

광통신용 파장 대역에서 동작하는 체적 홀로그래픽 필터

정성용\*, 양병춘, 이병호  
서울대학교 전기공학부

Volume holographic filter operating at 1.55μm region

Sung-Yong Jung\*, Byungchoon Yang, and Byoungho Lee  
School of Electrical Engineering, Seoul National University.

**Abstract** - We demonstrate and characterize a volume holographic filter operating at 1.55μm region, which corresponds to the wavelength region of optical communication system. By changing recording times or the angle between writing beams, the reflectivity, the filtered wavelength, and the bandwidth of this filter can be controlled. A center wavelength of 1532.8 nm, reflectivity of 10.7% and a bandwidth with full width at half-maximum of 4.0nm are measured in our experiment.

1. 서 론

최근 광통신 기술의 발달과 더불어 파장 선택형 필터의 역할은 더욱 중요해 졌으며 활발히 연구되고 있다. 특히 좁은 선폭의 파장 선택형 필터는 WDM 시스템의 복조부(receiver) 앞단에서 일정한 간격의 채널들을 분리해 내는 역다중화나 스위칭을 위한 가장 필수적인 소자이다. 이러한 파장 선택형 필터는 여러 방법으로 구현할 수 있는데, 예를 들어 음향광학 필터(acousto optic filter)나 패브리-페로 필터(Fabry-Perot filter), 광섬유 브래그 격자형 필터, 체적 홀로그래픽 필터 등과 같은 방법이다. 이 중 음향광학 필터나 패브리-페로 필터는 필터의 동작이나 가변 방식이 전기적 또는 기계적이므로 전광 방식의 시스템에서는 부적합하고, 높은 삽입 손실, 넓은 통과 대역폭 등의 문제점이 있다. 광섬유 브래그 격자형 필터는 광섬유로의 집적이 쉽고 삽입 손실이 거의 없어 최근 각광받고 있으나, 다파장을 필터링(filtering)하기 위해서는 여러개의 위상 마스크가 필요해 비용이 증가한다. 이에 비해 광굴절 결정에서 기록되는 체적 홀로그래픽의 높은 파장 선택 특성을 이용하는 체적 홀로그래픽 필터는 제작 방법이 간단하고 전광방식이며 파장 가변 범위가 넓고 설계에 따라 높은 회절 효율과 좁은 대역폭을 갖는 등의 여러가지 장점이 있다. 한 예로 98%의 반사율과 0.18nm의 FWHM(full width at half maximum)을 갖는 체적 홀로그래픽 필터의 구현이 보고된 바 있다.[1] 본 논문에서는 광통신용 파장 대역 중 특정 파장을 선택할 수 있도록 체적 홀로그래픽 필터를 설계, 제작한 후 주요 특성을 계산 결과와 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1 체적 홀로그래픽 필터의 원리

체적 홀로그래픽 필터는 광굴절 효과를 이온적인 바탕으로 한다. 광굴절 효과란 광굴절 물질 내에서 교차하는 코히어런트(coherent)한 광원의 간섭 패턴에 의해 굴절률의 변화가 유도되는 현상이다. 일반적인 구조에서 기록빔의 간섭 패턴에 따라 기록되는 격자의 주기는 기록빔의 파장  $\lambda_w$ 와 공기 중에서의 입사 반각  $\theta_w$ , 매질의 굴절률  $n$ 에 의해 결정되고, 식 (1)과 같다.

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2n \sin(\theta_w)}$$

(1)

따라서 재생빔의 입사 각도를 고정시키면 브래그(Bragg) 조건에 맞는 파장만 회절 격자에 의해 선택적으로 회절되고 나머지 파장 성분들은 그냥 투과시키는 파장 선택형 필터가 된다. 그림 1과 같은 구조에서 필터링되는 파장  $\lambda_f$ 는 식 (2)와 같다.

$$\lambda_f = \lambda_w \left( \frac{\sin(\theta_{ri})}{\sin(\theta_{wi})} \right)$$

(2)

여기서  $\lambda_w$ 는 기록빔의 파장이고,  $\theta_{wi}$ 와  $\theta_{ri}$ 는 각각 기록빔과 재생빔의 매질 내에서의 입사 반각이다. 위 식으로부터  $\lambda_w$ 와  $\theta_{wi}$ 가 고정되어 있다면 기록빔들 사이의 입사 각도를 조절해 필터링 하고자 하는 선택 파장을 임의로 설계할 수 있다. 따라서 이러한 원리에 의해 홀로그래픽 필터를 파장 가변형 필터로 응용할 수 있다. 또한 동일 위치에 각다중화 방법으로 여러개의 격자를 기록하면 다수의 파장을 선택할 수 있어 WDM 시스템에서 역다중화용 소자로 이용할 수 있다.

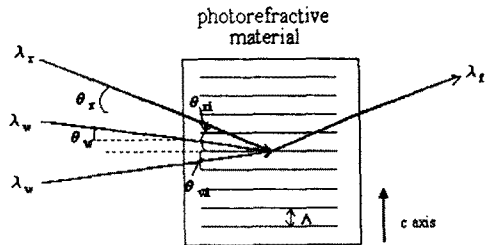


그림 1. 체적 홀로그래픽 필터의 기본 구조

2.2 체적 홀로그래픽 필터의 설계 및 제작

2.2.1 실험의 구성

본 실험의 구성도는 그림 2와 같다. 광굴절 물질로는 Fe이온이 0.03% 도핑된  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  크기의 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 사용하였으며, 이 매질은 적외선 영역에서 낮은 광굴절 효과를 나타내므로 가시광 영역인 514.5nm의 Ar-ion 레이저로 체적 홀로그래픽을 기록하였다. 일반적으로 반사형(reflection) 구조에서 파장 선택 특성이 가장 좋지만 무반사 코팅(antireflection coating)이 안된 결정으로는 실험에 어려움이 있어 투과형(transmission) 구조를 사용하였다. 격자의 파동 벡터(wave vector) K는 c축과 평행이 되도록 하였다.

재생빔으로 사용된 광원은 두 종류를 사용해서 그 결과를 비교하였다. 먼저 1520-1570nm 사이의 파장 대역을 갖는 광대역 광원인 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)를 재생빔의 광원으로 사용하여 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)로 스펙트럼의 분포를 측정하였다. 이때 EDFA를 사용할 경우 발진대역폭 중 세기가 일정하지 않은 영역이 있기 때문에 정확한 회절 효율의 측정이 어렵다. 따라서 광출력이 일정한 레이저 다이오드로 1550nm 근처에서 파장을 변화시켜 스캐닝(scanning) 하는 방식으로 광 세기 측정기(optical power meter)를 사용해 회절 효율을 측정하였다. 사용된 레이저 다이오드의 세기는 1.05mW/cm<sup>2</sup>이다.

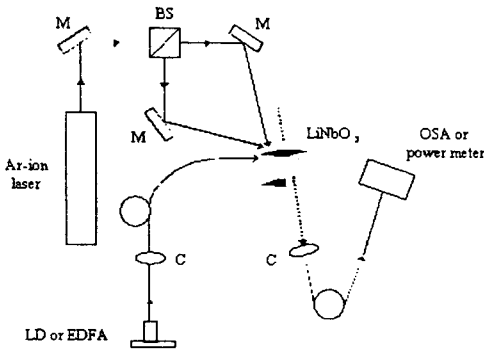


그림 2. 필터 제작에 사용된 실험 set up  
BS: beam splitter, C: collimator, M: mir

광섬유로부터 나오는 재생빔은 collimating 렌즈를 통과시켜 퍼지지 않도록 하였다. 기록빔에 사용된 Ar-ion 레이저의 편광과 빔의 직경은 각각 수직편광(extraordinary polarization), 약 1.0mm이고 재생빔의 편광과 빔의 직경은 각각 임의편광(random polarization), 약 2.5mm이다.

### 2.2.2 필터의 설계 요건

투과형 구조에서 체적 홀로그래픽 필터의 이론적인 3dB 통과 대역폭은 식 (3)과 같이 계산된다.[2]

$$\Delta \lambda_f = \frac{\lambda_f^2 \cos(\theta_n)}{2dn \sin^2(\theta_n)} \quad (3)$$

여기서  $\lambda_f$ 는 선택하려는 파장,  $d$ 는 격자의 유효 작용 길이,  $\theta_n$ 는 매질 내에서의 재생빔의 입사 반각이다. 기록빔과 재생빔의 직경 및 기록빔 사이의 각으로부터 유도된 격자의 유효 작용 길이는 2.69mm이다 따라서 식 (3)을 이용해 필터의 대역폭을 예상할 수 있다. 제작된 파장 선택용 필터는 표 1과 같은 특성을 갖도록 설계되었다.

표 1. 제작된 필터의 설계 변수

기록빔의 외부 입사 반각 $\theta_w$	10°
기록빔의 내부 입사 반각 $\theta_{wn}$	4.269°
재생빔의 외부 입사 반각 $\theta_r$	31.158°
재생빔의 내부 입사 반각 $\theta_n$	12.816°
예상되는 선택파장 $\lambda_f$	1533nm
예상되는 통과대역폭 $\Delta \lambda_f$	3.706nm

식 (3)을 살펴보면 필터의 대역폭을 결정하는 요소는 매질 내에서의 재생빔의 입사반각  $\theta_n$ 과 선택 파장  $\lambda_f$ , 그리고 격자의 유효 작용 길이  $d$ 이다. 이때  $d$ 가 고정되어 있다면,  $\theta_n$ 가 클수록 대역폭이 좁아지므로 재생빔이 격자의 파동벡터  $K$ 와 평행하게 입사할 때인 반사형 구조에 가까워질수록 필터의 파장 선택 특성이 좋아짐을 알 수 있다. 만일  $d$ 와  $\theta_n$ 가 고정되어 있고 기록빔의 입사각이 증가한다면 브래그(Bragg) 조건을 만족하는 선택 파장이 감소하므로 대역폭은 좁아지고 회절 효율은 거의 일정하다. 또한  $\lambda_f$ 와  $\theta_n$ 가 고정되어 있다면 대역폭은  $d$ 가 증가할수록 좁아지고 회절효율은 증가한다.  $\theta_n$ 는 12.81° 일 때 특정  $d$  값에 대해 공기 중에서의 입사 반각에 따른 대역폭의 변화를 그림 3에 나타내었다.

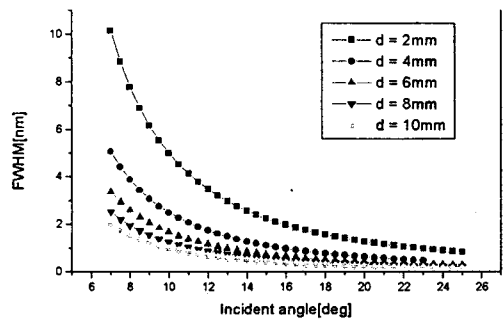


그림 3. 입사 반각에 따른 통과 대역폭의 변화

### 2.2.3 실험 결과 및 비교

회절된 빔의 스펙트럼은 파장에 따른 반사율을 알면 계산할 수 있다. 광굴절 결정 내에서 적외선(IR) 영역의 흡수는 매우 적으므로 이를 무시하면 투과형(transmission) 구조에서의 반사율은 식 (4)와 같다.[3]

$$R = \left| \frac{x \sinh(-Sd)}{(\Delta\beta/2) \sinh(Sd) + iS \cosh(Sd)} \right|^2 \quad (4a)$$

$$x = \frac{\pi n_1}{\lambda_w \cos(\theta_{wn})} \quad (4b)$$

$$S = \left[ x^2 - \left( \frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4c)$$

$$\Delta\beta = 4\pi n \left( \frac{\sin(\theta_n)}{\lambda} - \frac{\sin(\theta_{wn})}{\lambda_w} \right) \quad (4d)$$

여기서  $d$ 는 격자의 유효 작용 길이이고,  $\lambda$ 는 재생빔의 파장,  $n$ 은 매질의 굴절율,  $n_1$ 은 굴절율 변화의 크기를 나타낸다. 이때  $n_1$ 을 조절할 수 있다면 대역폭을 일정하게 유지하면서 최대 반사율의 크기를 바꿀 수 있다. 따라서 격자 기록시 노출 시간에 따라 필터의 투과율을 조절할 수 있다. 재생빔으로 EDFA와 레이저 다이오드를 각각 사용했을 때의 실험 결과와 식 (4)를 사용해 계산된 필터의 출력 결과를 그림 4에 함께 나타내었다. 레이저 다이오드를 사용했을 때 회절된 빔의 세기를

측정해서 얻은 선택 파장에서의 최대 회절 효율은 10.7% 이다. 여기서 굴절율 변화의 크기  $n_1$ 의 값을 측정하기 어려우므로 실험 결과와 동일한 회절 효율을 갖도록 추측해서 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 제작된 필터의 선택파장은 1532.8nm, 대역폭은 4.0nm로 이론값과 거의 일치한다. 이론값과 약간의 차이는 기록빔 및 재생빔의 입사각의 미세한 오차 때문이다.

[참 고 문 헌]

[1] V. Leyva, G. A. Rakuljic, and B. O'Conner, "Narrow bandwidth volume holographic optical filter operating at the Kr transition at 1547.82nm", *Appl. Phys. Lett.*, 65, 1079-1081, 1994.  
 [2] R. T. B. James, C. Wah, K. Lizuka, and H. Shimotahira, "Optically tunable optical filter", *Appl. Opt.*, 34, 8230-8235, 1995.  
 [3] A. Yariv and P. Yeh, *Optical waves in crystals*, Chap. 6, 197, John Wiley & Sons, New York, USA, 1984.

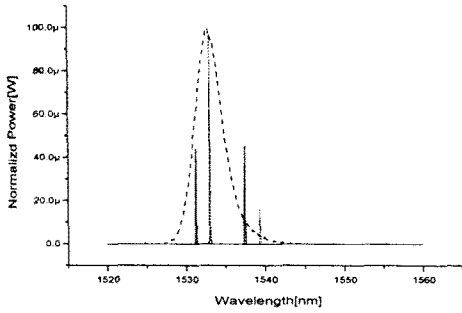


그림 5(a). 제작된 필터의 주파수 특성

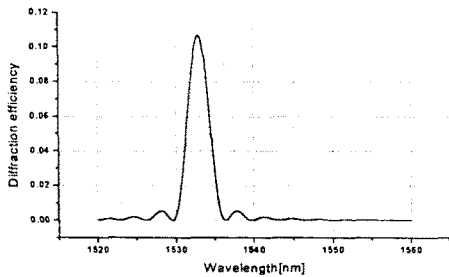


그림 5(b). 계산된 필터의 주파수 특성

3. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 파장의 광원을 기록빔과 재생빔으로 사용하여 광통신용 파장대역에서 동작하는 파장 선택용 홀로그래픽 필터의 특성을 살펴보고 이를 구현하였다. 제작된 필터는 약 10%의 회절 효율과 4nm의 3dB 대역폭을 가지며, 그 값들은 이론적인 결과와 거의 일치하였다. 빔의 크기를 조절해 격자의 유효 작용 길이를 늘리고 광굴절 결정 표면에 무반사 코팅을 한다 면 더욱 높은 회절 효율과 좁은 대역폭을 가질 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이 필터는 격자의 기록 시간이나 유효 작용 길이, 기록빔의 입사각 등을 조절해 투과율 및 선택 파장, 대역폭을 임의로 설계할 수 있으므로 파장 가변형 광필터로 쓸 수 있다. 그리고 보다 좁은 대역폭을 갖도록 제작하면 WDM 시스템에서 역다중화기로 사용할 수 있다.