}}$ 的公倍數。而在新的設計中這個限制條件被去除掉，所以元件長度可以大幅縮短。

實際上，不同模態其有效折射率會有些微的不同，這將導致不同的反射率和相位，所以最後場的分佈結果將與上式有點差異。當MMI的寬度變寬時將可以容納較多的模態，如圖4所示，模態間的有效折射率差異就會變小。所以在這個地方對於MMI寬度的選擇，必須在縮短元件長度和獲得可預測的反射率間做個取捨。

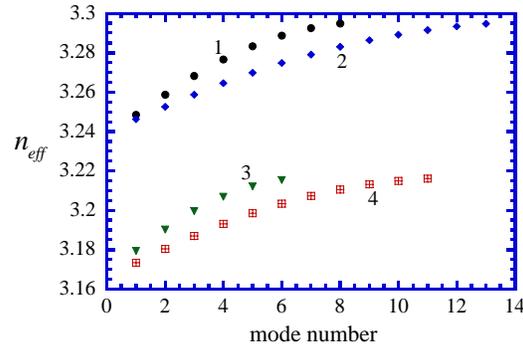


圖 4 不同波導模態所對應的有效折射率 n_{eff} 。(1) $W=8.4\mu\text{m}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, (2) $W=15\mu\text{m}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, (3) $W=8.4\mu\text{m}$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$, (4) $W=15\mu\text{m}$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 。

在經過模態延展法最佳化元件尺寸後，要模擬及比較波長解多工器的特性，可以換使用光束傳播法。圖 5 是傳統的 MMI 波長解多工器之光場傳播圖，我們可以清楚地發現波長解多工的功能。

波長解多工器的效能可以由隔離度和插入損耗來衡量，這分別定義為 $10\log(P_{o,r}/P_{o,w})$ 和 $-10\log(P_{o,r}/P_i)$ 。其中 P_i 是輸入埠的光功率，而 $P_{o,r}$ 和 $P_{o,w}$ 分別代表由正確輸出埠和錯誤輸出埠所量得的光功率。圖 6 是傳統的 MMI 解多工器之隔離度和插入損耗對耦合器長度作圖。模擬結果顯示，針對波長 $1.55\mu\text{m}$ 其插入損耗為 1.6dB 而隔離度為 32dB ，另外針對波長 $1.3\mu\text{m}$ 其插入損耗為 1.7dB 而隔離度為 36dB 。最佳化的 MMI 耦合器長度是 $1700\mu\text{m}$ 。如果限制隔離度要 $>20\text{dB}$ ，則 MMI 長度的製程容忍度可為 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 。此 MMI 解多工器的操作波長變動容忍度如圖 7 所示。當限制隔離度 $>20\text{dB}$ 時，光源的波長漂移容忍度為 $\pm 2.5\text{nm}$ 。

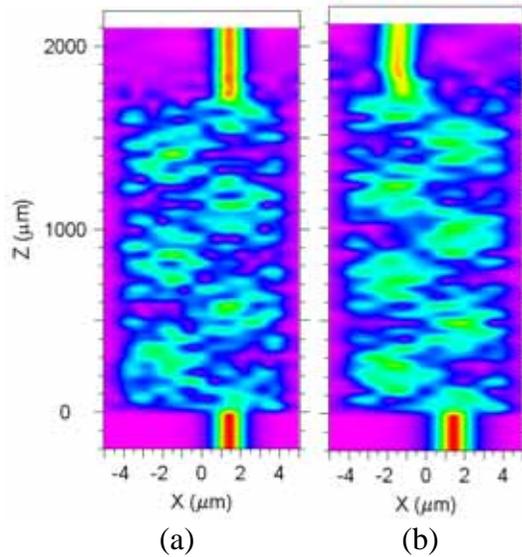


圖 5 模擬沿著波導傳播的光場在波長為(a)1.3μm 及(b)1.55μm 時。

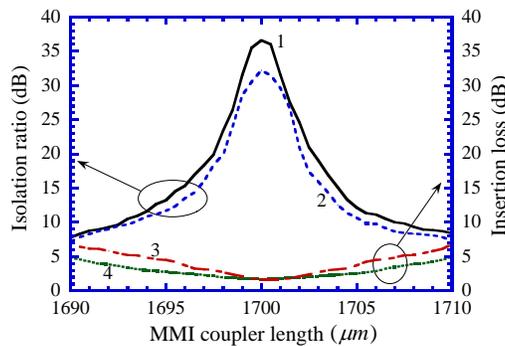


圖 6 MMI解多工器的效能對耦合器長度 L_d 作圖。(1)波長 1.3μm的隔離度，(2)波長 1.55μm的隔離度，(3)波長 1.55μm的插入損耗，(4)波長 1.3μm的插入損耗。

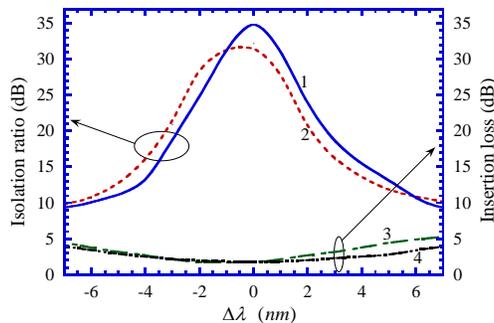


圖 7 MMI 解多工器的效能對操作波長變動容忍度作圖。(1)波長 1.3μm 的隔離度，(2)

波長 1.55 μm 的隔離度,(3)波長 1.55 μm 的插入損耗,(4)波長 1.3 μm 的插入損耗

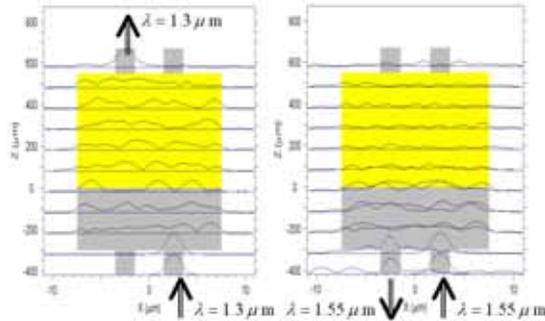


圖 8 模擬沿著波導傳播的光場

碰到週期漸變光柵而反射的光，由於其頻譜響應需綜合考慮多個模態的耦合效應，較難由數學上直觀預測其頻寬，我們用雙向光束傳播法來模擬光柵輔助式 MMI 解多工器的效能，可以快速得到結果。沿著波導傳播的光場如圖 8 所示，由此，我們很清楚地發現波長解多工的功能。這個耦合器的四個埠之隔離度可以定義如下：

在操作波長為 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 時：

$$\text{隔離度\#1} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{port 2}}{P_{port 4}} \right),$$

$$\text{隔離度\#2} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{port 2}}{P_{port 3}} \right),$$

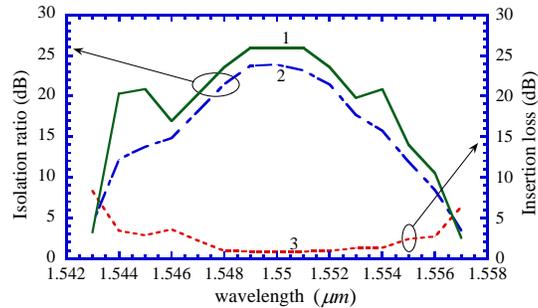
在操作波長為 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 時：

$$\text{隔離度\#3} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{port 4}}{P_{port 2}} \right),$$

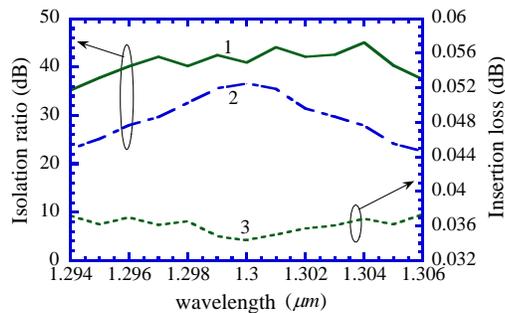
$$\text{隔離度\#4} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{port 4}}{P_{port 3}} \right).$$

其中 $P_{port 2}$ 、 $P_{port 3}$ 和 $P_{port 4}$ 分別代表在輸出埠編號 2、3 和 4 的輸出光功率(見圖 2)。在此，定義不同輸出埠的隔離度，可以讓我們仔細研究多工器的效能，以後並可用於雙工(duplex)的傳送接收機上[1]。圖 9 是 MMI 解多工器之隔離度和插入損耗對波長作圖。模擬結果顯示，針對波長 1.55 μm 其插入損耗為 0.8dB 而隔離度為 26dB，另外針對波長 1.3 μm 其插入損耗為 0.03dB 而隔離度為 41dB。光波 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 的插入損耗非常的

小，而且當限制隔離度 $>20\text{dB}$ 的情況下，它的波長容忍度大於 10nm 。光波 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 的插入損耗有大一點是因為來自於光柵的輻射損耗，當波長變動在 5nm 以內時，可以有大有於 20dB 的隔離度。圖 10(a)和(b)分別是MMI解多工器之隔離度和插入損耗對 L_{dl} 作圖。最佳化的 L_{dl} 長度是 $299\mu\text{m}$ ，而當限制隔離度 $>20\text{dB}$ 的情況下，它的長度變動容忍度可以大於 $10\mu\text{m}$ 。



(a)



(b)

圖 9 MMI 解多工器的效能對波長作圖。(a)波長在 $1.55\mu\text{m}$ 附近(曲線 1 代表隔離度#1，曲線 2 代表隔離度#2，曲線 3 代表插入損耗)，(b)波長在 $1.3\mu\text{m}$ 附近(曲線 1 代表隔離度#3，曲線 2 代表隔離度#4，曲線 3 代表插入損耗)。

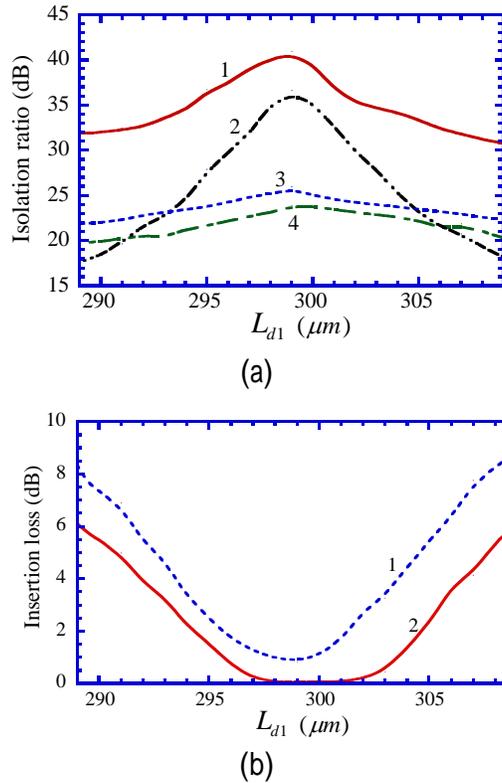


圖 10 MMI解多工器的效能對 L_{d1} 長度作圖。(a)隔離度(曲線 1 代表隔離度#3，曲線 2 代表隔離度#4，曲線 3 代表隔離度#1，曲線 4 代表隔離度#2)，(b)插入損耗(曲線 1：波長為 1.55 μm ，曲線 2：波長為 1.3 μm)。

參考文獻

- [1] T. Hashimoto, T. Kurosaki, M. Yanagisawa, Y. Suzuki, Y. Akahori, Y. Inoue, Y. Tohmori, K. Kato, Y. Yamada, N. Ishihara, and K. Kato, "A 1.3/1.55- μm wavelength-division multiplexing optical module using a planar lightwave circuit for full duplex operation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 1541-1547, 2000.
- [2] K. Hattori, T. Kitagawa, M. Oguma, Y. Ohmori, and M. Horiguchi, "Erbium doped silica based waveguide amplifier integrated with a 980/1530 nm WDM coupler," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 856-857, 1994.
- [3] H. Sasaki, E. Shki, and N. Mikoshiba, "Propagation characteristics of optical guided

- wave in asymmetric branching waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, pp. 1051-1058, 1981.
- [4] C. Kostrzewa, and K. Petermann, "Bandwidth optimization of optical add/drop multiplexers using cascaded couplers and Mach-Zehnder sections," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 902-904, 1995.
- [5] B. Li, G. Li, E. Liu, Z. Jiang, J. Qin, and X. Wang, "Low-loss 1×2 multimode interference wavelength demultiplexer in silicon-germanium alloy," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 575-577, 1999.
- [6] K. D. Schock, F. E. Prins, S. Strahle, and D. P. Kern, "Resist process for low-energy electron-beam lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B* 15, p.2323, 1997.
- [7] K. O. Hill, and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1263-1276, 1997.
- [8] Y. Shibata, S. Oku, Y. Kondo, T. Tamamura and M. Naganuma, "Semiconductor monolithic add-drop multiplexer using a grating switch integrated with coupler structure," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 489-491, 1999.
- [9] T. Augustsson, "Bragg grating-assisted MMI-coupler for add-drop multiplexing," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 1517-1522, 1998.