

論文99-36D-12-6

광굴절 가변 필터에서 공간광학변조기를 이용한 실시간 튜닝 구조의 기하학적 해석 및 구현

(Geometrical Analysis and Implementation of the Real-Time Tuning Structure Using Spatial Light Modulator in Photorefractive Tunable Filter)

安俊遠*, 金成球*, 金男*

(Jun Won An, Seong Goo Kim, and Nam Kim)

요 약

Fe가 0.015Wt.% 도핑된 LiNbO₃ 결정을 이용한 광굴절 필터에서 중심파장을 튜닝하기 위한 새로운 방식을 제안하고, 기하학적 방법을 이용한 필터 통과대역 특성 해석을 통해 새로운 개념의 파장 선택성 이론을 제시하였다. 본 구조에서 중심파장의 튜닝은 실시간적인 수신빔 입사각 제어를 통해 얻을 수 있고, 실시간 광학 소자인 공간광학 변조기를 통해 이루어진다. 따라서, 튜닝 동작을 수행하는데 소요되는 시간은 공간광학 변조기의 응답시간에 의해 결정되며, 결과적으로 고속 튜닝이 가능해진다. 제시된 구조에 적용되는 광 필터는 열에 의해 고정된 격자를 사용하므로 선택되는 모든 파장에 대해 안정적인 회절 특성을 얻을 수 있다. 가변 필터의 설계는 4nm의 통과대역과 10nm 간격을 갖는 세채널에서 튜닝되도록 구성되었으며, 실험결과 4.5nm, 4.25nm, 4nm의 통과대역과 1530.5nm, 1540.5nm, 1549.5nm의 중심파장을 갖는 필터 특성을 얻었다.

Abstract

We propose a new method for tuning of center wavelength in photorefractive filter using LiNbO₃ crystal doped with 0.015Wt.% Fe. Through the filter bandwidth property analysis using the geometrical method, a new wavelength selectivity theory was presented. In this scheme, the tuning of the center wavelength can be achieved by the real-time incident angle control of the received beam, which was gotten by the spatial light modulator. So, tuning time depend on the response time of the SLM and results in the high speed tuning. Because the use of thermally fixed grating in our filter, it has uniform diffraction property to the all filtering wavelength. Designed tunable filter has 4nm bandwidth and composed of the three channel with 10nm space. From the optical experiment, we get the 4.5nm, 4.25nm, 4nm bandwidth and 1530.5nm, 1540.5nm, 1549.5nm center wavelength, respectively.

I. 서론

* 正會員, 忠北大學校 電氣電子工學部

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

接受日字: 1999年6月10日, 수정완료일: 1999年10月22日

광굴절(PR: photorefractive) 매질 내의 부피형 홀로
그래픽 회절격자는 제작 및 소거의 용이성, 높은 회절
효율, 비선형성, 광대역에 대한 감광도 등과 같은 장점

때문에 고밀도 광정보 저장이나 광통신 소자로서 적용되고 있다¹¹. 특히, 광통신 기술의 발달과 더불어 파장 선택 필터의 역할이 더욱 부각되면서 광굴절 체적 홀로그래프를 파장 선택 소자로 적용하기 위한 연구가 이루어지고 있다¹⁵⁻¹⁰¹. 파장 선택 필터는 다양한 방식으로 구현할 수 있는데, 간섭계형 필터나 음향광학 필터(acousto optic filter), 패브리-페로 필터(Fabry-Perot filter), 광섬유 브래그 격자형 필터(fiber Bragg grating filter), 체적 홀로그래픽 필터 등과 같은 방법이 있다. 이 중 간섭계형 필터는 직렬로 연결해 사용할 경우 잡음의 누적으로 인해 뒷단에서 필터링 되는 신호의 왜곡이 심각하게 된다. 또한, 음향광학 필터나 패브리-페로 필터는 필터의 동작이나 가변 방식이 전기적 또는 기계적이며, 높은 삽입손실, 넓은 통과 대역폭 등과 같은 문제점이 있다. 광섬유 브래그 격자형 필터는 광섬유로의 집적이 쉽고 삽입 손실이 거의 없어 최근 각광받고 있으나, 다수의 파장을 필터링(filtering)하기 위해서는 여러개의 마스크가 필요해 비용이 증가한다. 이에 비해 PR 부피형 홀로그래프를 이용하는 경우 제작 방법이 간단하고, 소형화, 높은 S/N비, 재구성성, 전광학적 구조, 넓은 가변범위, 협대역 특성 등과 같은 장점이 있다. 이러한 PR 파장선택필터에서의 튜닝 기법은 두 기록빔의 입사각을 원하는 중심파장의 브래그 조건에 맞게 기록빔의 입사각을 제어하는 방식¹⁵과 결정의 온도 변화에 기인한 굴절률 변화에 의한 방식¹⁶이 보고되었다. 하지만, 전자의 경우 튜닝 동작을 수행하는데 소요되는 시간이 새로운 격자를 기록하는 시간과 미리 제어 시간의 합으로 결정되므로 결과적인 튜닝시간이 느리다는 문제점을 가지고 있으며, 후자의 경우 미세한 온도 제어를 위한 장치가 필요하다.

본 논문에서는 Fe가 0.015Wt.% 도핑된 LiNbO₃ 결정에 형성된 홀로그래픽 부피격자에서 실시간 광학소자인 공간광학변조기(SLM: spatial light modulator)를 이용해 고속의 튜닝 동작이 가능한 새로운 구조의 PR 가변 파장선택필터를 제안하고, 광학적으로 구현하였다. 본 구조는 SLM의 제어를 통해 중심파장이 튜닝되므로 고속 가변이 가능하며, 열적으로 고정된 격자를 사용하기 때문에 모든 파장에 대해 안정된 회절특성을 얻을 수 있다. 수신빔은 일정한 폭을 갖고 집속되어 입사되므로 빔 폭에 비례하는 각도 범위를 갖고 광필터에 입사되고, 입사되는 범위를 만족하는 모든 파장이 브래그 매칭되어 필터의 통과대역이 변화된다. 이때 광

필터의 통과대역 특성을 기하학적 방법을 이용해 분석하고, 새로운 파장 선택성 이론을 제시하였다. 설계된 필터는 1530nm, 1540nm, 1550nm의 중심파장과 4nm의 통과대역을 갖도록 구성되었다.

II. PR 부피격자의 파장선택성

일반적으로 광굴절 결정 내에서 코히어런트한 두 빔이 결합할 경우 선형적인 굴절률 변조가 유도되어 홀로그래프와 동일한 굴절률 부피격자가 형성된다. 이때, 1차 브래그 회절은 기록빔의 파장을 λ_w , 브래그 각을 θ_B , 매질의 굴절률을 n , 격자간격을 Λ 라고 하면 다음과 같이 표현된다¹⁵.

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda_w}{2n\Lambda} \quad (1)$$

간격이 Λ 인 부피격자는 특정한 입사각에서 브래그 조건(Bragg condition)을 만족하는 임의의 파장만을 회절시키고, 나머지 파장의 빔은 투과시키는 특성에 의해 광 필터로의 적용이 가능하다. 만약, 기록 광원의 파장이 λ_w , 두 빔의 외부 입사 반각(external half-crossing angle)이 θ_w 인 조건으로 기록된 회절격자에 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 의 파장으로 다중화된 빔이 λ_2 에 대한 브래그 각 θ_R 로 입사된다고 가정하면, λ_2 만 회절되고 이외의 파장은 투과된다. 이때, 필터링 되는 빔에 대한 브래그 조건은 결정 내부에서 두 기록빔의 교차 반각(internal half-crossing angle: θ_{wi}), 기록빔의 파장 (λ_w) 및 선택되는 빔의 파장 (λ_m)에 의해 결정되며, 식 (2)와 같다¹⁵.

$$\theta_{pm} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_{pm}}{\lambda_w} \cdot \sin \theta_{wi} \right) \quad (2)$$

이러한 투과형 광굴절 홀로그래프에서 손실이 매우 작은 경우 ($a=0$) 회절효율은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 이때, 기울기 요소 c_R 과 c_S 는 각각 $\cos \theta_R$, $-\cos(\theta_R - 2\phi)$ 로 표현되며, 결정의 축방향에 격자의 파수벡터 방향이 평행한 경우 $\phi=90^\circ$ 이다. 식 (4)에서 n_1 은 공간적 굴절률 변조의 진폭을 나타내며, 식 (5)에서 $\Delta\theta$ 는 입사각도의 불일치 성분, $\Delta\lambda$ 는 입사빔의 파장 불일치 성분, K 는 $2\pi/\Lambda$ 로 표현할 수 있으며 격자의 파수벡터이다¹¹¹.

$$\eta = \sin^2(v^2 + \epsilon^2)^{1/2} / (1 + \epsilon^2 / v^2) \quad (3)$$

$$v = [\pi \cdot n_1 \cdot d] / [\lambda \cdot (c_R \cdot c_S)^{1/2}] \quad (4)$$

$$\epsilon = [\theta \cdot d] / [2 \cdot c_S] \quad (5)$$

$$\theta = \Delta\theta \cdot K \cdot \sin(\phi - \theta_R) - \Delta\lambda \cdot K^2 / 4 \cdot \pi \cdot n \quad (6)$$

그림 1은 결정의 축방향에 대해 수직으로 회절격자가 기록되고, 평행광인 판독빔이 입사된다고 가정했을 때, 식 (3)~(6)으로 부터 PR 부피격자의 파장 선택성 $\delta\lambda$ 를 계산한 것이다. 이때, 각도 불일치 성분 $\Delta\theta=0$, 기록빔의 파장 514.5nm, 상호작용길이 10mm로 가정하였으며, 기록빔의 외부 교차 반각(external half-crossing angle)이 8°, 10°, 15°인 경우에 대해 fitting 하였다. 그림으로부터, PR 파장선택필터의 파장선택성은 일반적으로 예측할 수 있는 바와 같이 기록빔의 입사각이 넓을수록 첨예한 특성을 보이며, 입사각이 좁을수록 넓은 파장 선택 특성을 볼 수 있다.

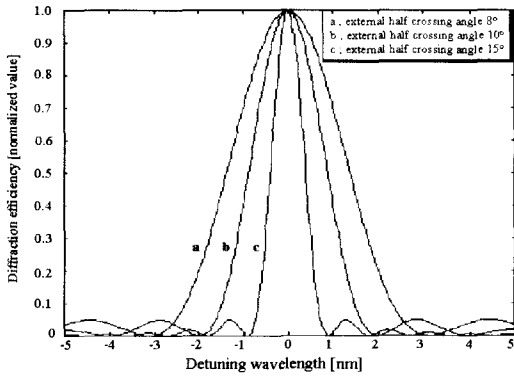


그림 1. PR 격자의 파장 선택성
Fig. 1. Wavelength selectivity of the PR grating.

그림 1과 같은 PR 회절격자의 통과 대역은 식 (7)과 같이 간략화 할 수 있는데, 필터링 되는 빔의 파장 (λ_m) 및 결정 내부 입사각 (θ_{pin}), 매질의 굴절률 (n), 기록빔의 상호작용길이(interaction length; d)에 의해 결정되고, 식 (7)과 같이 표현된다^[5].

$$BW = \frac{\lambda_m^2 \cdot \cos(\theta_{pin})}{2 \cdot n \cdot d \cdot \sin^2(\theta_{pin})} \quad (7)$$

그림 2는 식 (7)을 이용해 기록빔의 파장이 514.5nm

이고 기록빔의 내부 교차 반각이 1°, 4°, 7°, 10° 상호 작용 길이가 10mm일 때, 필터링 빔의 파장 변화에 따른 필터 통과대역을 계산한 결과이다. 그림에서 보면, 기록빔의 입사각이 넓을수록 필터 통과대역이 좁아지며, 필터링하고자 하는 파장에 대해서는 거의 영향이 없음을 볼 수 있다. 즉, PR 파장선택필터의 통과대역은 기록빔의 입사각 제어를 통해 원하는 특성을 갖도록 조절할 수 있을 것으로 예측된다.

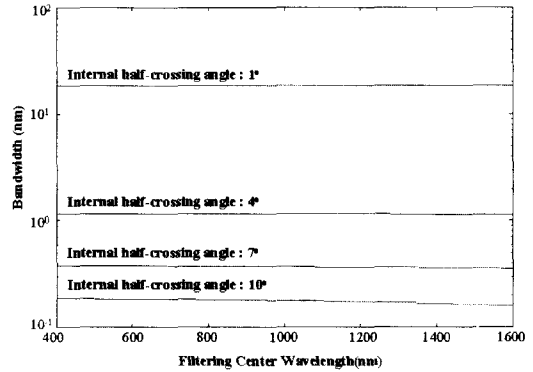


그림 2. 필터링되는 파장과 기록빔의 내부 교차 반각에 따른 필터 통과대역

Fig. 2. Bandwidth of the filter due to the filtering wavelength and internal half-crossing angle of the writing beam.

III. 입사각 제어구조가 적용된 PR 가변 필터 특성의 기하학적 분석

PR 부피격자를 이용한 파장선택필터에서 중심파장을 튜닝하는 기법은 미리 제어를 통해 기록빔의 입사각을 원하는 중심파장에 맞게 변화시키는 방식과 결정의 온도를 변화시켜 매질의 굴절률 변화를 유도하는 방식이 연구되어 보고된 바 있다. 전자의 경우 튜닝 범위가 4.2nm/degree 정도며, 튜닝하는데 소요되는 시간은 미리 제어 시간과 새로운 격자 형성시간의 합으로 결정되어 결과적인 튜닝 시간이 길어진다^[5]. 후자의 경우 중심파장을 변화시키는데 있어서 시스템 구조 변화는 없고 단지 결정의 온도만을 제어하는 방식으로, 매우 미세한 범위의 온도 제어를 위한 장비가 추가적으로 필요하며, $(5.89 \pm 0.15) \times 10^3 \text{ nm}^\circ\text{C}$ 의 튜닝 동작이 보고된 바 있다^[6].

본 논문에서는 그림 3과 같이 열적으로 고정된 단일 PR 부피격자에 입사되는 수신빔의 입사각도를 조정함

으로써 중심파장을 튜닝하는 새로운 방식을 제안하였다. 중심 파장 튜닝을 위한 입사각 제어는 SLM에 의해 이루어지므로 튜닝하는데 소요되는 시간은 공간광학 변조기의 응답시간에 의해 결정된다. PR 결정 내에 기록된 회절격자는 온도에 의해 고정된 회절격자를 사용하므로 어떤 파장을 선택하더라도 항상 일정한 회절 효율을 갖는 안정한 회절 특성을 얻을 수 있다. 그림의 구조에서 중심파장을 변화시킬 수 있는 전체 범위는 결정에 입사시킬 수 있는 각도의 범위에 의해 결정되므로 SLM의 폭과 SLM 뒷단에 위치한 렌즈의 초점거리에 의해 좌우된다.

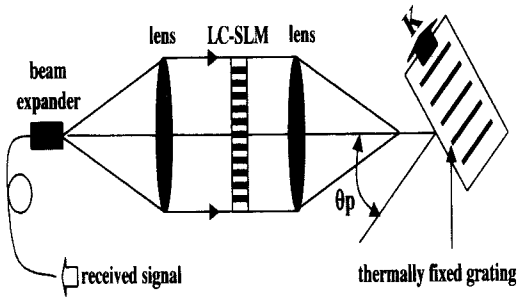


그림 3. 제시된 PR 가변 필터 구조
Fig. 3. Proposed PR tubable filter structure

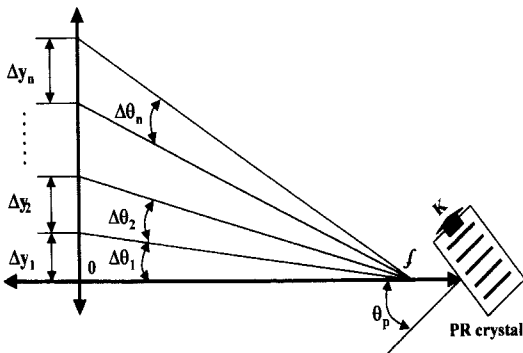


그림 4. 수신빔의 입사구조
Fig. 4. Illumination configuration of the received beam.

그림 4는 그림 3의 구조에서 수신빔이 입사되는 구조를 나타낸 것이다. 그림에서 $\Delta y_1 \sim \Delta y_n$ 은 수신빔의 경로 중 하나를 선택하기 위한 창(window)의 폭을 나타내며 모두 동일한 크기를 갖는다. 그림에서 n 개의 창 중 하나의 창이 열린 경우 입사되는 각도의 크기

$\Delta\theta_n$ 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{f} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta y_i}{f} \right) \quad (8)$$

즉, 하나의 창이 열린 경우 입사되는 빔은 $\Delta\theta_n$ 의 크기를 갖고, $\Delta\theta_n$ 의 범위로 입사되고, 특정한 Δy_n 이 열린 경우 입사되는 각도 범위는 식 (9)의 범위로 광굴절 격자에 입사된다. 따라서, $\Delta\theta_n$ 을 만족하는 모든 파장이 브래그 조건을 만족하게 된다. 이때, 브래그 조건을 만족하는 파장 범위 $\delta\lambda_B$ 는 식 (10)과 같이 표현할 수 있으며, $\lambda_p[\theta]$ 는 입사각이 θ 인 경우 브래그 조건을 만족하는 파장을 의미한다.

$$\delta\theta_n = \left(\theta_p + \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \right) - \left(\theta_p + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\theta_i \right) \quad (9)$$

$$\delta\lambda_B = \lambda_p \left[\theta_p + \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \right] - \lambda_p \left[\theta_p - \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{-i} \right] \quad (10)$$

따라서, 다중화된 빔이 그림 4와 같은 구조에서 광굴절 격자에 입사되고, 일정한 폭을 갖는 하나의 창 Δy_n 이 열린 경우 입사되는 빔의 파장에 따른 회절빔 세기는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서

$$\lambda = \lambda_p \left[\theta_p + \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \right],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{left} \left[\theta_p + \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \right] - \delta\lambda,$$

$$\lambda_3 = \lambda_p \left[\theta_p + \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \right] + \delta\lambda,$$

$$\lambda_4 = \lambda_p \left[\theta_p + \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \right]$$

이다. 그림 5(a)는 λ_1 의 파장을 갖는 빔이 입사된 경우 회절되는 빔의 세기 분포이다. 즉, λ_1 에 대한 회절성분은 $\lambda_1 \sim (\lambda_1 - \delta\lambda)$ 범위의 파장에 의해 영향받으며, 결과적인 회절세기는 그림 5(a)에 나타낸 모든 성분의 합으로 표현된다. 결국, 회절되는 빔의 세기는 식 (11)과 같이 쓸 수 있으며, N 은 식 (10)에서 제시한 $\delta\lambda_B$ 범위 내에 있는 무한한 벡터의 총 개수, $\delta\lambda_i$ 는 $\delta\lambda$ 범위 내에서 브래그 조건이 미약하게 벗어난 모든 성분을 의

미한다. λ_B 는 브래그 조건을 완전히 만족하는 파장을 나타내며, $\eta[\lambda_i]$ 는 λ_i 파장의 빔이 입사될 때 회절 효율을 의미한다. λ_4 에 대한 회절성분은 그림 5(b)와 같이 $\lambda_4 \sim (\lambda_4 + \delta\lambda)$ 범위 내에 있는 파장의 영향을 받고 그림 1의 브래그 조건 불일치에 따른 파장선택성은 대칭의 형태를 띄고 있으므로 λ_1 이 입사된 경우와 같은 값을 갖는다. 이때, 회절되는 빔의 세기는 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$I_d[\lambda_1] = \frac{\eta[\lambda_B] + \sum_{i=1}^n \eta[\lambda_B - \delta\lambda_i]}{N} \quad (11)$$

$$I_d[\lambda_4] = \frac{\eta[\lambda_B] + \sum_{i=1}^n \eta[\lambda_B + \delta\lambda_i]}{N} \quad (12)$$

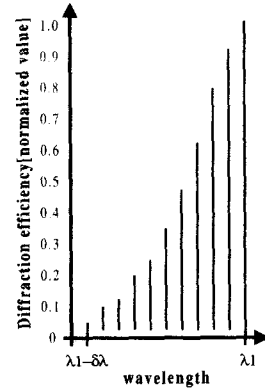
그리고 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 범위의 파장 성분이 입사되는 경우 회절빔은 그림 5(c)에서 보는바와 같이 입사 파장을 중심으로 $\pm\delta\lambda$ 범위의 파장 영향을 받아 식 (13)과 같은 회절 세기를 갖는다.

$$I_d[\lambda_2 \sim \lambda_3] = \frac{\eta[\lambda_B] + \sum_{i=1}^n \eta[\lambda_B \pm \delta\lambda_i]}{N} \quad (13)$$

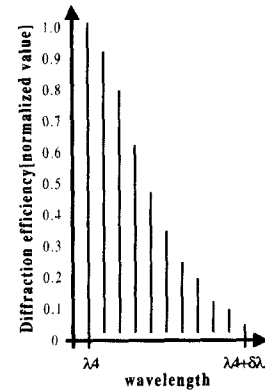
식 (11)~(13)으로부터 회절되는 빔 세기에 대한 다음의 관계를 유추할 수 있다.

$$I_d[\lambda_1] = I_d[\lambda_4] = \frac{I_d[\lambda_2 \sim \lambda_3]}{2} \quad (14)$$

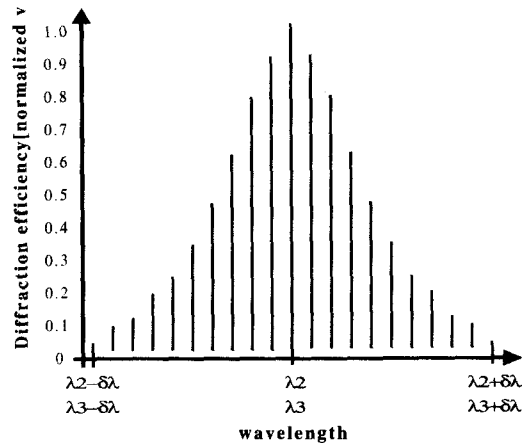
따라서, 그림 4의 구조가 적용된 파장선택필터의 경우 필터 대역폭 BW_N 은 식 (15)와 같이 새로이 결정되고 중심파장을 중심으로 식 (16)의 범위에서 균일한 세기를 갖는 필터가 구성된다. 기록빔의 입사각을 넓힐수록 BW 가 작아지므로 수신빔의 동일한 입사조건에 대해 $\Delta\lambda_c$ 는 더 넓어지게 되고, 필터의 통과대역은 입사되는 빔 폭과 집속 렌즈의 초점거리에 의해 결정된다. 이와같은 관계는, 집속되어 입사되는 빔의 브래그 조건을 만족하는 파장 범위 $\delta\lambda_B$ 가 PR 격자의 파장 선택성 $\delta\lambda$ 보다 두 배 이상 큰 경우에 적용될 수 있으며, 입사되는 빔 폭을 조정해 PR 파장선택필터의 통과대역을 실시간적으로 조정할 수 있다.



(a) λ_1 이 입사되는 경우



(b) λ_4 이 입사되는 경우



(c) $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 이 입사되는 경우

그림 5. 입사되는 파장에 따라 회절되는 빔 세기에 미치는 영향

Fig. 5. Effect to the diffraction intensity due to the incident wavelength.

$$BW_N = \lambda_4 - \lambda_1 = \delta\lambda_B \quad (15)$$

$$\Delta\lambda_c = \lambda_3 - \lambda_2 \quad (16)$$

IV. PR 가변필터 설계 및 실험

PR 결정내에 형성된 부피형 회절격자를 파장 선택용 광필터로 적용하는 경우 중심파장을 튜닝하는 방법은 먼저, 수신빔(receiving beam or reading beam)의 입사각을 고정하고 기록빔의 입사각 및 파장을 변화시키는 방법과 기록빔의 파장 및 입사각을 고정하고 판독빔의 입사각을 원하는 파장대에 맞게 변화시키므로써 구현할 수 있다. 또한, 결정의 온도를 변화시켜 매질의 굴절률 변화를 유도하는 방식으로도 가능하다. 이 중 본 논문에서는 고정된 기록빔의 파장 및 입사각을 통해 단일 격자를 기록하고, 수신빔의 입사각 제어를 통해 중심파장을 튜닝하는 기법을 사용하였다. 입사각 제어를 위해 실시간 광학 소자인 SLM을 적용하였으며, 새롭게 제시된 방식의 실험적 증명을 위해 필터 구성 조건을 설계하였다. 설계된 PR 가변 필터는 1530nm, 1540nm, 1550nm의 중심파장, 균일한 이득을 갖는 범위 1nm, 통과대역 4nm인 세 채널로 구성된다. 이러한 필터 구현을 위해 기록빔의 입사각, 수신빔의 입사각, 수신빔 폭 및 위치를 계산·설계하고 광학적 실험을 통해 제시된 구조의 실현 가능성을 입증한다.

1. PR 가변필터의 설계

위에서 제시한 필터의 필요 조건은 $BW_N = 4\text{nm}$, $\Delta\lambda_c = 1\text{nm}$, 그리고 식 (7)에서 정의한 BW 는 1.5nm의 조건이 만족되어야 한다. 2절에서 예측한 바와 같이 PR 필터의 통과대역 조정은 기록빔의 입사각을 변화시켜 쉽게 얻을 수 있다. 즉, 기록빔의 파장이 514.5nm 일 때, BW 가 1.5nm인 특성을 갖기위해 필요한 기록빔의 외부 교차 반각은 식 (2)와 식 (7)로부터 계산하면 약 12° 인 조건에서 만족됨을 얻을 수 있다. 그리고, $BW_N = 4\text{nm}$ 인 필터 구현을 위해 식 (15)에서 제시한 바와 같이 1530nm, 1540nm, 1550nm를 중심으로 2nm씩 벗어난 파장을 만족하는 Bragg 입사각을 식 (2)를 이용해 얻는다. 이와 같은 입사각 조건과 집속렌즈의 초점거리를 이용하면 SLM에서 통과되는 빔폭 및 위치를 설정할 수 있다. 즉, 기록빔의 입사각이 12° 일 때, 1528nm, 1532nm, 1538nm, 1542nm, 1548nm, 1552nm를

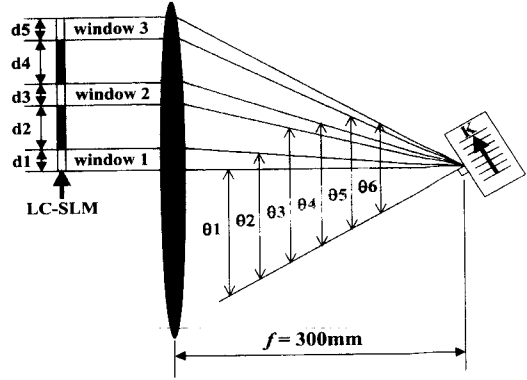


그림 6. 수신빔 입사구조의 설계

Fig. 6. Design of the received beam incident scheme.

표 1. 수신빔 입사 구조의 설계 결과

Table 1. Design results of the received beam incident scheme.

Incident angle in the figure 6					
θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
38.132°	38.249°	38.427°	38.545°	38.722°	38.842°
window width					
d1	d2	d3	d4	d5	
0.622mm (15pixels)	0.931mm (22pixels)	0.619mm (15pixels)	0.927mm (22pixels)	0.617mm (15pixels)	

만족하는 브래그 각을 계산하면, 각각 38.132° , 38.249° , 38.427° , 38.545° , 38.722° , 38.842° 이다. 이들 각도는 그림 6에서의 $\theta_1 \sim \theta_6$ 에 해당하는 각이며, 렌즈의 초점거리가 300mm라고 하면 각 창의 폭 d1~d5는 각각 0.622mm, 0.931mm, 0.619mm, 0.927mm, 0.617mm이다. 본 연구에 사용된 공간광학변조기의 각 픽셀은 $42\mu\text{m} \times 42\mu\text{m}$ 의 크기를 갖고 있으므로, d1, d3, d5는 15 픽셀이 할당되며, d2, d4는 22 픽셀이 할당된다. 설계된 각 창의 폭은 집속렌즈의 초점거리가 고정되었을 때, 필터 통과대역을 결정하는 중요한 파라미터이다. 각 창의 폭을 조절해 필터 대역폭을 제어할 수 있으며, 창 폭이 고정된 경우에는 렌즈의 초점거리를 조정해 다른 통과대역을 갖는 필터 구성이 가능하다. 다시말해, 특정한 파장 대역 선택을 위한 창의 폭이 넓고 집속렌즈의 초점거리가 짧으면 선택되는 파장 폭은 더욱 넓어져 광

대역 특성을 갖게된다. 표 1은 그림 6과 같은 구조에서 위에서 제시한 PR 가변 필터 구성을 위해 설계된 조건을 보인 것이다. 그림 6은 미리 고려된 조건을 만족하기 위해 설계된 창 의 구조를 나타내며 window 1은 1530nm의 중심파장을 갖는 필터를 위한 창이고, window 2, window 3는 각각 1540nm, 1550nm의 중심파장을 위한 것이다. 집속렌즈의 초점거리는 300mm이다.

2. PR 가변필터 실험 및 결과 분석

표 1에서 설계된 PR 가변 필터 구현을 위해 그림 7과 같은 광학 장치를 구성하였다. PR 결정에 격자를 기록하기 위한 광원은 514.5nm의 파장을 갖는 LEXEL 3500을 이용하였으며, 외부 교차 반각은 설계된 조건과 같이 12°이다. LiNbO₃ 광굴절 매질의 경우 이상편광(extraordinary polarization) 상태의 광원을 이용해 격자를 기록할 경우 결정 내부에서 패닝(fanning) 및 격자 손상과 같은 현상으로 인해 잡음을 야기하므로, 편광회전기(polarization rotator)를 사용해 정상 편광(ordinary polarization)으로 조절하였다. 높은 회절효율을 얻기위해 두 기록빔의 세기비($I_R : I_S$)를 5 : 1로 조정했으며, 기준빔은 10mW/cm², 신호빔의 세기는 2mW/cm²이다. 결정의 축방향에 평행한 파수 벡터를 갖는 격자 기록을 위해 두 기록빔의 교차 반각은 동일하며, 빔 세기가 균일한 평행광을 사용하였다. 결정 내부에 기록된 격자는 이후 약 130°C의 온도에서 1시간동안 가열해 고정되었다. 필터 특성 조사를 위한 수신빔은 1520~1580nm 대역에서 0.1nm 간격으로 튜닝 가능한 New Focus 사의 max 3500 LD이다. 수신빔은 Anritsu 사의 MS9710B 광 주파수 분석기(optical spectrum analyzer)를 통해 파장 분석되며, 편광 조절기(polarization controller)를 이용해 기록빔과 동일한 편광상태로 조정하였다. 단일 모드 파이버(single-mode fiber)를 통과한 빔은 콜리메이터(Collimator), 빔확장기(beam expander), 렌즈를 이용해 평행광으로 변형시켰다. 이후 LC-SLM에 의해 빔 경도가 제어되고, 300mm의 초점거리를 갖는 집속 렌즈를 통해 격자에 입사된다. LC-SLM에서 중심파장 튜닝을 위한 창의 형태는 그림 6과 표 1에서 설계된 조건이 적용되었다. 이후 그림 6에서 보인 세 채널의 창 중 각각 하나의 창이 열리도록 PC로 제어해, 수신빔의 파장을 0.5nm 간격으로 변화시키면서 회절되는 빔 세기를 측정하였다. 사용된 측정기는 Newport사의 818-IR 디지털 파워 미터이다.

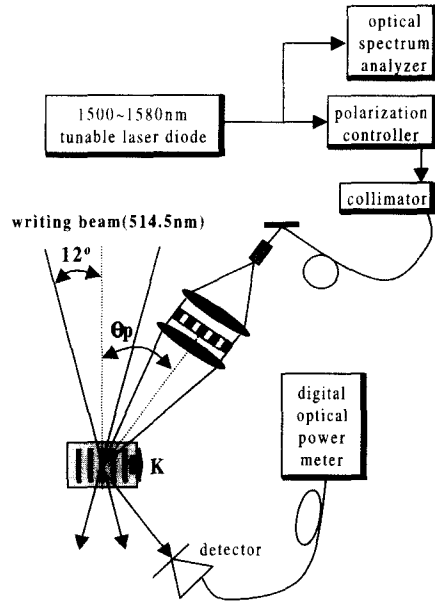
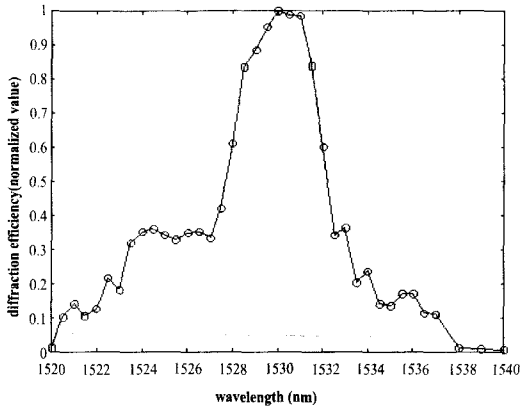
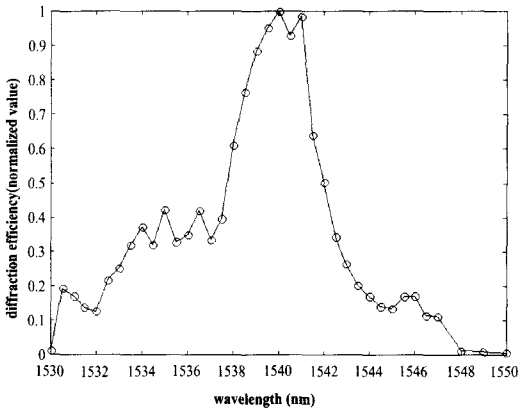


그림 7. PR 가변필터 구성을 위한 실험 구성도
Fig. 7. Experimental setup for the implementation of the PR tunable filter.

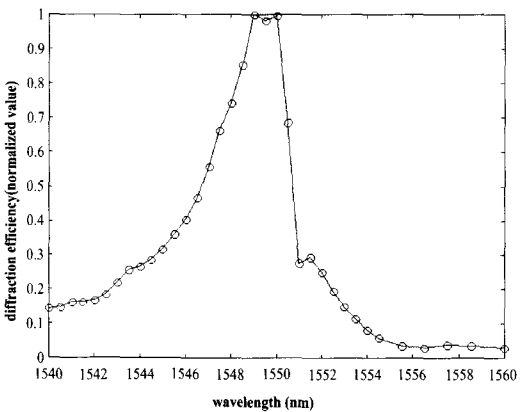
그림 7의 실험 구성도에서 얻은 실험결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a), (b), (c)는 각각 그림 7에서의 창 1, 창 2, 창 3이 열렸을 때 얻은 필터 특성이다. 그림 6의 창 1이 열렸을 때, 그림 8(a)와 같은 회절 특성을 보였으며, $BW=4.5nm$, $\Delta\lambda_c=1530\sim1531nm$, 중심파장 λ_c 는 1530.5nm이다. 창 2와 창 3이 적용된 경우의 필터 특성은 그림 8(b), (c)와 같으며, 각각의 통과 대역은 4.25nm, 4nm, 균일한 회절특성을 갖는 범위 $\Delta\lambda_c$ 는 각각 1540~1541nm, 1549~1550nm, 중심파장은 1540.5nm, 1549.5nm의 결과를 볼 수 있으며, 설계시 예측된 튜닝 파장과 거의 일치한다. 표 2는 식 (15), (16)을 통해 이론적으로 설계된 PR 필터의 특성과 실험적으로 확인된 결과를 비교한 것이다. 실험결과는 예측되는 값과 대체적으로 일치하는 결과를 볼 수 있지만, 통과대역과 중심파장 범위에 약간의 오차를 갖고 있다. 이러한 결과는 광학적 정렬의 오차, 수신빔 입사각 제어를 위한 창 폭의 미세한 오차, 회절빔 측정시의 오차, 렌즈의 수차, 광학 시스템의 불안정 등과 같은 이유에 의한 것으로 생각된다. 또한, 구성된 필터의 통과대역 특성이 WDM 광통신 시스템에서 요구하는 대역폭(<1nm)에 미치지 못하는데, 이는 격자 기록시 기록



(a) λ_1 이 입사되는 경우



(b) λ_2 이 입사되는 경우



(c) $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 이 입사되는 경우

그림 8. PR 가변 필터 실험 결과
Fig. 8. Experimental results of the PR tunable filter.

빔의 입사각을 넓히고 수신빔의 입사각 제어시 사용되는 빔 폭을 더욱 좁게 설정하면 WDM 광통신 시스템에서 필요로 하는 대역폭을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다. 본 논문에서 제시한 구조는 투과형 뿐 아니라 반사형 구조에도 적용될 수 있으며, 반사형 구조를 취할 경우에는 이보다 더욱 협대역 특성을 갖는 필터 구성이 가능하다.

표 2. 이론값과 실험 결과의 비교

Table 2. Comparison of the theoretical and experimental values

opened window	theoretical values		
	$\Delta\lambda_c$	λ_c	BW_N
window 1	1529.5 ~ 1530.5nm	1530nm	4nm
window 2	1539.5 ~ 1540.5nm	1540nm	4nm
window 3	1549.5 ~ 1550.5nm	1550nm	4nm
opened window	experimental values		
	$\Delta\lambda_c$	λ_c	BW_N
window 1	1530 ~ 1531nm	1530.5nm	4.5nm
window 2	1540 ~ 1541nm	1540.5nm	4.25nm
window 3	1549 ~ 1550nm	1549.5nm	4nm

V. 결론

본 논문에서는 Fe 이온이 0.015Wt.% 도핑된 LiNbO₃ 결정 내에 형성된 홀로그래픽 부피격자에서 수신빔의 입사각 제어를 통한 새로운 구조의 PR 가변 필터를 제안하고, 광학적 실험 결과를 제시하였다. 필터링 되는 중심 파장의 튜닝은 실시간 광학소자인 SLM을 통해 이루어지므로 고속의 튜닝이 가능하며, 고정된 단일 격자를 이용하기 때문에 선택되는 모든 파장에 대해 일정한 회절 특성을 얻을 수 있는 이점이 있다. 또한, 수신빔이 집속되어 입사되는 경우 변화되는 필터 통과대역을 기하학적 방법을 이용해 해석하였다. 해석 결과 일반적으로 예측할 수 있는 PR 부피 격자의 파장 선택성 이론은 본 논문에서 제시한 구조에 적용하기에 부적절하며, 본 구조에서 필터 통과대역은 수신빔의 폭과 집속렌즈의 초점거리에 의해 결정되는 특성을 갖는다.

위에서 제시된 파장 선택성 이론을 필터 설계 및 광학 실험시 적용해 광학적으로 증명하였다. 광학적 실험을 위해 설계된 조건은 약 10nm 간격을 갖는 세 채널로 구성되었으며, 통과대역은 4nm를 갖도록 하였다. 이때 중심파장은 1530nm, 1540nm, 1550nm 를 갖고 균일한 회절 특성을 갖는 범위는 각각 1529.5~1530.5nm, 1539.5~1540.5nm, 1549.5~1550.5nm 이다. 위의조건으로 설계된 PR 가변 필터의 특성을 광학 실험을 통해 조사하였다. 실험 결과, 세 개의 창이 각각 열린 경우 중심파장은 1530.5nm, 1540.5nm, 1549.5nm 이고, $\Delta\lambda_c$ 는 1530~1531nm, 1540~1541nm, 1549~1550nm, 통과대역은 각각 4.5nm, 4.25nm, 4nm 인 특성을 나타내었으며, 이러한 실험 결과는 설계시 고려된 조건과 거의 일치하는 결과로 생각된다. 이상의 실험 결과에서 볼 때, 격자 기록시 기록빔의 입사각을 충분히 넓히고 수 신빔의 폭을 좁히면 광통신 시스템에서 요구하는 통과대역으로 조정 가능하며, 정밀한 광학계 설계를 통해 시스템 안정화가 이루어진다면 WDM 통신 시스템에 직접 적용 가능한 가변 필터로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 제시된 구조는 파장선택필터 뿐 아니라 역다중화기, 주파수 분석기, 광대역 증폭기, 위상배열 안테나 등에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Cronin-Golomb and M. P. Tarr, "Applications of birefringent phase matching for photorefractive device," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 21, pp. 2252-2254, 1995.
- [2] G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference wave," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2403-2417, 1996.
- [3] C. C. Lee, T. K. Chen, and S. K. Liaw, "Tunable and selective wavelength converter using degenerate fiber four-wave mixing with pump wavelength and polarization controls," *Elec. Lett.*, vol. 34, no. 2, pp. 205-206, 1998.
- [4] J. W. An, J. H. Kim, N. Kim, K. Y. Lee, and M. H. Lee, "Tuning speed enhancement of photorefractive wavelength selective filter using window control method," *Journal of Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 23, no. 11, pp. 3095-3102, 1998.
- [5] R. T. B. James, C. Wah, K. Iizuka, and H. Shimotahira, "Optically tunable optical filter," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 5, pp. 8230-8235, 1995.
- [6] 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.*, vol. 65, no. 9, pp. 1079-1081, 1994.
- [7] R. Hofmeister, A. Yariv, and S. Yagi, "Spectral response of fixed photorefractive grating interference filters," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 4, pp. 1342-1351, 1994.
- [8] J. Zhang, F. T. S. Yu, and D. K. McMillen, "Coupling kinetics of the photorefractive hologram," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2355-2359, 1996.
- [9] J. W. An, N. Kim, K. Y. Lee and M. H. Lee, "Photorefractive wavelength selective filter using spatial light modulator in iron doped LiNbO₃ crystal," *Proceeding of International Photonics Conference*, pp. 509-511, Dec. 1998.
- [10] J. W. An, N. Kim and K. Y. Lee, "Comparison and analysis of tunable methods in photorefractive wavelength selective filter," *Proc. SPIE 3801*, July, 1999(to be presented).
- [11] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 9 pp. 2909-2947, 1969.

저 자 소 개

安俊遠(正會員) 第33卷 D編 第3號 參照

金男(正會員) 第33卷 A編 第3號 參照



金成球(正會員)

1973년 7월 4일생. 1998년 2월 충북대학교 정보통신공학과 졸업(공학사). 1998년 3월~현재 충북대학교 전기전자공학부 석사과정. 주관심분야는 Photorefractive material, Optical memory