

論文2000-37SD-5-5

## 홀로그래픽 부피격자를 이용한 1×16 DMUX

## (1×16 DMUX Using Holographic Volume Gratings)

李 權 淵 \*, 安 俊 遠 \*\*, 金 男 \*\*, 李 賢 宰 \*\*\*, 徐 完 錫 \*\*\*

(Kwon-Yeon Lee, Jun-Won An, Nam Kim, Hyun-Jae Lee,  
and Wan-Seok Seo)

## 요 약

광굴절 Fe-LiNbO<sub>3</sub> 결정에 형성된 홀로그래픽 부피 격자의 파장 선택성과 다중 기록을 통한 역다중화 특성을 이용해 WDM 광통신 시스템에서 16개 채널 신호를 분리·선택해낼 수 있는 새로운 방식의 광굴절 역다중화기를 제안하였다. 균일한 회절효율을 갖는 16개 채널을 다중 기록하기 위해 회전 다중화 기법과 노출 시간 계획이 적용되었다. 설계된 역다중화기는 670~677.5nm 범위에서 0.5nm 간격을 갖는 16 채널로 구성되었으며, 각 채널은 0.16nm의 파장 선택 특성을 갖는다. 실험결과 각 채널은 8.3±0.62% 범위의 회절 효율을 보였으며, 매질에서 프레넬 반사 및 흡수에 의한 광손실은 ~2.22dB/cm, 0.16±0.005nm의 3dB 대역폭 및 0.46~0.5nm의 채널간격을 갖는 역다중화 특성을 얻었다.

## Abstract

We propose a new photorefractive demultiplexer(DMUX) which can select the 16 channel signal in WDM optical communication system using the wavelength selectivity and the demultiplexing property through multiple recording of holographic volume grating in photorefractive Fe-LiNbO<sub>3</sub> crystal. For the multiple writing of the 16 channels having uniform diffraction efficiency, the rotation multiplexing technique and the exposure time schedule are used. Designed DMUX has the 16 channels with 0.5nm spacing between 670nm and 677.5nm and the bandwidth of 0.16nm. From the experimental results, the diffraction efficiency of each channel is 8.3±0.62%, the optical loss from fresnel reflection and absorption on the crystal is 0.4cm<sup>-1</sup>, the 3dB bandwidth is 0.16±0.005nm and the channel spacing is 0.46~0.5nm.

\* 正會員, 順天大學校 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., Suncheon National University)

\*\* 正會員, 忠北大學校 電氣電子工學部

(School of Electrical and Electronics Eng, Chungbuk National University)

\*\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院 光多重化팀

(ETRI)

接受日字:1999年12月10日, 수정완료일:2000年3月22日

## 1. 서 론

최근에 기하 급수적으로 증가하고 있는 통신 수요를 충족시키기 위해 고밀도 파장분할다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 방식에 의한 대용량 광전송 기술이 활발히 연구·개발되고 있다. 이러한 WDM 광통신 기술의 상용화를 위해서는 광파장 필터, 다채널 파장 다중화기(MUX: multiplexer) 및 역다중화기(DMUX: demultiplexer), 광 증폭기 그리고 광 파장 변환 소자등과 같은 광부품의 개발이 필요하다. 특히, 서로 다른 파장을 갖는 광원으로부터 나오는 신호들을

결합하여 단일 광섬유를 통해 전송하고, 수신단에서는 파장에 따라 신호를 분리하기 위한 다채널 MUX 및 DMUX는 고밀도 다중 채널 WDM 광통신 시스템의 실현을 위한 필수적인 소자이다.

일반적으로 MUX/DMUX 소자는 크게 회절(diffraction)과 간섭(interference) 현상중 하나에 근거하여 제작되며, 광섬유 결합기(fiber coupler)<sup>[1][2]</sup>, 광섬유 브래그 격자(FBG: fiber Bragg grating)<sup>[3][4]</sup>, 도파로 등을 이용한 구조등이 실현되고 있다. 이들 제조 기법 중 최근에는 다수 채널의 고밀도 WDM의 경우 부품의 크기 및 파장 차단(wavelength isolation), 손실, FSR(free spectral range), 누화등의 특성 측면에서 우수한 도파로 열 격자(AWG: arrayed waveguide grating)를 이용한 방식이 활발하게 연구되고 있다.

본 논문에서는 광굴절 Fe-LiNbO<sub>3</sub> 결정 내에서 코히어런트한 두 기록빔의 간섭에 의해 형성된 반사형 부피격자의 협대역성, 파장 선택성<sup>[5][6]</sup> 및 다중 기록 특성을 이용해 16개의 독립 채널 신호를 분리·선택해낼 수 있는 새로운 광굴절 DMUX 소자를 제안하고, 광학적으로 구현하였다. 본 논문에서 제안한 광굴절 DMUX의 경우 각 채널을 위한 파장선택 필터가 결정내의 한 곳에 위치하므로 다채널에 적용시 잡음성분 및 광손실의 누적이 없을 뿐 아니라 각 채널에서 선택하는 파장대역이나 3dB 대역을 자유롭게 설정할 수 있다는 이점을 갖는다. DMUX 구현을 위해 각 채널의 설계과정 및 중심파장, 통과대역 특성의 결정 요소에 대해 분석하였으며, 균일한 회절효율을 갖는 16 채널의 필터 기록을 위해 회전 다중화(rotation multiplexing) 기법과 노출시간계획(exposure time schedule)이 적용되었다. 구현된 DMUX는 670~677.5nm 범위에서 0.5nm의 채널간격과 0.16nm의 3dB 통과대역 특성을 갖도록 설계되었다.

## 2. 광굴절 DMUX

광굴절 매질 내에서 코히어런트한 두 기록빔의 간섭에 의해 형성되는 부피형 회절격자는 일반적인 홀로그래프와 마찬가지로 특정한 입사각에 대해 브래그 조건을 만족하는 파장만을 회절 혹은 반사시키고 이외의 파장은 투과시키는 특성을 이용해 파장분할 다중 광통신 시스템에서 다중화된 신호를 분리·선택하기 위한 파장선택 필터나 DMUX 로의 적용이 가능하다. 특히, 광굴절 결정의 경우 홀로그래픽 광 메모리 시스템에서 저장 용량을 증가시키기 위한 방식 중 하나인 회전 다

중화 기술을 이용해 동일한 위치에 다수의 격자를 쉽게 기록할 수 있는 특성을 갖는다<sup>[7]</sup>. 따라서, 광굴절 매질의 다중 기록 특성과 파장선택성을 적용하면 다수의 채널 신호를 동일한 시간에 전광학적으로 추출하기 위한 DMUX 로의 응용이 매우 용이할 뿐 아니라 각 채널의 손실 및 잡음레벨이 동일한 특성을 갖는다.

그림 1과 같은 반사형 광굴절 회절격자에서 두 기록빔의 입사 반각(half crossing angle)을 각각  $\theta_{w1}$ ,  $\theta_{w2}$ 라 하고, 결정의 C 축과 파장 다중화된 수신빔(received beam) 사이의 각도를  $\theta_R$ 이라 가정하면, 격자에 의해 반사되는 빔에 대한 브래그(Bragg) 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_R = \sin^{-1} \left[ \frac{n_w \cdot \lambda_f}{n_f \cdot \lambda_w} \cdot \sin \left( \frac{\theta_{w1} + \theta_{w2}}{2} \right) \right] - \theta_{w1} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_w$  와  $\lambda_f$  는 기록빔의 파장과 격자에서 회절되는 중심파장이고  $n_w$ ,  $n_f$  는 기록빔과 선택되는 빔의 파장에 대한 광굴절 매질의 굴절률을 나타낸다.

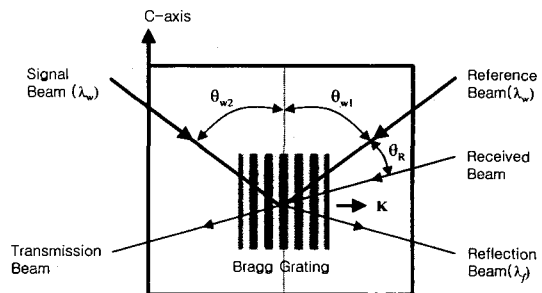


그림 1. 반사형 광굴절 파장선택필터의 원리  
Fig. 1. The principle of the reflection type photorefractive wavelength selective filter.

또한, 광굴절 파장선택 필터의 3dB 대역폭( $\Delta\lambda_f$ )은 Kogelnik의 결합 파동 이론(coupled wave theory)으로부터 다음과 같이 표현된다<sup>[12]</sup>.

$$\Delta\lambda_f = \frac{\lambda_f^2 \cdot \cos(\theta_{w1} + \theta_R)}{2 \cdot n \cdot d \cdot \sin^2(\theta_{w1} + \theta_R)} \quad (2)$$

따라서, 광굴절 필터의 대역폭은 광학적 정렬상의 오차와 광학 소자의 수차가 없다고 가정하면 기록빔의 입사각과 결합길이(interaction length,  $d$ )에 절대적으로 의존하며, 선택되는 파장에는 거의 영향이 없다<sup>[8]</sup>. 또한, 두 기록빔의 결합길이가 고정된 경우 기록빔의

입사각이 넓어짐에 따라 필터 대역은 좁아지는 특성을 갖는다.

그리고 그림 1 및 식 (1)에서 필터의 중심파장은 기록빔 혹은 수신빔의 입사각을 조정함으로써 변화시킬 수 있음을 알 수 있고, 이러한 설계 기법은 다중 기록을 통한 DMUX 로 적용할 경우에도 동일하게 적용된다. 만약 식 (1)에서 수신빔의 입사각이  $\delta\theta$  만큼 변화된 경우 선택되는 파장이 다음과 같이  $\delta\lambda$  만큼 변화된다고 가정하면,

$$\theta_R \rightarrow \theta_R + \delta\theta \quad (3)$$

$$\lambda_f \rightarrow \lambda_f + \delta\lambda \quad (4)$$

이며, 식 (1)로부터 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$\delta\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{n_w \cdot (\lambda_f + \delta\lambda)}{n_f \cdot \lambda_w} \cdot \sin \left( \frac{\theta_{w1} + \theta_{w2}}{2} \right) \right] - \theta_{w1} - \theta_R \quad (5)$$

그림 2는 두 기록빔의 내부 입사 반각이 45°, 40°, 35°인 경우 수신빔의 입사각 변화에 대한 필터 중심 파장 변화량의 관계를 식 (5)로부터 계산한 것이다. 그림에서 수신빔의 입사각 변화에 따른 중심파장 이동 정도는 서로 선형적인 특성을 갖는다. 또한 기록빔의 입사각이 작을수록 수신빔 입사각 변화에 민감하게 동작하는 필터 특성을 예측할 수 있다.

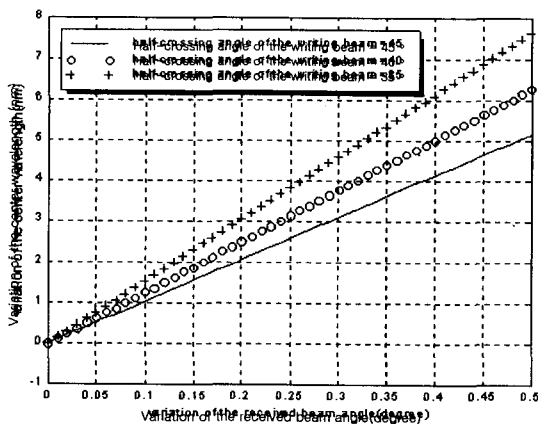


그림 2. 수신빔 입사각 변화에 대한 중심파장의 이동  
Fig. 2. The movement of the center wavelength due to the variation of the received beam angle.

여기서, 선택되는 중심파장의 변화는 식 (5)와 같이

수신빔의 입사각 조정을 통해 얻을 수 있지만 수신빔의 입사각을 변화시킬 경우 부수적인 튜닝 미러(tuning mirror)가 필요하고 또한, 이 구조를 1×N DMUX로 적용할 경우 수신된 빔을 여러 채널로 나누어 동일한 위치로 입사시켜야 하기 때문에 구현하기가 어려워져 실제적인 광통신 시스템에 응용하기에는 부적절하다. 그러나, 그림 1에서 수신빔의 입사각 변화는 결국 c축에 대한 파수벡터의 변화를 의미하므로 결정을 회전시켜 다중격자를 기록함으로써 쉽게 구현될 수 있다. 본 논문에서는 회전 다중화 기술을 이용해 서로 다른 파수벡터 방향을 갖는 다수의 회절격자를 결정내의 동일한 위치에 다중기록 시킨 후 고정된 한 각도로 수신빔을 입사시켜 기록된 격자 수 만큼의 독립 채널 신호를 공간적으로 분리해낼 수 있는 간단한 구조를 적용하였다. 이 경우 N개의 서로 다른 파장 신호를 동시에 선택하기 위해 요구되는 수신빔의 입사각은 한 각도로 고정되므로 소자 구현이 쉽고, N개의 회절격자가 한 위치에 다중 기록되므로 잡음 및 손실의 누적이 없을 뿐 아니라 채널 확장이 용이한 이점을 갖는다. 또한, 3차원 부피안에 각 채널을 다중화 시키기 때문에 다채널 고밀도 WDM에서 요구되는 협대역 및 누화특성을 만족시키는 DMUX 구현이 가능하다.

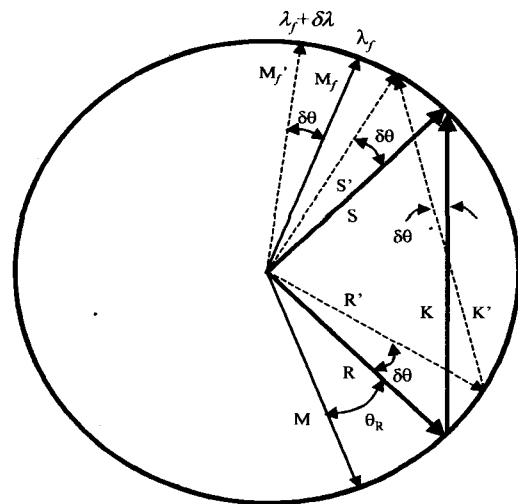


그림 3. 기록빔의 입사각 변화에 대한 중심파장의 변화  
Fig. 3. The variation of center wavelength due to the writing beam incident angle.

그림 3은 두 기록빔의 입사각 변화와 필터 중심파장 변화의 상호관계를 나타내기 위한 벡터도이다. 그림에

서 S, R 은 초기 회절격자를 기록하기 위한 신호빔과 기준빔을 나타내며, 이때 형성되는 파수 벡터의 방향은 K라 가정한다. 이러한 회절격자에 다중화되어 수신된 빔 M이 기준빔에 대해  $\theta_R$ 의 각으로 입사되면 Mf 방향으로  $\lambda_f$  파장의 빔이 회절되고, 이외의 파장은 M 방향으로 투과된다. 그림에서 나타낸바와 같이 신호빔과 기준빔이  $\delta\theta$  만큼 변화된 조건으로 입사되면 파수벡터의 방향은 K'으로 변화되고, 이 격자에 의해 회절되는 빔은  $\lambda_f + \delta\lambda$ 의 중심파장을 갖게된다. 또한, 회절되는 방향은 Mf'으로 Mf에 대해 기록빔의 변화각도  $\delta\theta$  만큼 이동한다. 즉, 그림에서 나타낸 회절된 빔의 파장 변화는 식 (5)에서 계산된 각도만큼 기록빔의 각도를 변화시킴으로써 이루어지게 된다.

그림 4는 동일한 위치에 다중 기록된 광굴절 홀로그래램을 다채널 DMUX로 적용하기 위한 구조를 보인것이다. 그림에서 두 기록빔이 서로 동일한 입사각을 갖고 결정면에 수직으로 입사되는 경우 형성되는 파수벡터는  $K_{N/2}$ 이고, 수신빔이 기준빔에 대해 고정된  $\theta_R$ 의 각도로 입사될 때, 격자에 의해 반사되는 빔의 중심파장을  $\lambda_{N/2}$ 이라 가정한다. 선택되는 중심파장은 식 (1)에 의해 구할 수 있으며, 필터의 3dB 통과대역은 식 (2)로부터 얻는다. 이때, 결정을 시계방향으로 회전시켜 격자를 기록하면  $K_{N/2} < K \leq K_N(\theta_{w1} < \theta_{w2})$  범위의 파수벡터를 갖는 격자가 형성되며, 반시계 방향으로 회전된 경우에는  $K_{11} \leq K < K_{N/2}(\theta_{w1} > \theta_{w2})$ 의 파수벡터를 갖는 격자가 생성된다. 이때 다수 격자가 형성된 결정을 초기 상태( $\theta_{w1} = \theta_{w2}$ )로 고정시킨 후 다중화된 수신빔이  $\theta_R$ 의 각으로 입사되면 전자의 경우  $\lambda_{N/2}$ 보다 큰 중심파장을 갖는 필터로 동작하게되고, 후자의 경우  $\lambda_{N/2}$ 보다 작은 파장을 선택하는 필터로 작용한다. 만약, 선택되는 중심파장 변화의 정도  $\delta\lambda$ 가 양의 값이라고 가정하면 두 기록빔의 입사각은 식 (6), (7)과 같이 변화되어야 한다.

$$\theta_{w1} \rightarrow \theta_{w1} - \delta\theta \tag{6}$$

$$\theta_{w2} \rightarrow \theta_{w2} + \delta\theta \tag{7}$$

따라서, 그림 4와 같이 다수의 격자를 결정 내에 기록시키고 다중화된 수신빔을 고정된 한 각도로 입사시키면, 기록된 격자 개수와 동일한 수의 중심파장 성분들이 반사되어 공간적으로 검출이 가능하고 이외의 빔

은 그대로 투과된다. 여기서, 중심파장의 변화량은 식 (5)에 의해 간단히 계산되고, 이러한 중심파장 튜닝 기법과 회전 다중화에 의한 다중 기록기술을 조합하면 전광학적 DMUX로의 응용이 가능해진다. 즉, N개의 격자가 다중 기록된 결정에  $\lambda_1 \sim \lambda_N$ 의 파장으로 다중화된 수신빔이 결정 C 축 방향에 대해  $\theta_R$ 의 각으로 입사되면, 각각의 격자에 의해 서로 다른 파장대역이 반사되어 공간적으로 분리된다. 따라서, 그림 4에서 보인 원리를 이용하면 결정 내에 기록된 개수만큼의 채널을 갖고 다수의 파장대역을 분리·선택해낼 수 있는 DMUX 구현이 가능하며, 각 채널의 대역폭은 식 (2)에서 보인 것 같은 기록조건에 의해 결정된다.

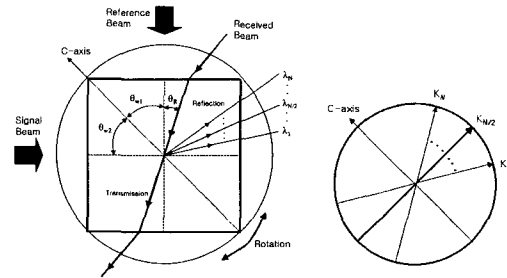


그림 4. 광굴절 DMUX의 개념도  
Fig. 4. Schematic illustration of the photorefractive DMUX.

그림 4와 같이 결정 내의 동일한 위치에 다수의 홀로그래램을 저장하는 경우 근본적인 문제점은 결정의 동적 특성으로 인해 초기에 기록된 필터가 다른 필터를 기록하는 동안 지수함수적으로 지워진다는 것이다. 따라서, 기록되는 모든 격자를 동일한 시간으로 기록할 경우 첫 번째 기록된 필터가 가장 낮은 회절효율을 갖고 마지막 필터가 가장 높은 회절효율을 갖게 된다. 이러한 문제점은 홀로그래픽 광 메모리 시스템에도 동일하게 적용되며, 이의 해결을 위해 각 홀로그래램에 대한 기록시간을 다르게 설정해 모든 홀로그래램이 동일한 회절효율을 갖도록 하는 노출 시간 계획 기술이 적용된다<sup>[9][10]</sup>. 노출시간 계획을 적용하기 위해서는 이용된 매질의 격자 기록상수(writing constant,  $\tau_w$ )와 삭제상수(erasing constant,  $\tau_e$ )가 필수적으로 요구되는데, 본문에서 이용된 LiNbO<sub>3</sub> 광굴절 결정은 신호빔이 8.19mW/cm<sup>2</sup>, 기준빔이 8.71mW/cm<sup>2</sup>인 632.8nm의 He-Ne 레이저를 이용한 경우 기록상수는 1770초이며,

최대 회절효율은 84.4%이다. 또한 기록조건과 동일한 기준빔을 이용해 측정된 삭제상수는 6370초이며, 노출 시간 계획은 식 (8)의 관계를 이용하였다.

$$t_M = \frac{t_1}{1 + \frac{(M-1)}{\beta}} \quad (8)$$

식에서  $\beta$ 는 기록시간에 대한 삭제상수의 비( $\tau_c/\tau_r = 3.598$ ),  $M$ 은 노출차수,  $t_1$ 은 첫 번째 홀로그램의 기록 시간,  $t_M$ 은  $M$ 번째 기록하는 홀로그램에 대한 노출시간이다.

### 3. 광굴절 DMUX 설계 및 구현

광굴절 결정의 파장선택성과 역다중성을 이용한 DMUX의 설계는 2절에서 서술한 조건에 의해 계산될 수 있으며, 선택하고자하는 중심파장의 선택은 식 (5)로부터 계산된다. 결정 내에 형성된 홀로그래픽 부피격자의 파장선택성은 식 (2)에 의해 계산할 수 있고, 기록빔의 입사각이나 결합각을 조절해 쉽게 제어할 수 있다. 본 논문에서 설계된 광굴절 DMUX는 두 기록빔의 입사반각이  $45^\circ$ , 결합길이가 8mm, 기록 파장이 633nm 인 조건으로 각 채널을 구성하였기 때문에 식 (2)로부터 0.16nm의 3dB 통과대역을 예측할 수 있다. 또한, 선택되는 중심파장은 670~677.5nm 범위에서 0.5nm 간격을 갖도록 하였으며, 총 16채널로 구성된다. 첫 번째 기록되는 채널은  $\theta_{w1} = \theta_{w2} = 45^\circ$ 의 기록 조건을 갖고, 670nm의 중심파장을 갖는 필터로 동작되며, 이러한 조건을 만족하는 수신빔의 입사각  $\theta_R$ 은

48.476°이다. 계산된 각도  $\theta_R$ 에 대해 중심파장을 0.5nm 씩 변화시키기 위한 기록빔의 입사각은 식 (5)~(7)로부터 계산될 수 있고, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

그림 5는 표 1에서 설계된 광굴절 16 채널 DMUX 구현을 위한 실험 구성도이다. 결정 내에 DMUX를 기록하기 위한 기록광원은 42mW의 출력 파워를 갖는 632.8nm의 헬륨-네온 레이저를 사용하였으며, 신호빔은 8.19mW/cm<sup>2</sup>, 기준빔은 8.71mW/cm<sup>2</sup>의 세기를 갖는다. 두 기록빔의 입사각  $\theta_{w1}$ ,  $\theta_{w2}$  사이의 각도는 모든 채널이 동일한 통과대역 특성을 갖도록 하기 위해 항상  $90^\circ$ 의 각도를 유지하며 결정 내에서 결합되고, 16개의 부피형 홀로그램을 다중 기록하기 위해 회전 다중 기법을 적용하였다. 광굴절 결정에 격자 기록시 일반적으로 발생하는 빔 패닝(fanning) 현상은 기록광원의 편광상태가 이상편광(extraordinary polarization)이고, 결정의 감광도가 큰 파장 영역에서 발생하는데, 이 현상은 회절광학의 응용분야에 적용시 잡음성분으로 작용하기 때문에 최대한 감소시키는 방안이 필요하다<sup>[11]</sup>. 따라서, 정상 편광(ordinary polarization)상태의 기록빔과 632.8nm의 기록 파장 및  $90^\circ$ 구조를 통해 빔 패닝현상을 최소화하였다. 기록빔은 공간 필터(S.F: spatial filter)와 렌즈를 통해  $8 \times 1$ mm의 폭을 갖고 결정에 입사되도록 조정하였고, 빔 분할기(B/S: beam splitter)에 의해 나뉘어진 두 빔이 결정 내에서 결합된다. 16개 채널을 다중 기록하기 위해 0.001° 간격으로 제어 가능한 Newport사의 495CC 회전 스테이지

표 1. 16 채널 DMUX 설계 결과  
Table 1. Design results of the 16 channel DMUX.

channel number	1	2	3	4	5	6	7	8
center wavelength	670nm	670.5nm	671nm	671.5nm	672nm	672.5nm	673nm	673.5nm
$\theta_{w1}$	45°	44.952°	44.904°	44.855°	44.807°	44.758°	44.710°	44.661°
$\theta_{w2}$	45°	45.048°	45.096°	45.145°	45.193°	45.242°	45.290°	45.339°
channel number	9	10	11	12	13	14	15	16
center wavelength	674nm	674.5nm	675nm	675.5nm	676nm	676.5nm	677nm	677.5nm
$\theta_{w1}$	44.612°	44.564°	44.515°	44.466°	44.417°	44.369°	44.320°	44.271°
$\theta_{w2}$	45.388°	45.436°	45.485°	45.534°	45.583°	45.631°	45.680°	45.729°

(rotation stage)를 사용하여 표 1에 보인 각도에 대해 순차적으로 기록하였다. 각 채널 기록시 사용되는 기록 시간은 식 (8)을 이용하여 계산된 시간을 적용하였고, 16개 채널을 모두 기록한 후 각 채널의 특성을 조사하기 위한 가변 광원은 결정의 C 축 방향에 대해 48.476°의 각을 갖고 입사된다. 660~680nm 범위에서 튜닝 가능한 가변 광원의 파장을 0.01nm 간격으로 변화시키면서 반사되는 빔 세기를 측정하였으며, 빔의 파장은 HP사 700041 모델의 광 주파수 분석기(OSA: optical spectrum analyzer)를 통해 관찰하였다.

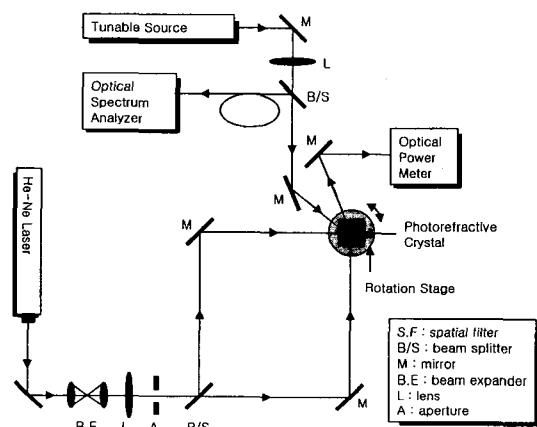


그림 5. 실험 구성도  
Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup.

격자 내에 형성된 홀로그래픽 부피격자의 3dB 통과대역 특성을 조사하기 위해 단일 격자에 대한 파장 선택성을 측정하였다. 광굴절 격자의 통과대역은 식 (2)로부터 예측할 수 있으며, 약 0.16nm의 필터 특성이 예상된다. 그림 6은 이론적으로 예측되는 파장 선택성과 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 실선은 기록 빔의 내부 입사 반각이 45°, 기록빔의 파장이 632.8nm, 결합길이가 8mm, 선택되는 중심파장이 670nm일 때, Kogelnik의 결합 파동이론<sup>[12]</sup>으로부터 계산된 결과이며, 원으로 나타낸 것은 가변광원의 파장을 변화시키면서 측정한 실험결과이다. 그림의 실험결과에서 보듯이 격자에 형성된 파장선택 필터는 약 0.165nm의 통과대역을 갖는 협대역성을 볼 수 있으며, 이론값과 실험값의 차이는 광굴절 결정에서의 프레넬 반사 및 파장에 따른 흡수도의 차이 때문으로 인식된다. 따라서, 그림 5의 광학 장치도를 이용해 16채널 광굴절 DMUX로 적

용할 경우 16개의 모든 채널이 0.16nm 정도의 3dB 통과대역 특성을 갖을 것으로 예측할 수 있다.

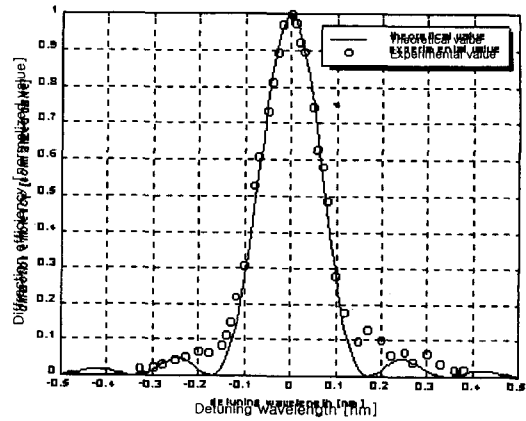


그림 6. 광굴절 부피격자의 파장선택성  
Fig. 6. Wavelength selectivity of the photorefractive volume grating.

그림 3의 광굴절 DMUX 적용 원리와 그림 5의 실험 구성도를 이용해 16개의 다중 격자를 기록 후 가변 광원을 통해 얻은 스펙트럼 분포를 그림 7에 나타내었다. 실험 결과에서 각 채널의 3dB 통과대역은 0.16nm±0.005nm의 특성을 보였으며, 식 (2)로부터 예측되는 값과 일치한다. 본 논문에서 제시된 구조는 광굴절 결정의 부피를 충분히 활용하여 파장 선택 소자로 적용하였기 때문에 기존에 보고되어 온 소자의 채널 대역폭에 비해 협대역 특성을 갖으며, 실험 결과는 약 0.3nm의 채널 간격을 갖는 DMUX 구성이 가능함을 보여준다. 따라서, 광통신 소자로 활용시 채널 용량을 증가시킬 수 있는 가장 근본적인 해결책을 제시할 수 있을 뿐 아니라 두 기록빔의 입사각을 180°에 근접하도록 하면 더욱 협대역 특성을 갖는 소자 구현이 가능해진다. 16개 채널 사이의 간격은 0.46nm~0.5nm 범위의 값을 갖는데 이 측정값은 0.5nm 간격을 갖도록 설계한 조건과 거의 일치하는 결과로 생각되며, 채널간격에 대한 미세한 차이는 광굴절 DMUX의 특성 측정시 발생한 오차로 생각된다. 각 채널의 반사율은 8.3%±0.62%이고, 이 값은 격자 기록 및 판독시 최적의 회절효율을 갖는 조건 도출에 의해 향상될 수 있다. 각 채널 반사율에 있어서의 편차는 평균값에 대해 약 7.5%의 차이를 갖는데, 광굴절 매질의 기록상수 및 삭제 상수를 정확히 측정해 노출 시간 계획을 적용하면 더욱 일정한

반사 특성을 갖는 DMUX 구현이 가능하다. 구성된 광 굴절 DMUX 에서 프레넬 반사 및 흡수에 의한 손실은 ~2.22dB/cm이다. 이중 흡수에 의한 손실은 1550nm의 광통신 파장 영역에서 무시할 정도로 작기 때문에 큰 문제가 되지 않는다<sup>[13]</sup>. 결정 표면에서의 프레넬 반사에 의한 손실은 결정 표면에 반반사(AR: anti reflection) 코딩 과정을 거칠 경우 현재 0.2% 이하의 반사율을 갖도록 할 수 있다<sup>[13]</sup>. 따라서, 본 논문에서 제시된 구조의 경우 1550nm 대역의 파장에 대해 동작하는 DMUX로서 적용하고, 결정 표면에 AR 코딩을 수행하면 삽입 손실을 매우 낮은 수준(~0.002cm<sup>-1</sup>)으로 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

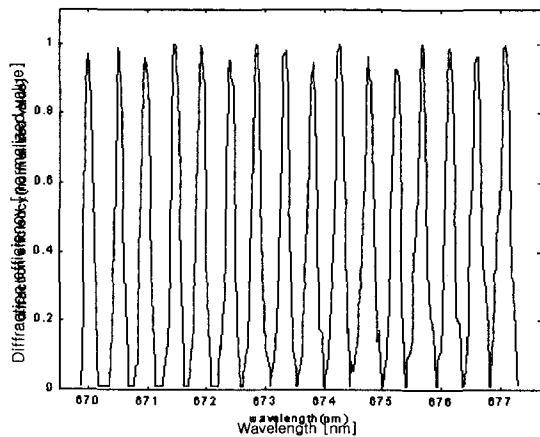


그림 7. 1×16 DMUX 실험결과  
Fig. 7. Experimental results of the 1×16 DMUX.

#### IV. 결론

본 논문에서는 광굴절 Fe-LiNbO<sub>3</sub> 결정 내에서 코히어런트한 두 기록빔의 간섭에 의해 형성된 반사형 부피격자의 파장선택성과 회전 다중 기록 기술을 적용한 역다중화 특성을 이용해 16개 독립 채널 신호를 분리·선택해낼 수 있는 새로운 구조의 DMUX로의 적용을 제안하고, 광학적으로 구현하였다. 제시된 광굴절 DMUX의 경우 다채널화가 매우 용이하고, 모든 채널이 결정내의 한곳에 위치하므로 다채널에 적용시 잡음 성분 및 광손실의 누적이 없을 뿐 아니라 각 채널에서 선택하는 파장대역이나 3dB 대역을 자유롭게 설정할 수 있는 이점을 갖는다. 선택되는 16개의 채널이 균일한 회절효율을 갖도록 하기 위해 현재 광메모리 시스템에서 일반적으로 적용하고 있는 노출시간계획을 적

용해 각 채널의 기록시간을 조절하였다.

설계된 광굴절 DMUX는 0.16nm의 3dB 통과대역과 0.5nm의 채널간격을 갖는 16개의 독립 채널로 구성되었으며, 실험결과 0.16±0.005nm의 3dB 통과대역과 0.46~0.5nm의 채널간격을 갖는 역다중화 특성을 보였다. 실험결과는 설계된 조건과 거의 일치하는 값이며, 미세한 오차는 특성 측정시 발생한 것으로 생각된다. 구현된 DMUX는 결정의 흡수 및 프레넬 반사에 의해 2.22dB/cm의 광손실을 갖으며, 각 채널은 8.3±0.62% 범위의 균일한 회절효율 특성을 보였다. 소자의 광손실은 광통신 영역의 파장을 이용하고, 결정 표면에 반반사 코딩 처리를 수행하면 상당부분 보상할 수 있으며, 결정의 기록상수와 삭제상수를 보다 정확하게 측정해 노출 시간 계획을 적용하면 보다 균일한 회절 특성을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 이상의 실험결과에서 통과대역, 각 채널의 효율값, 삽입손실, 채널간격 등의 조건이 현재 이용되고 있는 WDM 광통신 시스템에 적용하는데 매우 적절하며, 실질적인 적용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] W. Lin, H. Li, Y. J. Chen, M. Dagenais, and D. Stone, "Dual-channel-spacing phased-array waveguide grating multi/demultiplexer," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 1501-1503, Nov. 1996.
- [2] P. Tayebati, P. D. Wang, D. Vahshoori, and R. N. Sacks, "Widely tunable fabry-perot filter using Ga(Al)As-AlOx deformable mirrors," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 10, no. 3, pp. 394-396, Mar. 1998.
- [3] A. Locco, H. G. Limberger, and R. P. Salathe, "Bragg grating fast tunable filter," *Elec. Lett.*, vol. 33, no. 25, pp. 2147-2148, Dec. 1997.
- [4] J. Hubner, D. Zauner, and M. Kristensen, "Strong sampled Bragg grating for WDM applications," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 552-554, Apr. 1998.
- [5] J. Zhang, F. T. S. Yu, and D. K. McMillen, "Coupling kinetics of the photorefractive

- hologram," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2355-2358, May 1996.
- [6] D. Herve, M. Chauvet, J. E. Viallet, and M. J. Chawki, "First tunable narrowband 1.55 $\mu$ m optical drop filter using a dynamic photorefractive grating in iron doped indium phosphide," *Elec. Lett.*, vol. 30, no. 2, pp. 1883-1884, Oct. 1994.
- [7] J. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, Aug. 1995.
- [8] 이권연, 안준원, 김남, "광굴절 결정에서 파장선택 필터의 특성분석 및 다중기록을 통한 역다중화기 구현," *대한전자공학회논문지-D*, 제36권 제6호, pp. 557-564, 1999
- [9] W. J. Burke and P. Sheng, "Crosstalk noise from multiple thick-phase holograms," *J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 2, pp. 681-685, Feb. 1977.
- [10] H. Y. S. Li and J. Hong, "Nonuniformity in hologram diffraction efficiency from time constant error in the recording schedule," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 13, no. 5, pp. 894-899, May 1996.
- [11] 안준원, 최연숙, 김남, 이권연, 강석렬, "Fe-LiNbO<sub>3</sub> 결정에서 광굴절 격자의 비균일성에 의한 광학적 잡음의 영향분석," *대한전자공학회 논문지-D*, 제35권 제3호, pp. 91-97, 1998
- [12] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 9, pp. 2909-2947, Nov. 1969.
- [13] V. Leyva, G. A. Rakuljic, and B. O'Conner, "Narrowband bandwidth volume holographic optical filter operating at the Kr transition at 1547.82nm," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 9, pp. 1079-1081, Aug. 1994.

---

 저 자 소 개
 

---

李 權 淵(正會員) 第 33卷 第 5編 參照

李 賢 宰(正會員)

1992년 6월 현재 한국전자통신연구원 선임연구원. 주관  
심분야는 광통신, 광전달망, 광소자등임

安 俊 遠(正會員) 第 35卷 D編 第 3號 參照

金 男(正會員) 第 33卷 A編 第 3號 參照

徐 完 錫(正會員) 第 35卷 D編 第 8號 參照