

# 파장분할다중 광전송 시스템용 홀로그래픽 1×8 역다중화기

정회원 안준원\*, 김남\*, 신창원\*\*, 이권연\*\*, 전석희\*\*\*

## Holographic 1×8 demultiplexer for WDM optical transmission system

Jun-Won An\*, Nam Kim\*, Chang-Won Shin\*\*, Kwon-Yeon Lee\*\*,  
and Seok-Hee Jeon\*\*\*, *Regular Members*

### 요약

파장분할 다중 광전송 시스템으로의 적용을 위한 홀로그래픽 다채널 역다중화기를 제안하고, 소자 특성에 대한 이론적 예측 및 실험결과를 제시하였다. 광굴절 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 결정에 다중 홀로그래픽 부피 격자채널을 기록하기 위해 각도 다중 기록 및 노출시간 계획을 적용하였으며, 노출시간 계획에 recycling 기법을 적용해 각 채널의 균일도를 향상시켰다. 본 논문에서 제안한 방식을 실험적으로 입증하기 위해 1590nm 파장영역에서 0.8nm 채널 간격을 갖는 8채널 역다중화기를 설계하고 해석하였으며, 실험결과 각 채널은 0.8~0.92%의 회절효율, 0.38~0.45nm의 3dB 통과대역, 0.7~0.89nm의 채널간격 및 -26.98dB 이상의 채널 누화 억제 특성을 관찰하였다.

### ABSTRACT

Holographic multi-channel demultiplexer for the wavelength-division multiplexing optical transmission system is proposed, and experimental results are presented. To record the multiple holographic grating channels in the photorefractive LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal, angular multiplexing and exposure time schedule are used. Specially, we enhance the uniformity of each channel by use of the recycling technique in the exposure time schedule. To verify the proposed scheme we have designed the 8-channel demultiplexer with a channel spacing of 0.8nm in the wavelength region around 1590nm. From the experimental results, we have observed the diffraction efficiency of 0.8~0.92%, 3dB passband of 0.38~0.45nm, channel spacing of 0.7~0.89nm, and crosstalk suppression more than -26.98dB.

### 1. 서론

인터넷 이용의 증가와 광대역 네트워크의 진전 및 새로운 고대역폭 응용의 출현 등에 따른 대량의 정보를 수용할 수 있는 기술로 파장분할 다중(WDM : wavelength-division multiplexing) 방식이 활발하게 연구되고 있다. WDM 광전송 방식은 기존의 시분할 다중 방식이 갖는 동기식(SDH :

synchronous digital hierarchy) 전송기술의 한계를 보완 할 수 있으며, 신호를 묶고 풀기 위한 구성 체제도 단순하고, 입력 광신호에 대한 신호 속도나 형태 등의 제한도 없어 기존의 동기식 전송에 비해 전송용량을 쉽게 확장 할 수 있다는 장점을 갖는다. 파장분할 다중화기(MUX : multiplexer) 및 역다중화기(DEMUX : demultiplexer)는 이러한 전송 시스템의 핵심 요소 기술 중의 하나로서 현재 상용화 및 성능 향상을 위한 다양한 방식 및 기술들이 연

\* 충북대학교 공과대학 전기전자공학부 광정보처리연구실(jwahn@osp.chungbuk.ac.kr)

\*\* 순천대학교 공과대학 전자공학과

\*\*\* 인천대학교 공과대학 전자공학과

논문번호 : K01034-0127, 접수일자 : 2001년 1월 27일

구되고 있다. 일반적으로 파장 다중/역다중화 기술은 서로 다른 파장을 갖는 다수의 광신호를 하나의 광섬유에 고밀도로 다중화시키고, 또한 이와같이 파장 분할 다중화된 광신호를 원래의 개별 광신호로 역다중화하는 것으로 광섬유 증폭기의 이득대역인 1530~1560nm 및 1570~1600nm 파장 영역에서 낮은 삽입손실, 낮은 누화량 및 고밀도 다채널화 등과 같은 특성이 요구된다. 현재 WDM 광전송 시스템에 사용되는 다중화/역다중화 소자로는 배열 도파로 격자(AWG : array waveguide grating)를 이용한 방식, 광섬유 커플러(coupler)와 페브리-페로 필터(FPF : Fabry-Perot filter)를 결합한 방식, 파이버 격자(FBG : fiber Bragg grating) 필터와 광 서클레이터(circulator)를 직렬로 연결하는 방식 등이 이용되고 있다<sup>[1]</sup>. 이 중 AWG를 이용한 방식은 선택되는 중심파장이 도파로 길이와 주위 온도에 따라 매우 민감하게 반응하기 때문에 온도 안정성이 절대적으로 필요하고, 광섬유-도파로 결합으로 인해 큰 삽입손실 및 편광 의존성을 갖는다. 광섬유 커플러와 FPF를 결합한 방식은 다른 방식에 비해 상대적으로 손실이 많은 단점을 가지고 있다. 또한 FBG 필터를 이용하는 경우는 일반적으로 높은 파장 선택성, 좋은 기계적 안정성, 저렴한 비용등의 장점 때문에 향후 가장 유망한 기술로 간주되고 있으나, 원하는 파장의 빛이 되반사되고 이 빛을 분리하기 위해 추가적으로 고가의 광 서클레이터(circulator) 또는 Mach-Zehnder 간섭계가 필요하게 되는 문제점을 가지고 있다. 더구나 여러 채널을 역다중화할 경우 기본적으로 직렬 형태의 광섬유 격자가 필요하게 되고 따라서 채널수가 많은 경우 손실과 잡음 성분이 비례적으로 증가하여 각 채널의 효율이 불균일 해진다는 문제점등을 안고 있다. FBG는 원리적으로 광굴절(photorefractive) 매질에 기록된 홀로그래픽 부피 격자(holographic volume gratings)가 WDM용 필터 및 다중/역다중화 소자로 적용될 수 있음을 보여준 예로써, 일반적으로 홀로그래픽 부피 격자를 다중/역다중화 소자로 적용하기 위한 기본 원리는 광굴절 매질에 서로 다른 파수 벡터(wave-vectors)를 갖는 다수의 부피 홀로그램(holograms)을 중첩 기록하여 서로 다른 중심 파장의 빔을 각기 다른 각도로 회절 시키도록 한다. 이러한 홀로그래픽 부피 격자를 이용하여 WDM 소자로 적용하고자 하는 연구는 아직까지 실험실 단위에서 이루어지고 있지만, 최근에 광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 및 InP:Fe 단결정을 이용한 협대역 홀로그래픽 파장 선택 필터, BaTiO<sub>3</sub>

단결정을 이용한 파장 가변 필터 등과 같은 구조가 보고된 바 있다<sup>[2][3]</sup>. 그리고 가장 최근에는 다중 기록된 홀로그래픽 부피형 회절 격자를 이용하여 낮은 누화 특성을 갖는 역다중화 구조가 제안되고 있다<sup>[4][6]</sup>.

본 논문에서는 광굴절 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 결정 내에 코히런트한 빔의 간섭에 의해 형성된 반사형 홀로그래픽 격자의 협대역성, 고 회절효율(반사율), 높은 신호대 잡음비, 역다중성, 재구성성, 다채널화, 각 채널간의 부엽 억제 특성 등을 이용하여 WDM 광통신 시스템에 응용 가능한 역다중화 구조를 제안하고, 소자 특성의 결정요소, 설계과정을 제시한다. 그리고 본 논문에서는 각 채널의 균일한 회절특성을 위해 노출시간 계획(exposure time schedule)을 이용하였으며, 균일도를 향상시키기 위해 recycling 기법을 적용하였다. 또한, 선택하고자 하는 중심 파장 및 채널간격 제어를 위해 홀로그래픽 메모리 시스템(holographic memory system)에서 일반적으로 적용하고 있는 각도 다중화 기법을 사용하였으며, 이들 특성에 대한 이론적 분석 및 예비 실험 결과를 통해 파장 역다중화 소자로의 응용 가능성을 증명한다.

## II. 광굴절 역다중화기의 동작 원리 및 요소기술

본 절에서는 광굴절 결정에 형성된 반사형 홀로그래픽 부피격자를 이용하여 파장 DEMUX로 적용하기 위한 반사형 회절격자의 파장선택성, 회절효율, 소자의 특성 결정요소, 편광 의존성 및 역다중화기 구성을 위한 요소기술에 관해 논한다.

### 1. 광굴절 DEMUX의 원리 및 특성

그림 1은 광굴절 결정에 형성된 반사형 회절격자를 이용한 광필터의 구조 및 동작 원리를 설명하기 위한 기본 구조도이다. 그림에서 파장이  $\lambda_0$ 인 코히어런트한 두 기록빔이  $\theta_{o1}$ ,  $\theta_{o2}$ 의 외부 입사 반각(external half-crossing angle)을 갖고 결정에 입사되면, 광굴절 효과에 의해 매질 내에  $\Lambda$ 의 간격을 갖는 홀로그래픽 부피격자를 형성하게 된다. 만약 두 기록각이 동일한 경우( $\theta_{o1} = \theta_{o2}$ ), 격자의 파수벡터(wave-vector) K는 결정의 광축과 평행하게 된다. 이러한 회절격자에 결정 광축에 대해  $\theta_r$ 의 각도로 다파장 판독빔(multi-wavelength readout beam)이 입사되면, 브래그(Bragg) 조건을 만족하는 파장  $\lambda_r$

만 결정의 광축에 대해  $\theta_D$ 의 방향으로 반사되고 이외의 파장은 결정을 그대로 투과하게 된다.

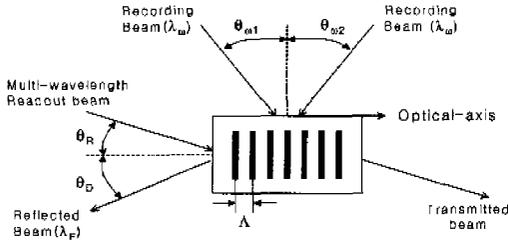


그림 1. 광굴절 파장선택필터의 원리

이러한 특성은 임의의 파장만을 검출하는 파장선택 필터로의 적용을 가능하게 하며, 이때 중심파장  $\lambda_F$ 를 결정하는 브래그 조건은 다음과 같이 표시된다<sup>[6]</sup>.

$$\lambda_F = \frac{n_F \cdot \lambda_w}{\sin[(\theta_{w1} + \theta_{w2})/2]} \cos[(\theta_R + \theta_D)/2] \quad (1)$$

여기서,  $n_F$ 는 선택되는 중심파장에 대한 매질의 굴절률(refractive index)이다. 따라서, 광굴절 부피 격자에 의해 반사되는 신호빔의 중심 주파수는 기록빔의 파장  $\lambda_w$  및 입사각  $\theta_{w1}$ ,  $\theta_{w2}$ 에 의해 주로 결정된다. 그리고 판독빔의 입사각  $\theta_R$  및 반사각  $\theta_D$ 는 기록 조건에 의해 결정되므로, 중심파장의 변화에는 크게 기여하지 못함을 예측할 수 있다.

따라서 위에서 보인 광굴절 파장 선택 필터의 필터링 원리를 적용하여 결정 내의 동일한 위치에 다중화된 서로 다른 격자를 중첩하여 기록하면, WDM 광 전송 시스템용 다채널 DEMUX로 응용이 가능해진다. 그림 2에 보인 것과 같이 결정 내부에 서로 다른 파수벡터  $\vec{K}_1$ ,  $\vec{K}_2$ 를 갖는 두 개의 회절격자가 기록되어 있을 때, 다파장 판독빔이 결정의 광축 방향에 대해  $\theta_R$ 의 각도로 입사된다고 가정한다. 그림에서 프라임(') 표시는 결정 내부에서의 각도를 의미한다. 이때,  $\vec{K}_1$ 의 파수벡터를 갖는 격자에 의해 회절되는 빔은 앞에서 언급한 바와 같이 브래그 조건을 만족하는  $\lambda_1$ 의 중심파장을 갖는 신호빔만을  $\vec{k}'_{1out}$  방향으로 반사하며,  $\vec{K}_2$ 는  $\vec{k}'_{2out}$  방향으로  $\lambda_2$ 를 반사시키게 된다. 따라서, 결정 내에 독립적인 N개의 홀로그래픽 부피격자를 기록하면,  $1 \times N$  MUX/DEMUX로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 그림에서 광축과 격자의 파수벡터 사이의

각도  $\delta$ 는 격자 기록시 선택된 기록빔의 입사각에 의해 결정되는 값이며,  $(\theta_{w1} - \theta_{w2})/2$ 와 같이 정의된다. 따라서, 홀로그래픽 광굴절 필터의 기하학적 해석에 의해 판독빔의 입사각  $\theta_R$ 과  $\theta_D$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\theta'_D = \theta'_R + 2 \cdot \delta \quad (2)$$

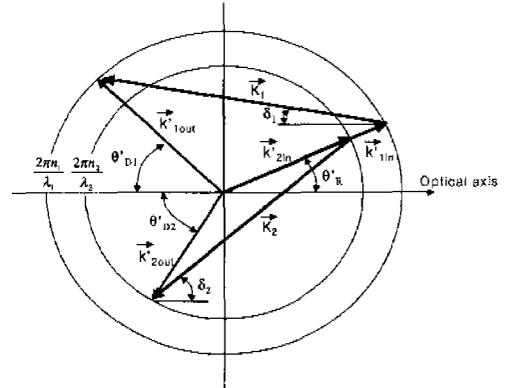


그림 2. 광굴절 역다중화기의 파수벡터 다이어그램

이러한 반사형 회절격자의 회절효율은 격자에 입사되는 빔의 세기와 격자에 의해 반사되는 빔의 세기 비로 정의되며, 결합파동 방정식(coupled-wave theory)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[6]</sup>.

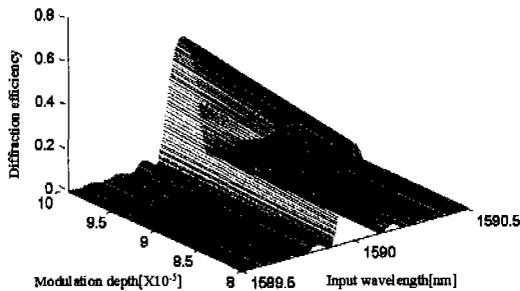
$$\eta = [1 + (1 - \xi^2/x^2)/\sinh^2(x\sqrt{1 - \xi^2/x^2})]^{-1} \quad (3)$$

여기서, 결합 상수(coupling constant)  $x = (\pi \cdot \Delta n \cdot d)/(\lambda_F \cdot \cos \theta_R)$ ,  $\Delta n$ 은 굴절률 변조 진폭(modulation depth of refractive index),  $d$ 는 상호작용길이(interaction length), 그리고  $\xi$ 는 브래그 어긋남 파라미터(off-Bragg parameter)로  $\theta_R$ 과  $\theta_D$ 가 근축 조건을 만족한다고 가정했을 때, 파장 불일치(wavelength mismatch)  $\Delta\lambda$  및 각도 불일치(angular mismatch)  $\Delta\theta_R$ 에 대해 다음과 같은 관계를 갖는다<sup>[6]</sup>.

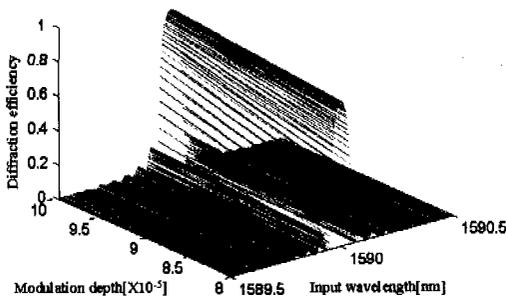
$$\xi = (K \cdot d/2)[\Delta\lambda/\lambda_F + \Delta\theta_R(\theta_R + \theta_D + \Delta\theta_R)/2] \quad (4)$$

그림 3은  $\lambda_F=1550\text{nm}$ ,  $K=2\pi/\Lambda$ ,  $n=2.211$ ,  $\Delta\theta_R=0$ 일 때, 두 기록빔의 상호작용길이와 굴절률 변조 진폭에 대한 필터의 파장 의존성을 보인 것이다. 그림 3(a)는  $\lambda_F=1550\text{nm}$ ,  $\lambda_w=514.5\text{nm}$ ,  $d=5\text{mm}$ 이고,  $\Delta n$ 이  $0.8 \times 10^{-5}$ 에서  $1 \times 10^{-5}$  범위의

값을 갖을 때 예측되는 필터 특성을 보인 것이고, 그림 3(b)는 동일한 조건에서 격자의 상호 결합길이  $d=10\text{mm}$ 일 때, 얻을 수 있는 이론적 특성을 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 홀로그래픽 부피 격자 기록시 적용되는 상호 결합길이와 굴절률 변조진폭은 광굴절 파장선택 필터의 중심 파장에서 예측되는 회절효율에 지배적으로 관여하며, 상대적으로 큰 결합길이와 큰 굴절률 변조진폭에 의해 고효율을 갖는 필터의 구성이 가능함을 예측할 수 있다. 이 중 결합길이의 조절은 격자 기록시 이용되는 기록빔의 크기와 이를 수용할 수 있는 매질의 형태에 의해 어느 정도 조절이 가능하며, 근본적으로 굴절률 변조 진폭의 크기는  $\text{LiNbO}_3$  결정의 경우 Fe의 도핑 정도 및 결정 성장 후 열적 어닐링 조건(thermal annealing conditions) 등에 의해 향상이 가능함이 보고된 바 있다<sup>[6]</sup>.



(a) 결합길이가 5mm 일 때 굴절률 변조 진폭에 따른 주파수 응답



(b) 결합길이가 10mm 일 때 굴절률 변조 진폭에 따른 주파수 응답

그림 3. 광굴절 파장선택필터의 주파수 응답

일반적으로 광통신에 사용되는 광섬유들은 대부분 무편광 광섬유가 이용되므로 편광 무의존성 소자(polarization independent device)의 구현이 필요하다. 그러나 광굴절 결정은 매질에 입사되는 광파

가 광축 방향과 평행한 경우(즉,  $\phi' \neq 0$ , 여기서  $\phi'$ 은 광축과 광파사이의 각도)는 항상 수평 편광(ordinary polarization) 상태로 작용하지만,  $\phi'$ 가 큰 경우에는 입사면에 대한 빔의 편광 상태에 따라서도 다른 굴절률을 갖게 된다. 즉 광축을 따라 진행하는 정상 고유 광파(ordinary eigenwave)와 이상 고유 광파(extraordinary eigenwave)가 동시에 존재하게 된다. 따라서, 광굴절 격자를 DEMUX로 적용할 경우 편광 의존성에 대한 고려가 설계시 반드시 필요하며, 이는 다파장 판독빔의 입사각  $\theta_R$  및 반사각  $\theta_D$ 에 의해 결정된다.

즉, 수신빔의 입사각 및 반사각이 결정의 광축 방향에 대해 근축 조건을 만족할 경우 편광 무의존성 소자 구성이 가능하게 되며, 이를 허용하는 입사각 범위  $\phi'$ 은 다음과 같이 주어진다<sup>[6]</sup>.

$$\phi' = \left[ \frac{2\xi\lambda}{\pi d} \left[ \left( \frac{n_o}{n_e} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서,  $n_o$  및  $n_e$ 는 각각 정상 및 이상 편광 상태에서 매질의 굴절률이다. 만약,  $\xi=1$ ,  $\lambda_F=1550\text{nm}$ ,  $n_o=2.211$ ,  $n_e=2.138$ ,  $d=10\text{mm}$ 라고 가정하면  $\phi \approx n_o \phi' = 2.3^\circ$ 이다. 즉, 위의 조건에서 광굴절 필터는 판독빔의 입사각  $\theta_R$ 과 회절빔의 입사각  $\theta_D$ 가  $2.3^\circ$ 보다 작아야만 편광 무의존성 소자 구성이 가능해진다. 편광 무의존성 조건을 만족할 경우 하나의 회절격자에 대해 서로 다른 두 개의 중심파장이 존재하므로, 결과적인 채널 수는 기록된 격자 수의 두배가 된다.

## 2. 광굴절 DEMUX 구성을 위한 요소기술

앞절에서 서술한 광굴절 DEMUX의 경우 결정 내의 동일한 위치에 역다중화기의 채널 수와 동일한 수의 회절 격자를 기록해야 하며, 이 경우 결정의 동적 특성으로 인해 초기에 기록된 부피 격자가 다른 부피 격자를 기록하는 동안 지수 함수적으로 지워지게 된다. 따라서, 기록되는 모든 부피 격자를 동일한 시간으로 기록할 경우 첫 번째 기록된 부피 격자의 회절 효율이 가장 낮고, 마지막으로 기록된 부피 격자의 회절 효율이 가장 높게 된다. 이러한 문제점은 홀로그래픽 광 메모리 시스템에서도 동일하게 적용되며, 이의 해결을 위해 각 홀로그램에 대한 기록시간을 다르게 설정해 모든 홀로그램이 동일한 회절 효율을 갖도록 하는 노출 시간 계획(exposure time schedule) 기법이 적용된다. 또한

LiNbO<sub>3</sub> 결정의 경우 매질의 동적 특성으로 인해 편독빔 및 주위 환경에 존재하는 에너지에 의해 이미 기록된 부피 격자가 부분적으로 삭제되는 문제점을 갖고 있는데, 이러한 삭제를 방지하기 위한 방법으로는 일반적으로 열 정착(thermal fixing) 기법이 적용된다. 이 중 노출시간 계획은 각 홀로그래픽 부피 격자의 노출시간을 다르게 할당하는 기법으로써 일반적으로 매질의 기록상수(recording constant,  $\tau_r$ ) 및 삭제상수(erasing constant,  $\tau_e$ )에 의해 각 격자에 대한 노출시간이 결정되며, 본 논문의 경우 8개의 균일한 격자를 기록하기 위해 홀로그래픽 메모리 시스템에서 일반적으로 적용되고 있는 다음과 같은 시간 계획 관계식을 이용하였다<sup>7)</sup>.

$$t_m = -\tau_r \ln \left[ 1 - \exp \left( \frac{t_{m+1}}{\tau_e} \right) + \exp \left[ t_{m+1} \left( \frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_r} \right) \right] \right] \quad (6)$$

여기서  $t_m$  은 m 번째 기록되는 홀로그래픽 부피 격자 대한 노출시간이다. 위와 같은 노출 시간 계획을 이용해서 홀로그래픽 부피 격자를 중첩 기록할 경우 예측되는 회절 효율은  $\eta = 1 - \exp(-t_m/\tau_r)$ 로부터 구할 수 있다. 예를 들어, 10개 홀로그램 기록에 의한 다채널 DEMUX 구성시 예측되는 회절 효율은  $\tau_r=60$ 초,  $\tau_e=180$ 초일 때 약 14%의 채널 효율을 예측할 수 있다. 이러한 노출 시간 계획은 다수의 홀로그램 기록시 유용하게 적용될 수 있지만, 실험 결과 본 연구에서 처럼 소수(~ 20 홀로그램)의 격자를 기록할 경우에는 균일한 회절 효율을 이끌어 내기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 다중 격자 기록시 식 (6)에 나타난 노출 시간 계획에 기초해 순차적으로 홀로그램을 기록한 후 각 홀로그램에 의한 회절효율을 측정해 상대적으로 낮은 회절효율을 갖는 격자에 대해 재기록을 수행하는 recycling 기법을 적용하였다. 이러한 방식의 경우 컴퓨터에 의해 제어되는 고분해도를 갖는 정밀 회전 스테이지가 필요하며, 각 홀로그램을 기록할 때마다 회절효율을 확인하는 과정이 요구된다. 위와 같은 노출시간 계획 이외에 고려해야 할 기술로서 위에서 언급한 열 정착기술이 있다.

일반적으로 열 정착 기술에는 두 가지 방법이 있다. 먼저 상온에서 홀로그래픽 부피 격자를 기록한 다음 150~180°C 의 온도에서 일정한 시간 동안 가열한 후 서서히 냉각시키는 방법(low-high thermal fixing)<sup>8)</sup>으로 가장 보편적으로 사용되는 방식

이다. 두 번째 방법은 온도를 일정한 상태로 높은 상태에서 부피 격자를 기록하는 방식(high-low thermal fixing)<sup>9)</sup>인데, 이 경우 주기적인 전하 분포 또는 움직이는 양자에 의해 계속해서 보상되므로 공간 전하장은 기록시 비교적 적은 크기로 유지되지만 반면 작은 잠음성분을 갖는 강한 격자를 기록시킬 수 있어 높은 회절 효율을 얻을 수 있다고 보고된 바 있다. 본 논문에서는 각 채널의 특성 분석 시 편의상 열 정착 기법을 사용하지 않고 관찰하였다.

일반적으로 광굴절 다중 홀로그램을 DEMUX로 적용하는데 있어서, 실제 구현 가능한 채널 수는 각 채널에서 요구되는 회절효율 및 매질의 최대 굴절률 변조 진폭에 관련하여 결정된다. 즉, 굴절률 변조 진폭의 포화값  $\Delta n_s$  는<sup>6)</sup>

$$\Delta n_s = -\frac{1}{2} n^3 \gamma E_{SC} \quad (7)$$

와 같이 정의되며, 여기서  $n$ 은 매질의 굴절률,  $\gamma$ 는 유효 전기-광학 계수(effective electro-optic coefficient) 그리고,  $E_{SC}$ 는 공간전하장의 크기(amplitude of the space charge field)이다. LiNbO<sub>3</sub> 결정의 경우 공간전하장은 내부 breakdown으로 인해 제한을 받게 되는데, 최대 공간전하장의 크기는 대략 107V/m까지 얻을 수 있음이 보고된 바 있다<sup>6)</sup>.

그리고 전기-광학 계수는 사용 파장이 증가할수록 감소하며, 정상 편광된 1300nm 파장영역에서 congruent 조성의 LiNbO<sub>3</sub> 결정의 경우 10.3±1.0pm/V 정도까지 얻을 수 있음이 알려지고 있다<sup>6)</sup>. 이 경우, 각 채널에서 요구하는 굴절률 변조 진폭을  $\Delta n$  이라 하면, 적용된 매질을 이용해 구성 가능한 채널 수  $N_{ch}$ 는  $\Delta n_s/\Delta n$ 으로 정의된다.

일예로, 각 채널에서 요구하는 회절효율이 80%인 경우 식 (3)과 식 (4)로부터 각 홀로그램은  $7.1 \times 10^5$ 의 굴절률 변조 진폭  $\Delta n$ 을 필요로 하며, Fe가 0.5mol% 도핑된 LiNbO<sub>3</sub> 결정의 경우(Fe 농도(concentration)=1026m<sup>-3</sup>, 채워진 Fe<sup>2+</sup> 트랩의 농도와 Fe<sup>3+</sup> 트랩의 농도비  $C_{Fe^{2+}}/C_{Fe^{3+}}=0.5$ ) 얻을 수 있는 굴절률 변조 진폭의 포화값  $\Delta n_s$ 는  $3 \times 10^3$ 까지 얻을 수 있음이 보고된 바 있다<sup>6)</sup>. 따라서, 위의 광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 다채널 MUX/DEMUX로 적용할 경우 80% 이상의 회절효율을 갖는 1×40 MUX/DEMUX 소자 구성이 가능함을 알 수 있다.

### III. 광굴절 DEMUX 실험 및 결과 분석

본 논문에 사용된 광굴절  $\text{LiNbO}_3$  결정은 Fe의 농도가  $4.67 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$  (0.02 wt.%)인 CASIX사 제품으로, 514.5nm 파장을 갖는 수직편광인 두 기록빔의 외부 입사각이  $45^\circ$  이고, 두 빔의 결합길이  $d = 4\text{mm}$  일 때, 굴절률 변조진폭의 포화값  $\Delta n_s$  은 약  $0.378 \times 10^{-4}$  이다. 본 절에서는 앞절에서 제시한 광굴절 파장선택 필터의 구성 원리, 각도 다중화, 노출 시간계획 등과 같은 기술의 조합에 의해 1×8 DEMUX를 설계하고, 실험결과를 제시한다.

그림 4는 DEMUX를 구성하기 위한 실험 구성도이다. 514.5nm 파장의 아르곤 레이저는  $\lambda/2$  위상판에 의해 이상편광 상태로 변환된 후 빔 확장기 (beam expander), 원형 개구(aperture), 빔 분할기 (beamsplitter), 미러를 통해 결정에 3mm의 직경을 갖는 원형대로 입사된다. 이때, 두 기록빔의 입사각 중  $\theta_{\omega 2}$  는  $45^\circ$  로 항상 고정된다. 필터의 주파수 응답을 조사하기 위한 판독빔은 1520nm~1600nm 범위의 파장대역을 갖는 가변 광원을 사용하였으며, 미러(mirror)와 렌즈(lens)를 통해 결정에 수직으로 (결정의 광축 방향으로) 입사된다( $\theta_R = 0^\circ$ ). 격자에 의해 회절되는 빔은 미러와 광 검출기를 통해 측정되고, 결정에 입사되는 빔의 파장은 결정 투과면에 위치한 광주파수분석기(OSA: optical spectrum analyzer)를 통해 관측한다.

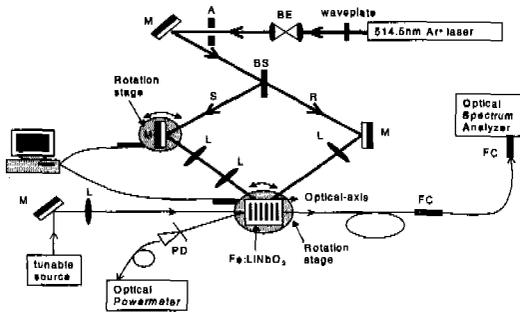


그림 4. 광굴절 역다중화기 실험 구성도

그림 5는 광굴절 결정에 형성된 단일 격자의 주파수 응답특성을 측정한 결과로 두 기록빔의 입사각은 각각  $\theta_{\omega 1} = 46^\circ$ ,  $\theta_{\omega 2} = 45^\circ$  이며, 이때 예측되는 필터의 중심파장  $\lambda_F$  는 1594.82nm 이고, 결정의 광축과 격자 피수벡터 사이의 각  $\delta$  는  $0.5^\circ$  이다. 결

정에 입사되는 각도는 필터의 중심파장을 결정하는 중요한 요소이므로, 실험시 각별한 주의가 요구된다. 본 실험에서는  $360^\circ$  방향에 각도 눈금이 있는 판의 중앙에 결정을 위치시킨 후 각도를 조절하였으며, 각도 셋업 후 필터의 성능을 테스트해 설계된 조건과 일치되는 조건을 기준으로 실험하였다. 실험결과 1594.84nm의 중심파장에서 0.44nm의 통과대역과 6.57%의 회절효율, 그리고 중심파장으로부터 0.5nm 벗어난 파장영역에서 얻을 수 있는 부엽 억제(sidelobe suppression) 효과는 약 -30.46dB 정도가 됨을 알 수 있다. 여기서 이론적으로 예측된 중심파장과 실험값과의 차이는 기록각도에 있어서의 미세한 오차로 생각된다. 즉, 필터의 중심파장을 고려한 식 (1)에서 보면, 본 논문의 실험조건에서 0.8nm의 중심파장을 변화시키는데 한쪽 기록빔의 각도 변화가 단지  $0.064^\circ$  이므로, 정확한 중심파장 제어를 위해서는 반드시 미세한 각도 제어가 가능한 부가 장치를 필요로 한다.

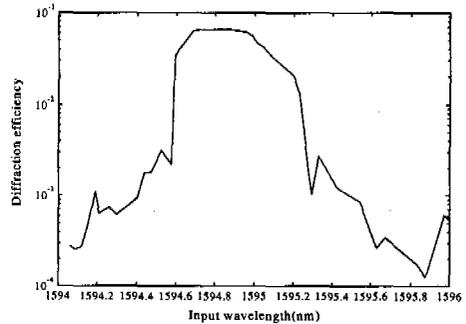


그림 5. 광굴절 파장선택필터의 주파수 응답

표 1은 그림 5에서 보인 광굴절 부피격자의 파장선택 특성과 각도 다중화 기법을 조합하여 설계된 8채널 DEMUX의 설계값이다. 여기서 각 홀로그래프에서 반사되는 중심파장의 변화는 한쪽 기록빔의 각도 ( $\theta_{\omega 1}$ )를 변화시킴으로써 얻으며, 변화시킨 각도에 의해 반사되는 각이 변화되어 공간적인 검출이 가능하다. 이때 예측되는 중심파장은 식 (1)로부터 계산되며,  $\theta_{\omega 1}$ 각의 조정을 위해 본 논문에서는 신호빔(signal beam)의 경로에  $0.002^\circ$  까지 컴퓨터로 제어가 가능한 정밀 회전 모터 스테이지(motorized rotation stage) 및 렌즈 조합을 사용하였다. 그리고 판독빔의 입사각 제어를 위해서는  $\text{LiNbO}_3$  결정을 1/1000도 까지 제어가 가능한 정밀 회전 모터 스테이지 위에 장착하였다. 표 1에서 설계된 조건을 보면 0.8nm 채널간격을 갖는 역다중화기 구현을 위해

표 1. 1×8 역다중화기 설계 결과

	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8
$\theta_{in}$ (degree)	46	46.064	46.122	46.181	46.24	46.299	46.358	46.417
$\theta_{out}$ (degree)	45	45	45	45	45	45	45	45
$\theta_{div}$ (degree)	1	1.064	1.122	1.181	1.24	1.299	1.358	1.417
$\lambda_p$ (nm)	1594.82	1594.02	1593.22	1592.42	1591.62	1590.82	1590.02	1589.22

각 홀로그램 기록시 요구되는 각도 변화량은 약 0.06° 이다. 따라서, 평행광으로 변형된 기록빔의 확산(divergency) 각도가 이보다 큰 경우에는 효과적인 채널 분리를 이룰 수 없다. 본 실험에서는 기록 빔 자체의 확산 각도를 측정하지 않고, 각 채널이 유효한 누화 억제 특성을 갖는 것으로 기록빔의 확산각이 0.06° 보다 작음을 확인하였다.

이러한 광굴절 DEMUX의 구성에 있어서 각 채널에서 얻는 회절효율을 균일하게 하기 위해 식 (6)에서 보인 노출시간 계획이 적용되며, 이의 적용을 위해서는 사용하는 매질의 기록상수 및 삭제상수의 측정이 필요하다. 그림 6에 본 논문에서 사용한 광굴절 결정의 기록 및 삭제 특성을 나타내었다. 여기서 기록빔은 그림 4에 나타난 바와 같이 이상편광 상태의 514.5nm 아르곤 레이저를 사용하였으며, 신호빔의 세기는 18.9 mW/cm<sup>2</sup>, 기준빔의 세기는 20.5 mW/cm<sup>2</sup> 이다. 그림 6에서 보듯이 본 논문에서 사용한 결정의 기록 상수는 60초, 삭제 상수는 180초로 열정착 기술을 사용하지 않을 경우, 본 논문에서 사용한 광굴절 결정의 예상되는 채널 수는 결정의 M/# 및 각 채널에서 요구되는 회절 효율로부터 예측할 수 있다<sup>10)</sup>. 이는 본문에서 제시한 식 (3), (4)에서 예측할 수 있으며, 본 논문에서 이용한 결정의 경우 각 채널에서 요구되는 회절효율이 10%라고 가정했을 때, 1×10 DMUX 구성이 가능함이 예측된다. 그리고 앞에서 측정된 결정의 기록 상수 및 삭제 상수는 노출시간 계획에 직접적으로 적용되며, 이의 적용을 통해 각 홀로그램에 대한 기록시간이 할당된다. 위에서 서술한 조건 이외에 결정의 광학축(Optical axis)은 파장선택 소자로 적용시 주요한 요소중 하나이며, 본 논문에서는 Deltronics사에서 주문 제작한 결정을 사용하였고, 제작사에서 제시한 광학축을 신뢰하고 실험하였다.

그림 7(a)는  $\lambda_0 = 514.5\text{nm}$ ,  $d = 5\text{mm}$ ,  $\Delta n_5 = 0.472 \times 10^{-5}$ ,  $n = 2.211$ ,  $K = 2\pi/\Lambda$  이고, 선택되는 중심파장이 표 1에 설계된 조건과 같이 0.8nm 채널

간격을 갖는 8채널 DEMUX에 대한 이론적 예측값을 보인 것이다.

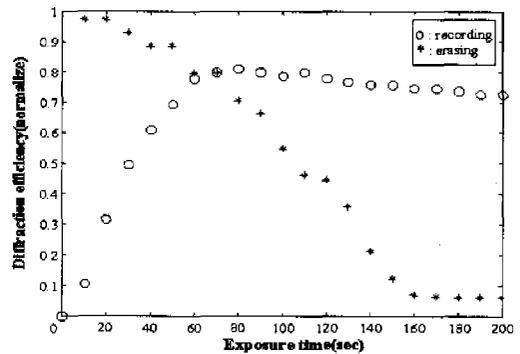
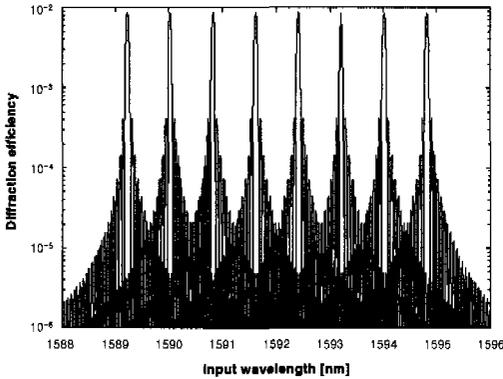
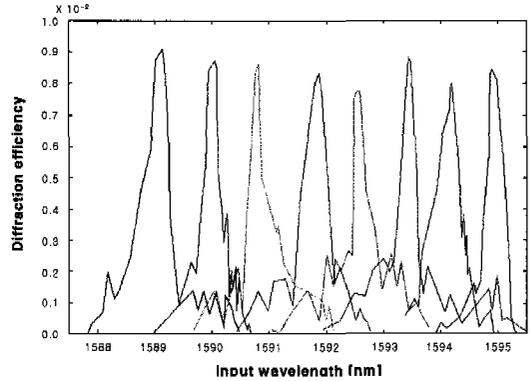


그림 6. 광굴절 결정의 기록상수 및 삭제상수

이는 식 (3) 및 식 (4)로부터 계산되며, 위의 조건에서 각 채널은 약 1%의 회절효율과 약 -47dB의 채널 간섭 억제가 예측됨을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 그림 4의 실험 구성도와 표 1의 설계결과, 각도 다중화 기법, 노출시간 계획 기술의 조합을 통한 1×8 역다중화기에 대한 실험결과이다. 앞절에서 언급한 바와 같이 8개의 격자 기록은 식 (6)에 나타난 노출 시간 계획에 기초해 순차적으로 홀로그램을 기록하고, 각 부피격자에 대한 회절 효율을 측정해 상대적으로 낮은 효율을 갖는 격자에 대해 재기록을 수행하는 recycling 기법을 적용하였다. 이러한 방식의 경우 컴퓨터에 의해 제어되는 고분해도를 갖는 정밀 회전 모터 스테이지가 필요하며, 각 채널 별로 대응되는 격자를 기록한 후 각 격자의 회절효율을 재확인하고 다시 재노출 시키는 반복적이고 세밀한 과정이 요구되지만 실제로 적은 수의 홀로그램을 기록시킬 경우 매우 효과적인 방식으로 생각된다. 그러나 본 논문의 실험과정에서는 이 방식의 적용 가능성을 확인키 위해 비교적 대략적으로 적용였고, 정밀한 recycling 기법을 적용하지는 않았다. 격자에 의해 반사되는 빔은 입사되는 빔의



(a) 1×8 역다중화기의 이론적 주파수 응답



(b) 1×8 역다중화기 실험결과

그림 7. 1×8 역다중화기의 이론적 예측값 및 실험결과

경로와 1°의 각도차를 가지므로, 측정을 위해서는 충분한 거리를 유지하여, 공간상으로 분리한 후 측정하였다. 또한, 결정 표면에서 반사되는 빔과 격자에 의해 반사되는 빔의 구별은 입사빔의 파장을 변화시켜 가면서 확인하였다. 실험결과에서 보면 각 채널은 0.8~0.92%의 회절 효율 분포와 0.38~0.45nm의 3dB 통과대역을 갖고, 채널간격은 0.7~0.89nm의 결과를 보인다. 회절효율은 결정 표면에서의 반사와 매질의 흡수에 의한 광손실을 무시하고 측정하였다. 즉, 매질 표면에서 반사되는 빔의 세기를  $I_r$ , 흡수율을  $\alpha$ , 투과빔 세기를  $I_t$ , 격자에 의한 반사빔 세기를  $I_r$  이라고 할 때, 측정된 회절효율은  $I_r/(I_r+I_t)$ 에 의한 것이다. 또한, 각 채널간 간섭 억제(crosstalk suppression)은 -26.98dB 이상의 값을 갖는다. 이중 각 채널의 회절효율은 홀로그램 기록시 완벽한 평행광의 사용과 긴 결합길이 그리고, 앞절에서 언급한바와 같이 다채널 기록시에도 강한 굴절을 변조를 유도할 수 있는 매질 및 Fe의 도핑 정도, 혹은 결정 성장 후 열적 어닐링 조건 등을 사용하여 향상이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 다채널 역다중화기에서 가장 중요한 요소중 하나인 각 채널간 균일도는  $\pm 6.97\%$ 로 정확한 기록상수 및 삭제상수 측정을 통한 안정적 노출시간 계획과 보다 정밀한 recycling 기법이 적용되면 균일도 향상이 가능할 것으로 예측된다. 채널간 간격은 설계된 조건(0.8nm)에 비해  $\pm 0.1\text{nm}$ 의 오차를 보이며, 이는 실험 구성도의 정확한 설계를 통해 없앨 수 있다. 이상의 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 방식의 경우, 적절한 매질과 노출시간 계획의 사용, 기록각도의 정확한 조정을 위한 장치 및 안정적 광학

시스템이 광굴절 역다중화기의 구현에 적절히 적용된다면 파장분할 다중 전송 시스템에 적용가능한 다채널 MUX/DEMUX의 구성이 가능할 것으로 생각된다.

#### IV. 결론

광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 결정에 형성된 홀로그래픽 부피 격자의 파장선택특성과 각도 다중화 기법을 적용한 WDM 광통신 시스템용 DEMUX 구조를 제안하고, 실험결과를 제시하였다. 다중 홀로그램 기록시 각 채널의 균일한 회절특성을 유도하기 위해 노출시간 계획을 이용하였으며, recycling 기법을 통해 채널간 균일도를 향상시켰다. 실험결과 단일채널 파장선택필터의 경우 1594.84nm의 중심파장에서 6.57%의 회절효율과 0.44nm의 3dB 통과대역 특성을 보였으며, 중심파장으로부터 0.5nm 떨어진 파장 영역에서는 -30.46dB의 부역억제 특성을 얻었다. 또한, 8 채널 역다중화기 실험결과 0.8~0.92%의 회절효율, 0.38~0.45nm의 3dB 통과대역, 0.7~0.89nm의 채널 간격 및 -26.98dB 이상의 채널 간섭 억제 특성을 얻었다. 각 채널의 회절효율은 홀로그램 기록시 완벽한 평행광의 사용과 긴 결합길이 그리고, 다채널 기록시에도 강한 굴절을 변조를 유도할 수 있는 매질의 도핑 농도 조절, 혹은 결정 성장 후 열적 어닐링 조건 등의 개선을 통해 향상시킬 수 있으며, 정확한 기록각도 제어 장치 및 광학 시스템의 안정화가 이루어진다면 안정적인 중심파장의 제어가 가능할 것으로 생각된다. 본 논문에서 제시한 실험결과는 현재 적용되고 있는 고밀도 파장분할 다중 시

스텝에 적용하기에는 삽입손실 및 채널 간격의 정확성에 문제가 있지만, 기록매질 대체를 통한 삽입손실 감소와 정확한 각도 제어를 통한 중심파장 제어 그리고, 우수한 채널 간섭 억제 특성을 활용한다면, 광전송 시스템으로의 적용이 가능할 것으로 생각된다.

참고 문헌

[1] Jerry R. Bautista, "Multiplexers bring DWDM to metro/access markets," WDM solutions by Laser Focus World, pp. 11-16, Feb, 2000

[2] 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

[3] R. T. B. James, C. Wah, K. Iizuka and H. Shimotahira, "Optically tunable optical filter," Appl. Opt., vol. 34, no. 35, pp. 8230-8235, Dec. 1995

[4] J. W. An, N. Kim, K. Y. Lee, H. J. Lee, and W. S. Seo, "1x16 demultiplexer using volume holographic gratings in iron doped lithium niobate crystal," 2000 SPIE annual meeting, vol. 4110, pp. 302-312, 2000

[5] J. W. An, N. Kim, K. Y. Lee, H. J. Lee, W. S. Seo, and S. S. Nam. "Low crosstalk holographic demultiplexer by reflection gratings" IPC 2000 in Taiwan. pp. 101-103, 2000

[6] S. Breer and K. Buse, "Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate," Appl. Phys. B, vol. 66, pp. 339-345, 1998

[7] 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.

[8] A. Yariv, S. Orlov, G. Rakuljic, and V. Leyva, "Holographic fixing, readout, and storage dynamics in photorefractive materials," Optics Letters, vol. 20, pp. 1334-1336, June 1996.

[9] D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips, and J. J. Amodei, "Multiple storage and erasure of

fixed holograms in Fe-doped LiNbO<sub>3</sub>," Appl. Phy. Lett., vol. 26, pp. 182-184, Feb., 1975

[10] Fai H. Mok, Geoffrey W. Burr, and D. Psaltis, "System metric for holographic memory systems," Opt. Lett., vol. 21, no. 12, pp. 896-898, 1996

안 준 원(Jun-Won An) 정회원  
한국통신학회논문지 제23권 제4호 참조

김 남(Nam Kim) 정회원  
한국통신학회논문지 제23권 제4호 참조

신 창 원(Chang-won Shin) 학생회원



2000년 2월: 순천대학교  
전자공학과 졸업  
2000년 3월~현재: 순천대학교  
전자공학과 석사 재학중  
<주관심 분야> WDM 광필터,  
홀로그래픽 광메모리, 광신호  
처리

이 권 연(Kwon-Yeon Lee) 정회원  
한국통신학회논문지 제23권 제4호 참조

전 석 회(Seok-Hee Jeon) 정회원  
한국통신학회논문지 제24권 1B호 참조