

파장 분할 다중 시스템 적용을 위한 홀로그래픽 파장 역다중화

정희원 남기원*, 김남*, 이권연**, 조병모**, 이현재***, 서완석***

Holographic wavelength demultiplexing for WDM system

Gi-won Nam*, Nam Kim*, Kwon-yeon Lee**, Byung-mo Cho**, Hyun-jae Lee**,
Wan-seok Seo** *Regular Members*

요 약

광굴절 Fe-LiNbO₃ 결정에서 형성된 홀로그래픽 부피 격자의 협대역 및 파장 역다중화 특성을 이용한 WDM 광통신 시스템용 역다중화 기법을 제안하고, 실험결과를 제시하였다. 홀로그래픽 부피격자의 중심 파장, 채널 간격, 통과대역 특성의 결정 요소에 대해 분석하고, 제안한 역다중화 기법을 입증하기 위해 결정 내에 세개의 반사형 부피격자를 기록한 후 브래그 회절된 각 채널의 특성을 관찰하였다. 실험결과 1591.35nm, 1590.53nm, 1588.91nm의 중심 파장에서 각각 0.34nm, 0.45nm, 0.43nm의 통과대역 특성을 보였으며, 채널 간격이 0.8nm인 경우 34.95dB의 채널 누화 억제 특성을 관찰하였다.

ABSTRACT

For WDM(wavelength-division multiplexing) optical communication systems, demultiplexing scheme is proposed and experimentally demonstrated using the narrow-band filtering and demultiplexing properties of volume holographic gratings formed in photorefractive Fe-LiNbO₃ crystal. The determination parameters of volume holographic filters such as center-wavelength, channel spacing, and pass-band properties are considered. As a proof of concept, we report the demultiplexing of three channels by Bragg diffraction from volume reflection gratings. From the experimental results, the measured pass-bands of each channels are 0.34nm, 0.45nm, and 0.43nm at 1591.35 nm, 1590.53nm, and 1588.91nm center-wavelengths, respectively. Also, the cross-talk suppression is achieved by 34.95 dB for channel spacing of 0.8 nm.

I. 서론

현재 파장 분할 다중(WDM : Wavelength Division Multiplexing) 방식은 추가적인 광섬유망의 구축과 고속 전송장비를 사용하지 않고서도 간단하게 전송망의 용량을 증대시킬 수 있는 이점 때문에 향후 광 인터넷 망 및 광대역 초고속 네트워킹의 기술적 진화를 수용할 수 있는 적합한 기술로 각광을 받고 있다. 이러한 WDM 광통신 시스템을 구성

하기 위해서는 광파장 필터, 다채널 파장 다중화기(MUX : multiplexer) 및 역다중화기(DEMUX : demultiplexer), 광증폭기 그리고 광파장 변화 소자 등과 같은 광부품의 개발이 필요하다. 특히, 다파장의 광 신호를 다중화하여 단일 광섬유를 통해 전송하고 수신단에서는 파장에 따라서 광신호를 역다중화하기 위한 다채널 MUX 및 DEMUX는 고밀도 다중 채널 WDM 광통신 시스템의 실현을 위해서는 필수적인 소자이다. 광섬유에서 일반적으로 알려진

* 충북대학교 공과대학 전기전자공학부,
*** 한국전자통신연구원 광다중화팀
논문번호: 00450-1128, 접수일자: 2000년 11월 28일

** 순천대학교 공과대학 전자공학과,

파장 다중/역다중화 개념들은 Fabry-Perot 또는 Mach-Zehnder 간섭계, 배열 도파로 격자(AWG : arrayed waveguide grating), 광섬유 브래그 격자(FBG : fiber Bragg grating)등에 의해 실현 가능하다^{[1][2]}.

이중 간섭계를 이용한 DEMUX의 경우 기계적인 것에 대하여 매우 민감하며, 온도 불안정성과 미러의 이동이 필요할 뿐 아니라 여러 채널을 동시에 역다중화시킬 경우 여러개의 간섭계를 필요로 하는데, 간섭계가 증가할수록 잡음, 누화등이 선형적으로 누적되는 단점이 있다. 그리고 AWG의 경우, 선택되는 중심파장이 도파로 길이와 주위 온도에 매우 민감하게 반응하기 때문에 온도 안정성이 절대적으로 필요하고, 광섬유-도파로 결합으로 인해 큰 삽입손실 및 편광 의존성을 갖는다. 또한, FBG는 일반적으로 높은 파장 선택성, 좋은 기계적 안정성, 저렴한 비용등의 장점 때문에 향후 가장 유망있는 기술로 간주되고 있으나, 원하는 파장의 빛이 되반사되고 이 빛을 분리하기 위해 추가적으로 광 서큘레이터(circulator) 또는 Mach-Zehnder 간섭계가 필요하게 되는 문제점을 가지고 있다. 더구나 여러 채널을 역다중화할 경우 기본적으로 직렬 형태의 광섬유 격자가 필요하게 되는 문제점을 가지고 있다.

FBG는 원리적으로 부피 홀로그래피 WDM용 필터 및 다중/역다중화 소자로 적용될 수 있음을 보여준 예로써, 일반적으로 부피 홀로그래피를 다중/역다중화 소자로 적용하기 위한 기본 원리는 광굴절 매질에 서로 다른 파수 벡터를 갖는 다수의 부피 홀로그래피를 중첩 기록하여 서로 다른 중심 파장의 빛을 각기 다른 각도로 회절 시키도록 한다. 이러한 홀로그래피 부피 격자를 이용하여 WDM 소자로 적용하고자 하는 연구는 아직까지 실험실 단위에서 이루어지고 있지만, 최근에 광굴절 LiNbO₃^[7] 및 InP:Fe^[4] 단결정을 이용한 협대역 홀로그래피 파장 선택 필터, BaTiO₃ 단결정을 이용한 파장 가변 필터^[12] 등과 같은 구조가 보고된 바 있다.

본 논문에서는 광굴절 Fe-LiNbO₃ 결정 내에 코히런트한 빔의 간섭에 의해 형성된 반사형 부피 격자의 협대역성(~0.02nm), 고 회절효율(반사율), 높은 신호대 잡음비, 역다중성, 재구성성, 다채널화 등과 같은 특성을 이용하여 WDM 광통신 시스템에 응용 가능한 새로운 역다중화 구조를 제안하고, 실험적으로 입증한다. 그리고 광굴절 DEMUX 구현을 위해 각 채널의 채널간격, 중심 파장, 통과 대역 특성 등과 같은 결정 요소에 대해 해석하고 분석하였

다. 또한 본 논문에서는 광굴절 결정 내에 부피 격자를 중첩 기록하기 위해 홀로그래피 메모리 시스템에서 일반적으로 적용하고 있는 각도 다중화 기법을 적용하였고, 각 채널의 균일한 회절 효율을 얻기 위해 노출 시간 계획(exposure time schedule)을 사용하여 DEMUX 구현이 가능 함을 실험적으로 입증하였다.

II. 광굴절 부피 격자형 파장 역다중화

일반적으로 WDM 시스템에서 사용 가능한 한정된 대역폭을 효과적으로 이용하기 위해서는 시스템에 사용되는 파장 선택 필터 및 다중화/역다중화의 협대역성, 낮은 삽입손실 및 편광 의존성, 저누화 등과 같은 특성이 요구된다. 특히, 광굴절 결정을 이용한 부피 격자형 필터의 경우, 반사형 구조 및 부피격자의 다중기록 특성을 적용하여 다채널 파장 DEMUX를 구현하면 통과대역, 채널간의 누화, 편광 의존성, 다채널화 등과 같은 측면에서 상당히 우수한 특성을 나타내며 향후 WDM 시스템에 사용 가능할 것으로 예상하고 있다^{[6],[11]}. 더구나 광굴절 결정의 동일한 위치에 여러 채널을 다중화시켜 기록시키기 때문에 기존 간섭계형 필터 및 광섬유형 격자를 다채널화 시켰을 때 발생하는 잡음 및 광손실의 누적, 복잡성 등과 같은 문제점을 해결할 수 있는 방식으로 평가되고 있다.

그림 1은 광굴절 결정에서 형성된 반사형 부피 격자의 필터 특성 및 DEMUX 원리를 설명하기 위한 기본 구조도이고, 여기서 θ_{wr} , θ_{wi} 는 부피 격자를 기록하기 위한 두 기록빔의 입사각이다. 그림과 같이 결정의 한면에 두빔이 입사되면 광굴절 효과에 의해 결정내에 홀로그래피 부피 격자가 형성되고, 이때 격자의 파수벡터는 결정의 c-축 방향과 평행하게 된다. 그리고, 이러한 부피 격자에 1550nm 대역의 다파장 판독빔을 결정의 c-축 방향에 대해 α 의 각으로 입사시키게 되면, 브래그 조건을 만족하는 파장대역의 신호빔 만이 부피 격자에 의해 반사되어 β 각으로 회절되게 된다.

그림 2은 그림 1에서 나타난 반사형 부피 격자를 이용한 파장선택 필터 및 다채널 DEMUX에 대한 파수 벡터도를 보인 것이다. 여기서 K_1 과 K_2 는 각각 결정 내에 기록된 두 반사형 부피 격자의 파수 벡터, k_{1in} 과 k_{2in} 는 결정의 c-축 방향으로 입사되는 판독빔의 파수 벡터이고, k_{1out} 과 k_{2out} 는 부피 격자에 의해 회절되는 빔의 파수 벡터이다. 그리고 λ_1 , λ_2

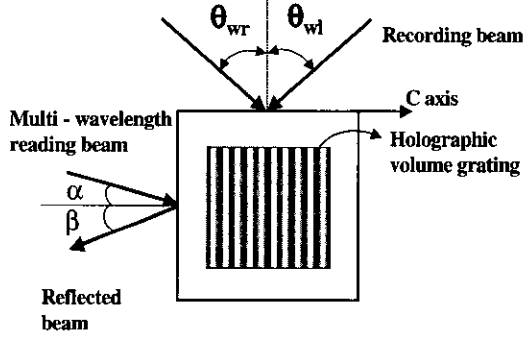


그림 1. 반사형 구조에서 홀로그래픽 필터 기록 및 파장 역다중화의 개념도

는 각 부피 격자에 의해 회절되는 빔의 중심 파장이고, n_1 과 n_2 는 각 파장에 대한 매질의 굴절률이다. 이와 같은 조건에서 만약 판독빔이 k_{1in} , k_{2in} 으로 입사되면, 앞에서 언급한 바와 같이 브래그 조건을 만족하는 특정한 파장대역의 신호빔만이 각각 k_{1out} , k_{2out} 방향으로 회절 또는 반사하게 된다. 따라서 이러한 부피 격자의 파장 선택성을 적용하고, 광굴절 결정의 동일한 위치에 다채널 홀로그래픽 부피 격자형 필터를 중첩하여 기록하면 WDM용 다채널 역다중화기로 응용이 가능해 진다.

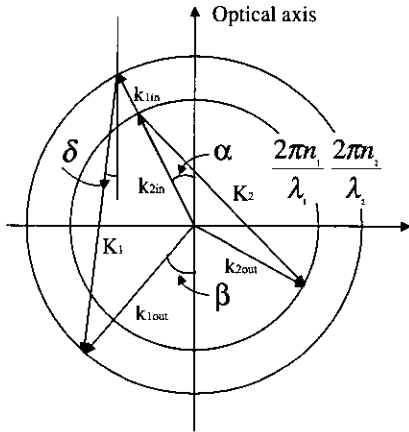


그림 2. 파장 역다중화를 위한 파수 벡터 다이어그램

그림 1 및 그림 2에 스넬의 법칙을 사용하면 기록각 θ_{wr} , θ_{wl} 의 관계는 다음과 같이 표시 된다.

$$\theta_{wr} = \sin^{-1}(n_{writing} \times \sin\{\sin^{-1}[K\lambda_w / (4\pi n_{writing})] + \delta\}) \quad (1)$$

$$\theta_{wl} = \sin^{-1}(n_{writing} \times \sin\{\sin^{-1}[K\lambda_w / (4\pi n_{writing})] - \delta\}) \quad (2)$$

$$K = (4\pi n_{reading} / \lambda) \cos[(\alpha + \beta) / 2] \quad (3)$$

$$\delta = (\alpha - \beta) / 2 \quad (4)$$

여기서, λ_w 는 기록빔의 파장, $n_{writing}$ 는 기록 파장의 매질의 굴절률, δ 는 결정의 c축과 격자의 파수 벡터 사이의 각, K 는 격자의 공간 주파수, $n_{reading}$ 은 판독빔에 대한 매질의 굴절률이고 λ 는 선택되는 중심파장 이다. 그리고 반사형 부피 격자에 Kogelnik의 결합파 이론(coupled wave theory)^[5]을 적용하면 브래그 어긋남(off-Bragg)에 따른 반사형 부피격자의 회절 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \frac{\xi^2}{x^2}}{\sinh^2(x\sqrt{1 - \frac{\xi^2}{x^2}})}} \quad (5)$$

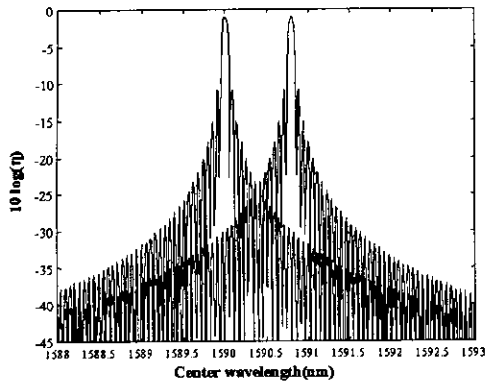
여기서, x 는 결합계수이고 $x = \pi \Delta n d / \lambda \cos \alpha$ 로 표현된다. 그리고 ξ 는 브래그 어긋남 파라메타, Δn 은 굴절률 변조 진폭이고 d 는 결정내에서 두 기록빔의 결합 길이 이다. 그림 1에서 $\alpha, \beta < 1^\circ$ 라고 가정하면 브래그 어긋남 파라메타 ξ 는 다음과 같이 근사화 된다.

$$\xi = \frac{Kd\Delta\lambda}{2\lambda} \quad (6)$$

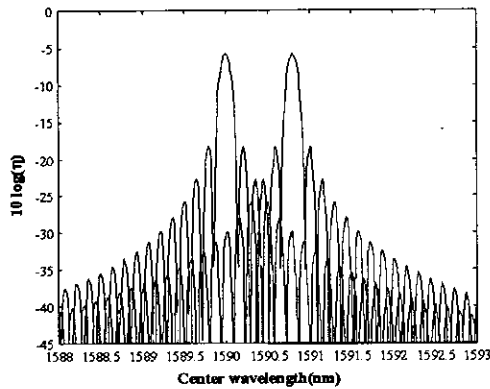
여기서 격자의 공간 주파수 $K = 2\pi / \Lambda$ 이고, $\Delta\lambda$ 은 브래그 조건에 대하여 부정합(mismatch)된 파장을 나타낸다. 그림 3은 중심 파장이 $\lambda_1 = 1590\text{nm}$, $\lambda_2 = 1590.8\text{nm}$ 인 두 채널을 고려하여 두 기록빔($\lambda_w = 514.5\text{nm}$)의 결합 길이가 각각 $d = 10\text{mm}$, $d = 4\text{mm}$ 이고, $\Delta n = 7.1 \times 10^{-5}$, $\alpha = 0^\circ$ 일 때 식 (5)로 시뮬레이션한 두 채널 역다중화기의 주파수 응답이다. 그림에서 보듯이 두 기록빔의 결합 길이가 길 경우 협대역 및 고 회절효율 특성을 가짐을 알 수 있다^[6]. 그리고 본 논문에서 사용한 광굴절 결정의 경우, 두 기록빔의 결합 길이가 4mm임을 고려하면 0.8nm의 채널 간격에서 광굴절 필터의 채널 대역폭은 0.3nm, 채널 누화 억제 특성은 35dB 이상으로 예측된다.

또한 이러한 반사형 구조에서 부피 격자로부터 선택되는 중심파장은 다음과 같이 표현된다^[7].

$$\lambda = \frac{n_{1.55} \lambda_w}{\sin(\frac{\theta_{wr} + \theta_{wl}}{2})} \quad (7)$$



(a) d=10 mm일 때



(b) d=4 mm일 때

그림 3. 결합 길이 변화에 따른 광굴절 1×2 역다중화기의 주파수 응답

여기서 λ_s 는 광굴절 필터의 중심파장, $n_{1.55}$ 는 1550nm 파장 영역에서 매질의 굴절률, λ_w 는 기록 빔의 파장, θ_{wr} 과 θ_{wl} 는 두 기록빔의 입사각이다. 식 (7)에서 광굴절 필터의 중심파장은 기록빔의 입사각을 조정함으로써 튜닝이 가능함을 알 수 있고, 이러한 설계 기법은 다중 기록을 통한 DEMUX로 적용할 경우에도 동일하게 적용된다. 그림 4는 각도 다중화 기법을 사용하기 위해 식 (7)에서 기록빔의 파장이 $\lambda_w=514.5\text{nm}$, $\theta_{wl}=45^\circ$ 일때 입사각 θ_{wr} 에 따른 중심 파장의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 현재 WDM에서 사용하고 있는 1550nm 파장 영역은 기본적으로 그림 1과 같은 반사형 구조를 취하며, 만약 기록각 θ_{wl} 을 45° 로 고정할 경우 한쪽 기록각 θ_{wr} 의 범위는 $46^\circ \sim 49^\circ$ 임을 알 수 있다.

그림 5는 각 기록빔의 입사각이 $\theta_{wr}=46.225^\circ$, $\theta_{wl}=47.683^\circ$, $\theta_{wr}=48.475^\circ$, $\theta_{wl}=45.537^\circ$, θ_{wr}

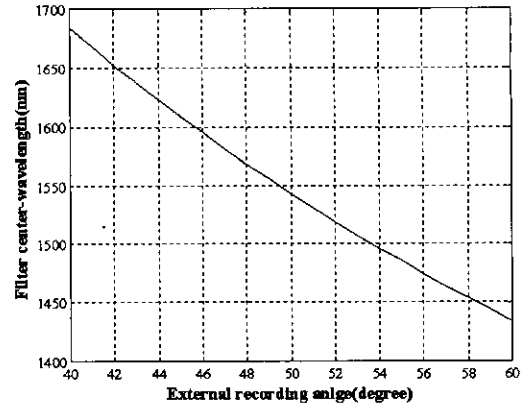


그림 4. 기록빔의 입사각 변화에 따른 필터의 중심 파장 변화

$=45.564^\circ$, $\theta_{wl}=48.504^\circ$ 일 때, 판독빔의 입사각 변화에 따른 중심 파장의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에 나타낸바와 같이 광굴절 필터의 중심 파장을 결정하는 주 요소는 기록 각도이지만, 식 (1) ~ (4) 및 그림 5에서 알 수 있듯이 기록 각도가 고정된 조건하에서 판독빔의 입사각 α 의 변화는 중심 파장을 변화시킬 뿐 만 아니라 다채널 파장 선택 소자에서 채널 간격을 결정함을 알 수 있다. 일례로, 위의 조건으로 0.8nm의 채널 간격을 갖는 3채널 역다중화기를 구성했을 때, 판독빔의 입사각 α 는 0.5° 를 만족해야 한다.

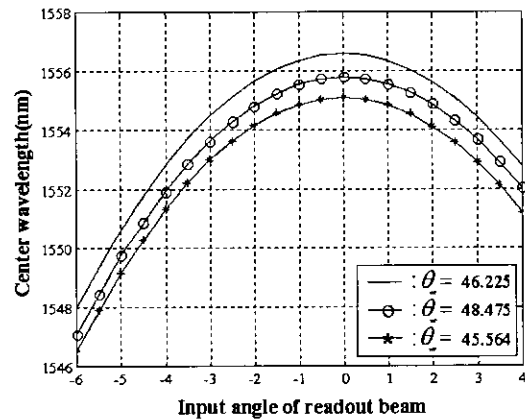


그림 5. 판독빔의 입사각에 따른 선택 파장의 변화

III. 파장 역다중화 특성 실험

3.1. 홀로그래픽 부피 격자의 다중 기록

앞절에서 서술한 광굴절 역다중화기를 구현 할 경우 결정 내의 동일한 위치에 홀로그래픽 부피 격

자를 중첩하여 기록해야 하는데, 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 문제는 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) 기법⁸⁾이 적용된다. 이러한 노출 시간 계획 기법을 적용할 경우 일반적으로 이용된 매질의 격자 기록 상수(writing constant, τ_w)와 삭제 상수(erasing constant, τ_e)를 측정해야 한다.

그림 6은 신호빔이 18.9 mW/cm², 기준빔이 20.5 mW/cm²인 514.5nm 파장 영역에서 측정된 격자 기록 및 삭제 추이 곡선을 나타낸 것이고, 이용된 매질은 Fe의 농도(concentration)가 $4.67 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$ (0.02 wt.% Fe)인 LiNbO₃ 결정으로 측정된 굴절률 변조의 포화값 $\Delta n_s = 1.4 \times 10^{-4}$ 이다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 본 논문에서 사용된 광굴절 결정의 기록 상수는 60초, 삭제 상수는 180초이다. 그리고 열정착 기술을 사용하지 않을 경우, 본 논문에서 사용한 광굴절 결정의 예상되는 채널 수는 결정의 $M/\# (= \frac{A_0}{\tau_r} \tau_e)$ 및 각 채널에서 요구되는 회절 효율 $\eta (= [\frac{M/\#}{M}]^2)$ 로부터 예측할 수 있다⁹⁾. 여기서, A_0 는 홀로그래픽 격자의 포화 진폭이고, M 은 결정 내에 기록되는 홀로그램의 갯수이다. 만약 각 채널에서 요구하는 회절효율이 10%라고 가정하면, 본 논문에 이용된 결정의 $M/\# = 3$ 이므로 1×10 DEMUX 구성이 가능함을 예측할 수 있다.

그리고 본 논문에서는 부피 격자를 다중 기록시키기 위해 J. Hong 등에 의해 수정된 노출 시간 계획을 적용하였고, 기록상수와 삭제상수가 같지 않는 경우 m번째 홀로그램의 기록시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$t_m = -\tau_r \ln \left[1 - \exp \left(-\frac{t_{m+1}}{\tau_e} \right) + \exp \left[t_{m+1} \left(\frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_r} \right) \right] \right] \quad (8)$$

여기서 τ_e 는 삭제 상수, τ_r 은 기록 상수, m은 노출 차수, t_m 은 m번째 기록하는 부피 격자의 노

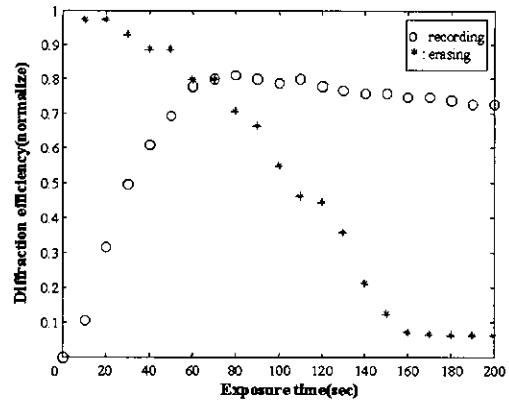


그림 6. 기록 상수 및 삭제 상수 측정 결과

출 시간이다.

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 있으며, 10개 홀로그램 기록에 의한 다채널 역다중화 구성 시 예측되는 회절 효율은 그림 7에 나타낸 것처럼 약 14%의 채널 효율을 예측할 수 있다. 그러나 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 (8)에 나타낸 노출 시간 계획에 기초해 순차적으로 홀로그램을 기록한 후 각 홀로그램에 의한 회절 효율을 측정해 상대적으로 낮은 효율을 갖는 격자에 대해 재기록을 수행하는 recycling 기법을 적용하였다. 이러한 방식의 경우 컴퓨터에 의해 제어되는 고분해도를 갖는 정밀 회전 스테이지가 필요하다.

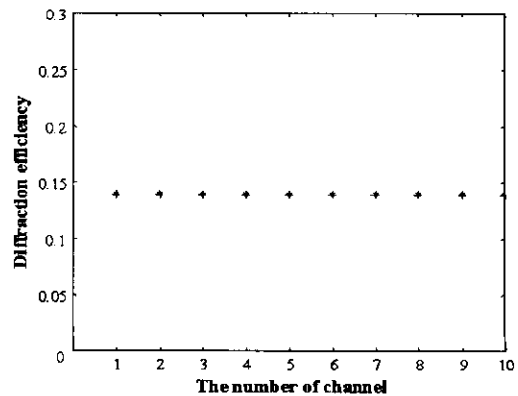


그림 7. 10개 홀로그램을 각다중화 시켰을 때 각 채널의 회절효율

그리고 이렇게 기록된 광굴절 부피 격자에 판독 빔을 조사하면 부피 격자가 부분적으로 삭제되는 문제점을 갖고 있는데, 이는 열적 정착(thermal fixing) 기술을 이용하여 해결할 수 있다. 일반적으로 열적 정착 기술에는 두 가지 방법이 있다. 먼저 상온에서 홀로그래픽 부피 격자를 기록한 다음 100 ~ 200°C 의 온도에서 일정한 시간 동안 가열한 후 서서히 냉각시키는 방법(low-high thermal fixing)으로 가장 보편적으로 사용되는 방식이다. 두 번째 방법은 온도를 높인 상태에서 부피 격자를 기록하는 방식(high-low thermal fixing)인데, 이 경우 주기적인 전하 분포는 움직이는 양자에 의해 계속해서 보상되므로 공간 전하장은 기록시 비교적 적은 크기로 유지되지만 반면에 작은 잡음성분을 갖는 강한 격자를 기록시킬 수 있어 높은 회절 효율을 얻을 수 있다고 보고된 바 있다^[10]. 본 논문에서는 홀로그래픽 채널을 다중 기록한 후 각 채널의 특성 분석은 편의상 열적 정착 기법을 사용하지 않고 관찰하였다.

3.2 파장 역다중화 특성 실험 및 결과 분석

본 논문에서는 앞 장에서 제시한 홀로그래픽 부피 격자의 파장 역다중화 특성을 실험적으로 입증하기 위해 편의상 3 채널 DEMUX를 설계하고 분석하였다. 결정 내에 기록될 광굴절 필터의 선택하고자하는 중심파장은 식 (3)으로부터 계산된다. 또한 두 기록빔의 입사각은 앞의 2절에서 예측한 것처럼 $\theta_{wr}=45^\circ$ 로 고정시키고, 3 채널을 중첩 기록하기 위해 θ_{wi} 각을 변화시켜 설계하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 3채널 DEMUX 설계 결과

Channel number	channel 1	channel 2	channel 3
Center wavelength	1591.35nm	1590.53nm	1588.91nm
θ_{wr}	46.26°	46.32°	46.44°
θ_{wi}	45°	45°	45°
Channel space	0.8nm (ch 1 - ch 2 사이)		1.6nm (ch 2 - ch 3 사이)

그림 8은 광굴절 파장 DEMUX를 구성하기 위한 실험 구성도이다. 기록광원으로는 514.5nm 파장의 아르곤 레이저를 사용하였고, 기록빔은 공간 필터(S.F: spatial filter)와 렌즈를 통해 $3 \times 2\text{mm}^2$ 의 폭

을 갖고 결정에 입사되도록 조정하였다. 빔 분할기(B/S: beam splitter) 및 미러(Mirror)에 의해 신호빔(S)과 기준빔(R)으로 각각 나뉘어지고, 신호빔은 18.9mW/cm^2 , 기준빔은 20.5mW/cm^2 의 광세기를 갖는다. 광굴절 결정 내에 다중 홀로그래프를 기록하기 위해 각도 다중화 기법을 사용하였다. Newport사의 495cc 회전 스테이지(rotation stage)를 사용하여 표 1에 나타난 각도로 신호빔의 입사각을 조정하여, 결정의 c축에 대해 각 부피 격자의 파수 벡터 방향을 변화시키면서 기록하였다. 광굴절 파장 역다중화의 주파수 응답을 조사하기 위한 판독빔은 1520nm~1600nm 범위의 파장 영역을 갖는 가변 광원(tunable source)을 0.01nm 간격으로 변화시켜 가면서 회절빔의 세기를 측정하였다. 앞의 2절에서 분석하였듯이 판독빔의 입사각에 따라 채널 간격이 변화하므로 식 (1)~(4)을 이용하여 계산된 $\alpha=0.57^\circ$ 로 판독빔을 입사시키기 위해서 회전 스테이지를 사용하여 결정을 회전시켜 판독빔이 α 각으로 입사하도록 하였다. 빔의 파장은 Anritsu사 MS9710B 모델의 광 주파수 분석기(optical spectrum analyzer)를 통해 관찰하였다.

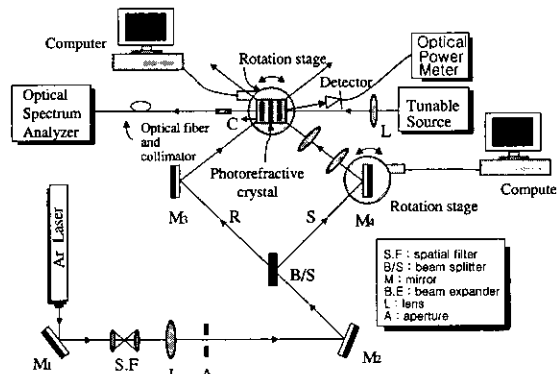


그림 8. 파장 역다중화 특성을 위한 실험 구성도

측정된 파장 역다중화 특성은 그림 9에 나타내었다. 실험 결과, 각 채널의 중심파장은 채널 1이 1591.21nm, 채널 2는 1590.49nm, 채널 3은 1588.85nm로 설계된 이론값과 거의 일치하였고, 또한 채널 간격은 0.72nm, 1.64nm로 측정되었다. 각각의 채널 대역폭은 0.34nm, 0.45nm, 0.43nm로 앞의 2절에서 예측한 값과 약간의 오차가 발생하였는데, 오차는 파장 역다중화 특성 측정시 발생한 것으로 생각된다. 그리고 본 방식의 경우 채널간의 채널 누화 억제 특성은 채널 간격이 0.8nm 일 때

34.95dB로 측정되었으며, 현재 상용화되고 있는 AWG의 30dB, 간섭 필터의 25dB에 비해 더 좋은 결과를 보였다. 각 채널의 회절효율은 $0.125 \pm 0.005\%$ 로 비교적 낮은 값을 갖지만, 매질에 도핑된 불순물의 농도를 조절하거나 기록 조건 등의 개선을 통해 ~80% 이상 반사율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 보고된 바에 의하면 0.5 wt.%의 Fe가 도핑된 LiNbO₃ 결정의 경우 40 채널의 역다중화기 구성이 가능 함이 발표된바 있다^[11]. 또한 각 채널의 반사율은 결정 표면에 반반사(anti-reflection) 코팅 과정을 거쳐 손실을 줄이고, 노출 시간 계획 적용시 더 정교한 recycling 기법을 적용하거나 온도를 높은 상태에서 결정 내에 부피 격자를 기록시키는 열정착 기술을 사용하면 더 증가시킬 수 있어 결정 내의 동일한 위치에 더 많은 부피 격자를 중첩하여 기록할 수 있을 것으로 생각된다.

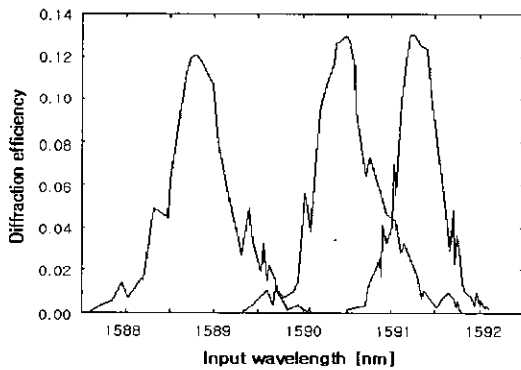


그림 9. 파장 역다중화 특성 실험 결과

IV. 결론

광굴절 Fe-LiNbO₃ 결정 내에서 코히런트한 두 기록빔의 간섭에 의해 형성된 홀로그래픽 부피 격자의 파장 선택성과 다중 기록 특성을 이용한 파장 역다중화 기법을 제안하고, 광학적으로 구현하였다. 본 논문에서 제안한 광굴절 결정을 이용한 파장 역다중화 방법은 다채널화가 용이하고, 다채널이 결정의 한곳에 위치하므로 다채널에 적용시 잡음 성분 및 광손실의 누적이 없을 뿐만 아니라 각 채널에서 선택하는 중심 파장 대역을 자유롭게 설정할 수 있는 이점을 갖는다. 그리고 결정 내에 다수의 채널을 기록하기 위하여 각도 다중화 기법을 사용하였고, 기록된 채널들이 균일한 회절효율을 갖도록 하기 위하여 광메모리 시스템에 사용하고 있는 노출 시

간 계획을 적용하였다.

설계된 3개의 채널은 중심파장이 각각 1591.35nm, 1590.53nm, 1588.91nm이고 각 채널 간격은 0.8nm, 0.16nm로 하였다. 실험 결과, 각 채널의 중심파장은 1591.21nm, 1590.49nm, 1588.85nm이고 채널 간격은 0.72nm, 1.64nm로 설계된 이론값과 거의 일치하였다. 또한 각 채널의 3dB 대역폭은 0.34nm, 0.45nm, 0.43nm로 이론값과는 약간의 오차가 발생하였는데, 이론값과의 미세한 오차는 파장 역다중화 특성 측정시 발생한 것으로 생각된다. 또한 채널 누화 억제 특성은 각각 34.95dB, 43dB로 측정되었고, 각 채널은 $0.125 \pm 0.005\%$ 의 반사 특성을 보였다. 실험 결과 광굴절 결정의 도핑 농도를 조정하여 결정의 M/# 값이 높은 시료를 사용하고, 노출 시간 계획 및 recycling 기법, high-low 열적 정착 기법 등을 적용하면 최대 40 채널 이상의 역다중화기 구성이 가능 할 것으로 예측된다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] D. Herve, M. Chauvet, J. E. Viallet, and M. J. Chawki, "First tunable narrowband 1.55 μ 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.
- [5] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 9, pp. 2909-2947, Nov. 1969.
- [6] 이권연, 안준원, 김남, "광굴절 결정에서 파장선택 필터의 특성분석 및 다중기록을 통한 역다중화기 구현", *대한전자공학회논문지-D*, 제36권

