

# FBG를 이용한 DWDM용 광 Add-Drop 다중화기에 관한 연구

손 용 환, 신 희 성, 허 주 옥, 장 우 순, 정 진 호  
호서대학교 전자공학과  
전화 : 041-540-5663 / 핸드폰 : 017-334-3274

## The Optical Add-Drop Multiplexer for DWDM Using Fiber Bragg Grating

Yong-Hwan Son, Hee-Sung Shin, Joo-Ok Huh, Woo-Soon Jang, Jin-Ho Jung  
Dept. of Electronic Engineering, Hoseo University  
E-mail : sonyh38@dreamwiz.com

### Abstract

Dense Wavelength division multiplexing(DWDM) lightwave system requires multiplexer, demultiplexer and optical filter. In this paper, thus, we propose the Add-Drop Mux/Demux based on a Mach-Zehnder interferometer(MZI) with fiber Bragg grating(FBG). The Add-Drop Mux/Demux using FBG and MZI is able to minimize system and reduce weight. We also analyze output characteristics of Add-Drop Mux/Demux and present the optimum design data through the computer simulation.

### I. 서 론

최근 정보통신의 급속한 발전에 따른 정보량의 급증 현상으로 인해 초고속 정보통신의 기술에 대한 요구가 기하급수적으로 늘어나고 있다. 이러한 요구를 수용하기 위해 현재 많이 연구되고 있고 있는 기술중의 하나가 조밀 파장분할 다중화(DWDM:Dense Wavelength Division Multiplexing)기술이다[1]. DWDM 광통신에서는 여러 파장의 신호를 하나로 결합시켜주고, 분리시켜주는 멀티플렉서(Multiplexer), 디멀티플렉서(Demultiplexer) 그리고 특정파장을 선택할 수 있는 필터 등이 필수적으로 필요하다. 그러나, 현재 사용되고 있는 것은 대체로 벌크의 형태이므로 손실이 비교적 크

고 시스템을 소형화, 경량화 하는데 어려움이 있어 이를 보완하기 위한 소자의 설계가 필요하다.

이에 본 논문에서는 소형, 경량의 DWDM 광통신 시스템의 구현을 위해 파이버 브래그 격자(FBG:Fiber Bragg Grating)와 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 파장선택 필터 및 여러 파장들을 결합, 분리시킬 수 있는 Add-Drop Mux/Demux(Multiplex/Demultiplexer)를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 특성을 분석하여 최적의 설계 데이터를 제시하고자 한다.

### II. 광 파이버 격자의 이론적 고찰

광 파이버 격자란 광 파이버 코어에 주기적인 굴절률 변화를 영구적으로 주어 조건에 따라 특정 파장에서 반사를 일으키는 특성을 나타내는 소자이다. 이것은 파장선택 필터로써 매우 간단하고 가격이 저렴하며, 시스템을 소형화하고 경량화할 수 있는 장점이 있다 [2]. 광 파이버 격자에서 특정 파장의 빛이 반사되는 것은 광섬유 내의 진행파와 반사파 사이에서 광의 결합이 일어남으로 인해 발생하는 현상으로 볼 수 있는데, 진행파와 반사파 사이의 광의 결합관계는 결합모드 이론과 파동방정식을 이용하여 그 해를 구함으로써 설명된다[3]. 이러한 광 파이버 격자의 경우, 진행방향으로 진행되는 파와 격자에서 반사되어 돌아오는 파가 포함되므로 광 필드는 아래 식의 형태로 표현된다[3].

$$E(z) = A(z)\exp(iqz) + B(z)\exp(-iqz) \quad (1)$$

여기서,  $A$  와  $B$  는 각각 진행하는 파와 격자에 의해 반사되는 파의 진폭을 나타내고,  $q$  는 전파상수,  $z$  는 진행방향을 나타낸다. 광 파이버에서 빛의 전파를 설명하는 파동방정식은 다음 식과 같이 간단한 형태로 표현된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E + k^2 E = 0 \quad (2)$$

식 (1)을 파동방정식 (2)에 대입하면 식 (3), (4)와 같은 결합 파동방정식을 얻을 수 있다.[3]

$$\frac{dA}{dz} = i\delta A + ikB \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dz} = -i\delta B - ik^* A \quad (4)$$

여기서,  $\delta$  는 Bragg 파장에서 모드의 동조이탈계수이고,  $k$  는 결합계수이다. 결합 파동방정식을 통해 각 진행파와 반사파가 격자를  $z$  방향으로  $L$  만큼 진행했을 때의 파와 격자의 입력단에서의 파와의 관계를 알 수 있다. 이 결합 파동방정식을 풀고 매트릭스 해석법을 이용하여 그 해를 매트릭스 형태로 정리하면 다음 식으로 된다.[4]

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $S$  매트릭스는 광 파이버 격자의 특성을 나타내는 전달 매트릭스이고, 결합모드 이론을 이용하면 각각의  $S$  매트릭스의 성분은 아래의 식들의 형태로 된다.[3]

$$S_{11} = (1 - r^2)^{-1} [\exp(iqh) - r^2 \exp(-iqh)] \quad (6)$$

$$S_{22} = (1 - r^2)^{-1} [\exp(-iqh) - r^2 \exp(iqh)] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_{21} &= -S_{12} \\ &= (1 - r^2)^{-1} r [\exp(iqh) - \exp(-iqh)] \quad (8) \end{aligned}$$

여기서  $h$  는 격자의 길이이다.

진행파와 반사파의 전파상수  $q = \pm [(\delta\beta)^2 - k^2]^{1/2}$  이고, 격자의 유효반사계수  $r = (q - \delta\beta)/k$  이다. 또한,

$k = \pi\delta n/\lambda_B$  는 격자의 결합계수( $\delta n$ : 격자의 굴절률차),  $\delta\beta = 2\pi(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$  는 격자 주기  $\Lambda$  와 관련된 Bragg 파장  $\lambda_B$  에서의 동조이탈계수이다. 이때, 광 파이버 Bragg 격자를 투과하는 파와 반사되어 나오는 파의 세기는 경계조건  $B_{out} = 0$  에 의해 다음과 같이 주어진다[1, 3].

$$T = \left| \frac{A_{out}}{A_{in}} \right|^2 = \left| S_{11} - \frac{S_{12} S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (9)$$

$$R = \left| \frac{B_{in}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|^2 \quad (10)$$

여기서  $T$  는 투과율,  $R$  은 반사율을 나타낸다.

### III. Add-Drop Mux/Demux

Add-Drop Mux/Demux는 전송되는 DWDM 신호에 하나의 채널을 추가하거나 제거할 수 있는 장치이다. 본 논문에서 제시한 Add-Drop Mux/Demux는 두 개의 3dB 방향성 결합기를 이용하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고 간섭계의 양쪽 경로에 동일한 반사파장을 갖는 광 파이버 Bragg 격자를 형성시켜 구성한다.

#### 3.1 Mach-Zehnder 간섭계의 동작원리

그림 2에 Mach-Zehnder 간섭계의 구조를 나타내었다. 이 구조는 그림 2에서, 첫 번째 파이버 길이는  $(L + \Delta L)_{eff}$  로 설정하고 두 번째 파이버 길이는  $L_{eff}$  로 설정함으로써  $\Delta L$  만큼 경로차이를 주어 발생하는 위상차의 원리를 이용하는 것이다. 즉, 혼합된 두 개의 파장  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$  가 입력  $E_{in1}$  을 통해 들어갔을 경우 결합기를 통과한 후 두 개의 파이버로 분리되어 진행하던 파장은  $E_{out1}$  에는  $\lambda_1$  가  $E_{out2}$  에는  $\lambda_2$  가 출력된다. 이때 출력된  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$  는 위상차를 갖게 된다.

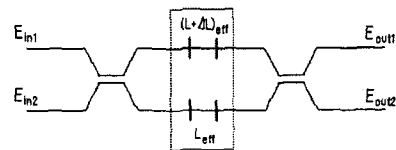


그림 2. Mach-Zehnder 간섭계의 구조  
Fig. 2. Structure of Mach-Zehnder interferometer.

3.2 Add-Drop Mux/Demux의 동작원리

그림 3에서처럼 Add-Drop Mux/Demux의 입력 단으로 여러 파장의 신호가 입력되면, 그 신호는 3dB 방향성 결합기에 의해 간섭계의 양쪽 경로로 나누어 진행하고 결합기의 특성에 의해  $\pi/2$  만큼의 위상차를 가지고 진행한다. 이 신호는 양쪽 경로에 형성되어 있는 파이버 Bragg 격자를 통과하는데 이때 양쪽 경로를 지나는 신호 중 파이버 Bragg 격자의 반사파장 신호 ( $\lambda_4$ )는 격자에서 반사되어 drop 단자 쪽으로 반사되어 나가고, 나머지 신호는 격자를 통과하여 output 단자로 나오게 된다. 또한 add 단자로 입력된 신호는 방향성 결합기를 거쳐 양쪽 경로로 진행하다가 격자에 반사되어 다시 output 단자로 반사되어 나가게 된다. 결국, 입력신호 단자로 들어온 신호와 add 단자로 입력된 신호가 모두 output 단자로 나오게 되므로 두 신호가 더해지는 기능을 하게 된다. 파이버 격자와 Mach-Zehnder 간섭계의 특성을 함께 고려하여 각 출력 단에서의 파장에 따른 광의 세기를 수식적으로 나타내면 다음 식으로 된다[1].

$$Output = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} + e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (11)$$

$$Add = \left| \frac{e^{j(\phi_A + \phi_C)} + e^{j(\phi_B + \phi_D)}}{S_{22}} \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (12)$$

$$Drop = \left| \frac{S_{21}}{S_{22}} \times (e^{j\phi_A} + e^{j\phi_B}) \times \frac{1}{2} \right|^2 \quad (13)$$

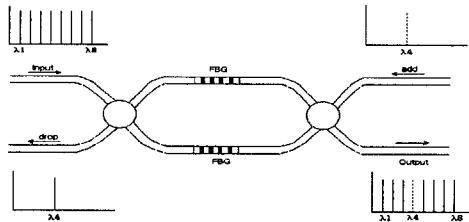


그림 3. Add-Drop Mux/Demux의 구성도  
Fig. 3. Schematic of Add-Drop Mux/Demux device.

여기서  $S_{22}$ ,  $S_{21}$ 은 매트릭스의 원소이고  $\phi_{A,B}$ ,  $\phi_{C,D}$ 는 각각 파이버 Bragg 격자의 전단과 후단에서 양쪽 경로에 의해 생긴 위상변화이다. 이들 식에서 간섭계의 양쪽 경로가 동일한 경우에는  $\phi_A$  와  $\phi_B$  그리고  $\phi_C$  와  $\phi_D$ 의 크기가 같기 때문에 위상변화 항을 고려하지 않아도 되지만, 경로가 동일하지 않은 경우에는 위상 항인  $\phi$ 가 변하게 되어 경로가 같은 경우의

특성과는 다른 특성이 나오게 된다[1]. 즉, 경로가 동일하지 않은 경우, Add 단에서  $\phi_D$ 가 정확히  $\pi/2$ 가 되지 않기 때문에 상쇄간섭이 되지 않아 출력이 나오게 된다. 같은 방법으로 output 단은  $\phi_D$ 가 0이 되지 않아 이상적인 값과는 다른 출력이 나타나며, drop 단은  $\phi_B$ 가 정확히  $\pi/2$ 가 되지 않아 다른 결과가 나타나게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 장에서는 Add-Drop Mux/Demux의 각 단의 출력 특성과 Mach-Zehnder 간섭계의 양쪽 경로의 길이가 동일하지 않은 경우 그리고 경로길이의 변화에 따른 특성을 고찰하고 그 특성에 따른 최적 설계 데이터를 구한다. 설계 조건은 중심파장 1550nm, 선폭 0.3nm, 격자의 굴절률차  $\delta n$ 은  $2 \times 10^{-4}$ , 격자의 길이를 10mm로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과로서, 그림 4는 add 단자의 경우를 나타낸 것으로 경로길이가 동일한 경우 출력이 나오지 않지만, 그렇지 않은 경우 출력이 나올 수 있다. 그림 5는 drop 단자의 경우를 나타낸 것으로 경로가 동일한 경우 반사도는 1이지만, 동일하지 않은 경우 반사도가 떨어짐을 알 수 있다. 그림 6은 output 단자의 경우를 나타낸 것으로 경로가 동일한 경우 전송도가 1인 반면, 그렇지 않은 경우 전송도가 떨어짐을 알 수 있다. 그림 7은 각 단의 경로차에 따른 출력특성을 동시에 나타낸 것으로 경로차를 3.1 $\mu$ m, 6.2 $\mu$ m, 9.3 $\mu$ m로 하면 모든 단에서 이상적인 결과를 나타냄을 알 수 있다.

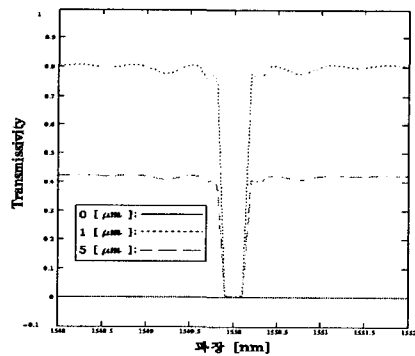


그림 4. add 단자의 전송 스펙트럼  
Fig. 14. Transmission spectrum in add port

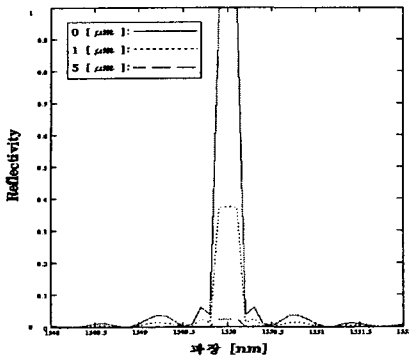


그림 5. drop 단자의 반사 스펙트럼  
Fig. 5. Reflection spectrum in drop port

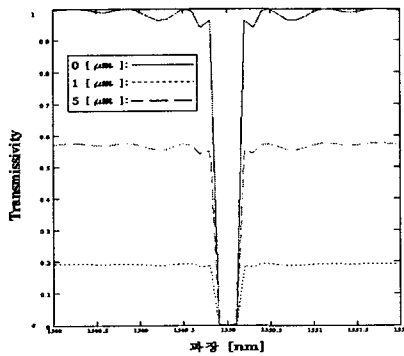


그림 6. output 단자의 전송 스펙트럼  
Fig. 6. Transmission spectrum in output port

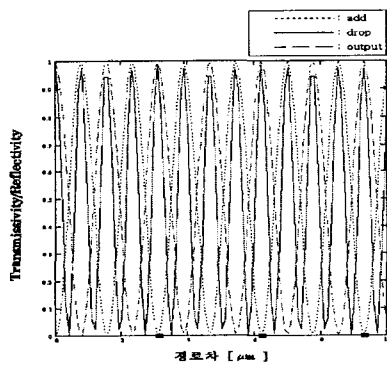


그림 7. 경로차에 따른 각 단자의 출력 특성  
Fig. 7. Output characteristics in add, drop and output ports with path length difference occurred.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 파이버 브래그 격자와 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 Add-Drop Mux/Demux를 고찰하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 특성을 분석하여 최적의 설계 데이터를 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과로부터 제안된 Add-Drop Mux/Demux는 동작특성이 우수하였고, 간섭계의 경로길이가 다른 경우, 그 경로의 길이를 3.1 $\mu\text{m}$ 의 정수배로 설계하면 이상적인 동작특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

따라서, 본 논문의 결과 데이터들은 DWDM 통신 시스템에서 필수적 요소인 Add-Drop Mux/Demux의 설계에서 유용한 설계 데이터로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] 박무윤, 박광노, 이경식, 원용협, 이상배, "광섬유 Bragg gating을 이용한 가변형 add/drop 필터에 관한 연구", 전자공학회논문지, 제34 권, S 편, 제 5호, pp. 15-24, 1997.
- [2] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings", *J. Opt. Soc. Am.*, vol 72, pp. 1385-1392, 1982.
- [3] Govind P. Agrawal, and Andrew H. Bobeck, "Modeling of istributed Feedback Semiconductor Lasers with Axially Varying Parameters", *J. of Quantum Electronics*, vol. 24, No. 12, pp. 2407-2414, 1988.
- [4] M. Yamada and K. Sakuda, "Analysis of almost periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach," *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 3474-3478, 1987.