

광연결을 위한 포토폴리머형 홀로그래픽 부피격자 커플러의 설계 및 구현

Design and implementation of photopolymer-based holographic volume grating couplers for optical interconnection

이권연* , 정상혁* , 조병모* , 손명식* , 전석희**

Kwon-Yeon Lee* , Sang-Huek Jeung* , Byung-Mo Cho* , Myung-Sik Son* , Seok-Hee Jeon**

요약

홀로그래픽 부피격자 커플러(VGC : volume grating coupler)는 높은 선택적 결합효율, 건식 제조공정, 콤팩트한 소자 제작이 가능하고 저렴하기 때문에 광연결 기술의 구현 및 응용에 매우 매력적인 소자로 간주되고 있다. 본 논문에서는 도파로형 광연결에 적용키 위한 45° 격자 경사각을 갖는 도파로 삽입형 입·출력 VGC를 DuPont사의 HRF600-20 홀로그래픽 포토폴리머를 이용하여 설계, 구현하기 위한 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 VGC 소자의 유용성을 입증키 위해 동작파장이 각각 632.8nm 및 1550nm인 VGC를 제작하고 실험결과를 제시하였다. 실험결과 632.8nm 파장에서 동작하는 격자주기가 0.5 μ m인 단일 VGC의 경우 TE 편광에서 입력 결합효율은 86.6% 이상이고, 1550nm 파장에서 동작하는 격자주기가 0.73068 μ m인 1 \times 2 VGC의 입력 결합효율은 ~90.9%의 특성을 나타내었다.

Abstract

Holographic volume grating couplers (VGCs) are become increasingly attractive device for the application of optical interconnects because of their higher preferential coupling, dry fabrication processing, compact, and low cost. In this paper, the analysis, design, and implementation of the waveguide-imbedded input-output VGC with 45° grating slant angle using holographic photopolymer(DuPont HRF600-20) for guided-wave optical interconnection applications, are presented. To show the usefulness of the proposed VGC, we fabricated the VGCs operating at 632.8nm and 1550nm wavelengths and its results are presented. The measured input coupling efficiency of the single VGC with 0.5 μ m grating period at 632.8nm wavelength is above 86.6% for TE-polarization. The input coupling efficiency of the 1 \times 2 VGC with 0.73068 μ m grating period at 1550nm wavelength is about 90.8%.

keywords : Guided-wave optical interconnection, Volume grating coupler, Holography, Photopolymer,

I. 서론

광연결(optical interconnection)기술은 기존 전기적인 접속기술에서 전송속도를 높이고자할 때 나타나는 전자 신호 감쇄, 신호 왜곡 및 전력 소모량의 증가, 임피던스 부정합 등과 같은 문제를 극복할 수 있는 가장 유력하고 현실성이 높은 방법 중의 하나로 평가되고 있다.

일반적으로 칩간, 보드간 그리고 시스템간 광연결 기술은 광원과 수광소자 사이를 접속 또는 연결시키는 기술로써 크게 자유공간형(free-space optical interconnection), 도파로형(guided-wave optical interconnection) 등으로 구분할 수 있고, 도파로형은 광섬유, 유리기판, 박막도파로 등을 사용하여 구현한다[1]. 특히 고분자 소재를 이용한 박막 도파로형 광연결(thin film guided-wave optical interconnection) 기술의 경우는 저손실, 적층성, 유연성, 경제성 등의 특성뿐만 아니라 기존의 PCB구조에 결합이 용이하고 전광 하이브리드 구조의 배선이 가능하다는 장점 때문에 최근에 활발하게 연구되고 있다. 이러한 박막 도파로형 광연결 기술의 경우, 광도파로 내부 및 외부로 의 효과적인 빛결합을 위한 광커플러(optical coupler) 소자는 무늬화 광연결을 위해 필수적이며, 광도파로용 커플

* 순천대학교 정보통신공학부 전자공학과

** 인천대학교 전자공학과

접수일자 : 2008. 8. 27 수정 완료 : 2008. 10. 17

게재확정일자 : 2008. 10. 29

※ 본 논문은 2006년 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-D00333).

리로 사용될 수 있는 소자는 프리즘 커플러(prism coupler), 반사형 커플러(reflective coupler) 및 회절형 커플러(diffraction coupler) 등이 있다. 이중 회절형 커플러는 회절 격자(diffraction grating)를 이용하는 방식으로 콤팩트하고 평평하기 때문에 박막 도파로형 광연결에 적합한 소자이다. 일반적으로 회절 격자형의 경우 빛은 여러 차수로 회절 되므로 높은 선택적 결합효율을 갖는 소자를 제작키 위해 격자 아래의 기판에 반사층을 삽입하거나 2중 표면 주름 및 경사진(blazed) 격자 구조 등을 사용하여 구현한다. 그러나 이러한 구조의 경우 큰 손실, 복잡한 공정, 제작단가의 상승 등의 문제를 지니고 있다[2,3]. 본 논문에서는 이를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 홀로그래픽 포토폴리머(holographic photopolymer)에 형성된 위상 부피격자를 이용하는 방법을 도입한다. 포토폴리머에서 위상 부피격자의 생성과정은 두 빔의 간섭에 의해 모노머(monomer)가 폴리머(polymer)로 전환되는 중합반응에 의해 위상 홀로그램과 동일한 굴절률 변조가 유도되고 UV 램프 또는 가열에 의해 간단하게 정착되며, 이렇게 형성된 위상 부피격자는 높은 굴절률 변조, 고해상도, 낮은 수축률 등과 같은 우수한 특성을 갖는다[4]. 따라서 포토폴리머형 위상 부피격자는 기존의 회절 광학소자의 복잡한 화학 공정 등이 필요 없고 고분자소재와 잘 융합되기 때문에 광도파로가 적층된 광 PCB 구조에서 선택적 차수 결합 및 무누화 광연결을 쉽게 제공하며, 광섬유로는 응용이 곤란한 급격한 굽힘이나 단차 또는 분기가 필요한 부분 등에서 기존소자 및 방식의 문제점을 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 광연결에 부피격자를 이용하고자하는 생각은 J. W. Goodman[3] 및 M. R. Feldman[5] 등에 의해 자유공간 광연결 구조가 제안되면서부터 본격적으로 연구되기 시작하였고, 이후 새로운 계열의 포토폴리머가 활발하게 개발되면서 홀로그래픽 광메모리, 광정보처리, VLSI 광연결, 파장 역다중화기, 위상 어레이 안테나 등에 적용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다[3,5-10]. 본 논문에서는 홀로그래픽 포토폴리머 필름을 이용하여 격자의 경사각이 45° 인 위상 부피격자가 삽입된 도파로 삽입형 입·출력 VGC를 제안하고 제작·평가함으로써 제안된 VGC가 도파로형 광연결 구조뿐만 아니라 광통신 영역의 소자로도 적용 가능함을 입증하였다.

II. 포토폴리머형 VGC 해석 및 설계

2.1 입·출력 VGC 해석

그림 1과 같이 입사된 빔이 45° 경사진 부피격자로부터 90°로 꺾여 도파로 평면으로 회절 되고, 다시 출력 VGC에 의해 도파로 평면에 대해 90°로 회절되는 도파로 삽입형 입·출력 VGC를 해석하고 설계한다. 이러한 도파로 삽입형 격자쌍 구조의 경우 격자가 유한하고 회절된 빔

은 격자평면 안에 존재하기 때문에 Kogelnik의 1차원 결합과 이론[11]으로는 회절효율을 계산하는데 이용할 수 없고, Solymar 등이 제시한 2차원 이론[12,13] 및 Svidzinskii 등이 발표한 특성격자(characteristic grating)의 해[14-18]를 이용하여 해석한다.

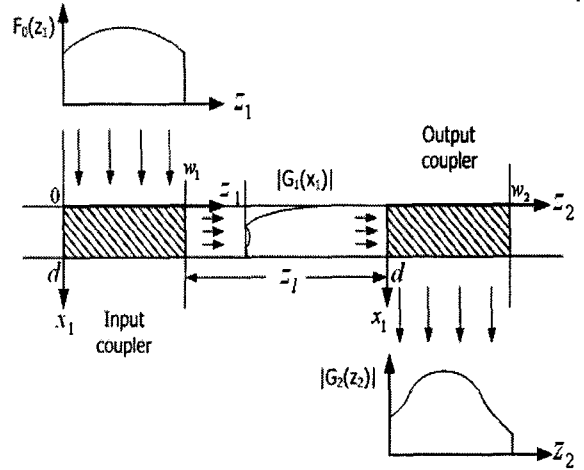


그림 1. 도파로 삽입형 입출력 VGC 구조
Fig. 1. Waveguide-embedded input-output VGC configuration

그림 2는 입력 VGC를 해석하기 위한 개념도로 x는 도파로의 두께 방향, z는 도파로 내에서 전파 방향을 나타낸다. 그리고 F0(z)는 Bragg각에 대해 Δθ1 각을 갖고 격자에 입사되는 입력빔의 전기장 분포, G1(x)는 회절빔의 전기장 분포이고 F1(z)는 투과빔의 전기장 분포이다.

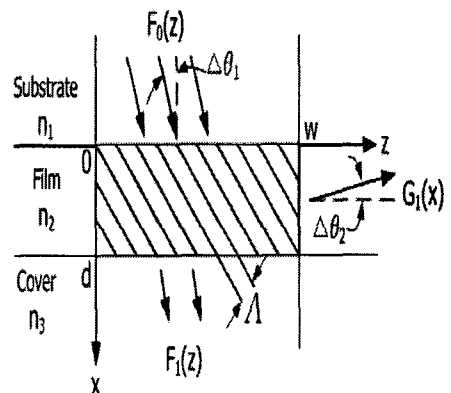


그림 2. 입력 VGC 해석을 위한 구조도
Fig. 2. Schematic diagram for the analysis of input VGC

흡수 혹은 산란에 의한 손실을 무시하고 입사빔이 TE 편광이라고 가정하면 입력 VGC에서 회절빔과 투과빔의 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다[14, 18].

$$G_1(x) = j\kappa \exp\left[j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}\right)(x+w)\right] \int_0^w F_0(z) dz \quad (1)$$

$$\times \exp\left[-j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}\right)z\right] J_0(2\kappa\sqrt{xz})$$

$$F_{R_1}(z_R) = F_{R_0}(z_R) - \kappa \exp\left[j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}\right)z_R\right] \quad (2)$$

$$\times \int_{z_R}^w F_{R_0}(\xi) \exp\left[-j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}\right)\xi\right]$$

$$\times \left(\frac{d}{\xi - z_R}\right)^{1/2} J_1(2\kappa\sqrt{d(\xi - z_R)}) d\xi$$

여기서 Δn 은 격자의 공간적 굴절률 변조, J_0 및 J_1 는 0차 및 1차 Bessel 함수이다. 그리고 $F_{R_0}(z_R) = F_0(w - z)$ 이고, 투과장은 $F_1(z) = F_{R_1}(w - z_R)$ 을 이용하여 정규좌표로 다시 변환한다. 격자에서 감쇠에 의한 손실을 고려할 경우는 식 (1) 및 식 (2)의 지수함수 항에 감쇄인자 $\exp(-\alpha)$ 를 삽입하면 된다. 식 (1) 및 식 (2)에서 κ 는 결합상수(coupling constant)로 Kogelnik[11]의 정의에 의해 $\kappa = \pi \Delta n / \lambda$ 로 표시되고, 격자의 회절효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \left[\int_0^d |G_1(x)|^2 dx \right] / \left[\int_0^w |F_0(z)|^2 dz \right] \quad (3)$$

만약 손실을 무시하고($\alpha = 0$) TE 편광된 균일한 입사빔($F_0(z) = 1$)이 Bragg각($\Delta\theta = 0$)으로 격자에 입사되는 가장 단순한 경우, 회절범 및 투과범은 다음과 같은 Bessel 함수 형태로 변경된다.

$$G_1(x) = -j\sqrt{\frac{w}{x}} \cdot J_1(2\kappa\sqrt{xw}) \quad (4)$$

$$F_1(z) = J_0(2\kappa\sqrt{dz}) \quad (5)$$

그림 3은 균일한 입력장 분포($F_0(z)=1$)를 가정하고, 굴절률 변조 $\Delta n = 0.003$, 매질의 굴절률 $n=1.5$, 입사빔의 파장 $\lambda_r = 1550nm$, 격자의 두께 $d=20\mu m$ 인 부피격자에서 격자폭 w 가 각각 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm일 때 격자의 회절효율을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 격자폭이 2mm에서 6mm로 증가함에 따라 각 선택도는 더 예리해짐을 알 수 있는데, 이는 격자폭이 증가함에 따라 입사빔과 회절빔의 파면은 더 많은 격자 프린지 쌍들을 만나고 결국 격자폭을 따라 더 많은 파면이 위상정합되기 때문이다.

그림 4는 격자폭 및 Δn 이 6mm, 0.003일 때, 격자의 두께 증가($10\mu m, 20\mu m, 38\mu m, 60\mu m, 80\mu m$)에 따른 회절효율을 나타내었다. 이 경우 격자 경계면($x = 0$) 근처에서 최대효율을 갖기 때문에 투과범은 격자의 두께를

지나면서 점점 약해진다. 따라서 특성격자의 각 선택도는 두께가 증가 되더라도 급격하게 변하지 않음을 알 수 있다.

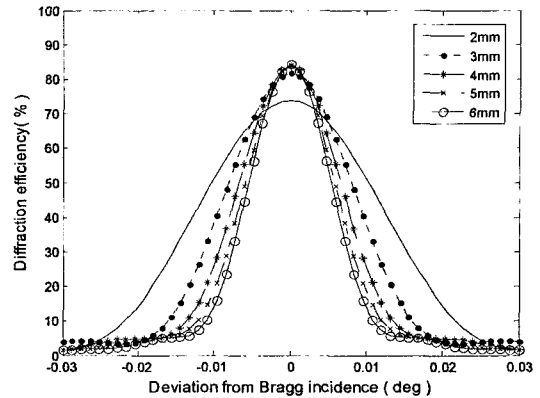


그림 3. 격자폭의 변화에 따른 입력 VGC의 회절효율
Fig. 3. Diffraction efficiency curves of input VGC as a function of grating width for a grating with fixed thickness and fixed Δn

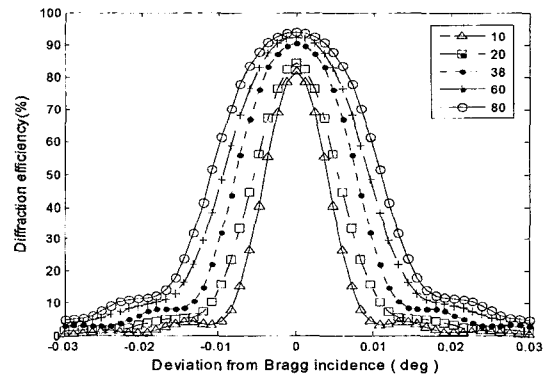


그림 4. 격자 두께의 변화에 따른 입력 VGC의 회절효율
Fig. 4. Diffraction efficiency curves of input VGC as a function of grating thickness for a grating with fixed width and fixed Δn

그림 5는 격자 두께 및 격자폭이 $20\mu m, 6mm$ 이고, Δn 이 각각 0.001, 0.0015, 0.002, 0.004, 0.007 일 때 입력 VGC의 각도에 따른 회절효율을 나타내었다. 그림에서 Δn 이 증가함에 따라 각도 선택도 폭이 증가하는 이유는 입사표면의 경계면을 향해 회절범이 압축되기 때문이다. 따라서 각 선택도는 실제 격자의 두께보다는 Δn 에 영향을 받는 유효 격자 두께에 더 민감한 특성을 갖는다.

그림 1에 나타낸 길이가 z_1 인 도파로에 의해 연결된 격자쌍 및 다수 출력 격자를 포함하는 도파로 삽입형 입·출력 VGC의 해석은 앞의 단일격자에 대한 식 (1) 및 식 (2)를 각각의 출력 격자에 반복 사용하므로 써 출력범의 분포($G_2(z_2)$)를 구할 수 있다.

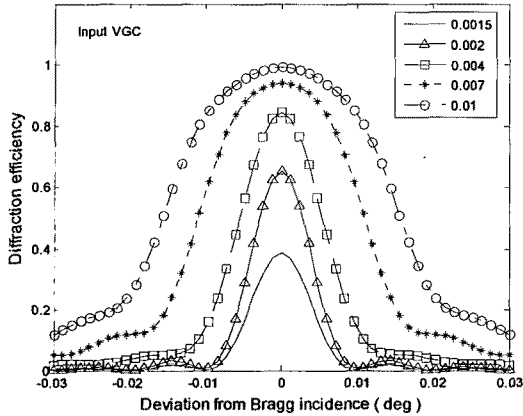


그림 5. Δn 의 변화에 따른 입력 VGC의 회절효율
 Fig. 5. Diffraction efficiency curves of input VGC as a function of Δn for a grating with fixed width and fixed thickness

그리고 본 논문에서는 입력 커플러에서 출력 커플러로 빔이 전파될 때 도파로는 빔의 형태에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 이러한 가정은 다수모드(>20)를 수용하는 도파로에서 만약 입사광의 80% 이상이 도파모드로 결합될 경우 타당하며, 이 경우 우리는 방사모드 (radiation mode)를 완전하게 무시할 수 있으므로 계산의 복잡도를 현저하게 줄일 수 있고 입사각 및 굴절률 변조 파라미터의 함수로 회절효율에 대응하는 곡선족을 구할 수 있다. 따라서 격자쌍 입·출력 VGC구조에서, 출력 커플러에 입사되는 복소진폭 $F_2(x_2)$ 는 입력 커플러에서 회절된 복소진폭 $G_1(x)$ 으로 근사화 될 수 있으며, 출력빔 복소진폭은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G_2(z_2) = j\kappa \exp\left[j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_2}{\lambda}\right)(z_2 + d)\right] \times \int_0^d F_2(x_2) \exp\left(-j\frac{2\pi n \Delta\theta_2}{\lambda}x_2\right) \cdot J_0(2\kappa\sqrt{x_2z_2}) dx_2 \quad (6)$$

$$F_2(x_2) = G_1(x) = j\kappa \exp\left[j\left(\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}\right)(w_1 + x)\right] \times \int_0^{w_1} F_0(z_1) \exp\left(-j\frac{2\pi n \Delta\theta_1}{\lambda}z_1\right) \cdot J_0(2\kappa\sqrt{z_1x}) dz_1 \quad (7)$$

여기서 $\Delta\theta_2$ 는 그림 2의 입력 VGC에서 출력 편향각이고, 일반적으로 삽입형 도파로 구조에서 회절빔의 편향각은 입사빔의 편향각보다 더 작기 때문에 입·출력 편향각 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 의 관계는 $\Delta\theta_2 \approx 0.1(\Delta\theta_1)^2$ 로 근사적으로 표시할 수 있고, 이 관계를 격자쌍 구조에 적용하면 출력빔의 편향각 $\Delta\theta_{out}$ 은 $\Delta\theta_1$ 과 다음과 같은 관계로 표시할

수 있다[18].

$$\Delta\theta_{out} \approx 0.001(\Delta\theta_1)^4 \quad (8)$$

그리고 이 구조에서 전체 시스템의 회절효율은 다음과 같이 표시된다.

$$\eta_T = \left[\int_0^{w_2} |G_2(z_2)|^2 dz_2 \right] / \left[\int_0^{w_1} |F_0(z_1)|^2 dz_1 \right] \quad (9)$$

따라서 식 (6)~식 (9)을 이용하면 입·출력 커플러의 전체 회절효율은 $\Delta\theta_1, \Delta n, w_1, w_2, d$ 의 함수로 계산할 수 있다.

그림 6은 입사빔이 균일하고, 도파로의 효과를 무시할 수 있는 가장 단순한 경우, 그림 1의 구조에서 Bragg각으로부터 편향된 외부 입사각의 함수로 입·출력 VGC의 전체 회절효율을 나타낸 곡선이다.

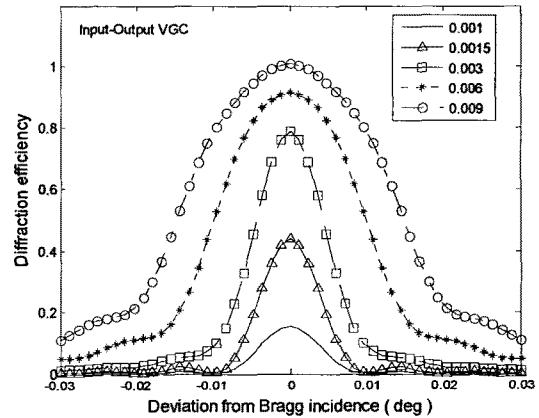


그림 6. Bragg각으로부터 편향된 입사각에 따른 입출력 VGC의 회절효율

Fig. 6. Diffraction efficiency curves of input-output VGC as a function of the input-angle deviation from the Bragg angle

그림에서 알 수 있듯이 Δn 의 증가에 따른 출력장의 왜곡현상은 발생하지 않을 뿐만 아니라, Δn 이 클수록 VGC의 전체 효율은 비교적 낮은 비율로 감소하기 때문에 적절한 Δn 제한에 구속받지 않고 입출력 VGC를 설계할 수 있다.

2.2 VGC 설계

본 논문에서는 공기-포토폴리머 경계면에서 전반사, 해상도 및 경사각 제한을 극복하고 큰 경사각을 갖는 홀로그래픽 부피격자를 제작하기 위해 그림 7과 같은 $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ 프리즘을 포함하는 기록 구조를 이용한다.

이러한 구조에서 특정한 VGC 제작을 위해 요구되는 입사각은 프리즘의 광학적 성질과 함께 설계하고자 하는 격자의 경사각 및 격자벡터에 기초하여 결정된다. 기록빔(writing beam)의 파장을 λ_w , 기록빔의 외부 입사각을 각각 θ_{w1} , θ_{w2} 라 하고 포토폴리머의 수축효과(shrinkage effect)를 고려하지 않을 경우 격자 경계면에서 격자주기 Λ_o 및 경사각 ϕ_o 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Lambda_o = \frac{\lambda_w}{2n_{gw} \sin(\alpha_w/2)} \quad (10)$$

$$\phi_o = \frac{\phi_{g1} + \phi_{g2}}{2} \quad (11)$$

여기서 α_w 는 포토폴리머에서 두 기록빔의 교차각($\alpha_w = \theta_{g1} - \theta_{g2}$)이고, 본 연구에서와 같이 45° 기울어진 격자의 경우 $\phi = 45^\circ$ 이다.

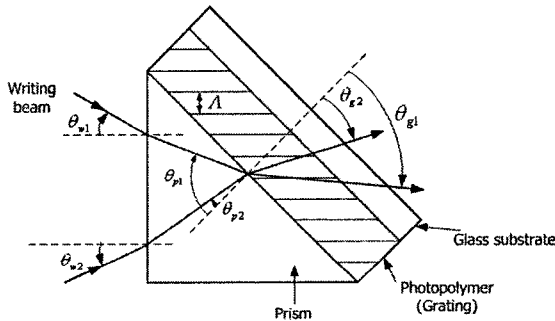


그림 7. 홀로그래픽 부피격자의 제작을 위한 프리즘 시스템의 구조
Fig. 7. Configuration of a prism system for the fabrication of holographic volume gratings

따라서 식 (10) 및 식 (11)을 θ_{g1} 및 θ_{g2} 로 다시 정리해서 쓰면 다음과 같다.

$$\theta_{g1,g2} = 45^\circ \pm \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_w}{2n_{gw}\Lambda_o}\right) \quad (12)$$

그리고 프리즘-격자 경계면과 공기-프리즘 경계면에서 스넬의 굴절법칙을 적용하면 두 기록빔의 입사각은 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_{w1} = \sin^{-1}\{n_{pw} \sin(\theta_{p1} - 45^\circ)\} \quad (13)$$

$$\theta_{w2} = \sin^{-1}\{n_{pw} \sin(45^\circ - \theta_{p2})\} \quad (14)$$

여기서 n_{pw} 및 n_{gw} 는 파장 λ_w 에서 프리즘 및 포토폴리머의 굴절률이고, $\theta_{p1} = \sin^{-1}\{n_{gw}/n_{pw} \sin\theta_{g1}\}$,

$\theta_{p2} = \sin^{-1}\{n_{gw}/n_{pw} \sin\theta_{g2}\}$ 으로 프리즘-격자 경계면에서 입사각이다. 본 연구뿐만 아니라 대부분의 응용에 있어 기록빔과 판독빔의 파장이 다르므로 기록빔과 판독빔(reading beam)의 파장 λ_w , λ_r 항으로 식 (10)를 다시 표현할 필요가 있다[11]. 만약 경사각이 45°이고 Bragg 각이 0°인 경우

$$\Lambda_o = \frac{\lambda_w}{2n_{gw} \sin \frac{\alpha_w}{2}} = \frac{\lambda_r \cdot \sqrt{2}}{2n_{gr}} \quad (15)$$

이 되고, 여기서 n_{gr} 은 판독빔의 파장 λ_r 에서 매질의 굴절률이다. 식 (15)를 매질내에서 두 기록빔의 사이각으로 표시하면 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_w = 2 \sin^{-1}\left[\frac{\lambda_w n_{gr}}{\lambda_r n_{gw} \sqrt{2}}\right] \quad (16)$$

일반적으로 포토폴리머는 기록빔에 의해 모노머가 폴리머로 변할 때 매질의 두께가 감소하는 수축현상이 불가피하게 초래된다. 이러한 수축현상은 기울어진 투과형, 반사형 격자에서 모두 발견할 수 있으나, 기울지 않은 격자에서는 회절무늬가 매질의 표면에 수직이므로 매질의 두께 변화는 격자주기나 격자 경사각에 영향을 주지 않기 때문에 발견되지 않는다. 본 연구에서는 두 기록빔의 입사각이 비대칭구조를 이루기 때문에 이러한 수축현상에 의해 경사각 및 주기가 변하므로 앞의 기록각 설계시 미리 보상하여야 한다. 만약 폴리머의 수직방향 수축을 δ_ν 라고 하면, 매질의 두께가 수축된 후 격자의 경사각 및 주기는 다음과 같이 변한다[19].

$$\phi_s = \tan^{-1}[(1 - \delta_\nu) \tan \phi_o] \quad (17)$$

$$\Lambda_s = \frac{\Lambda_o \sin \phi_s}{\sin \phi_o} \quad (18)$$

여기서 첨자 o 및 s는 각각 수축되기 전 및 수축된 후 경사각, 주기를 나타낸다. $\phi_s = 45^\circ$ 로 놓고 식 (17) 및 식 (18)을 적용하면, 수축을 미리보상 했을 경우 매질 안에서 두 기록빔의 사이각 및 기록각은 다음과 같이 수정된다.

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \frac{\lambda_w n_{gr}}{2 \lambda_r n_{gw} \sin \phi_o} \quad (19)$$

$$\theta_{g1,g2} = \phi_o \pm \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_w n_{gr}}{2 \lambda_r n_{gw} \sin \phi_o}\right) \quad (20)$$

III. VGC 제작 및 특성 실험

3.1 포토폴리머 특성 실험

포토폴리머에서의 굴절률 변화는 입사빔의 세기와 입사각에 가장 큰 영향을 받기 때문에 포토폴리머를 VGC로 적용하기 전에 빔의 세기와 입사각에 따른 매질의 회절효율 특성을 분석하여 최적의 기록조건을 잡아야한다. 그림 8은 입사빔의 세기변화에 따른 회절효율을 실시간으로 측정하기 위한 실험구성도이다. 그림에서 532nm 파장의 Nd:YAG 레이저 빔은 공간필터(SF) 및 렌즈(L), 원형 조리개(A)에 의해 직경이 10mm인 평행광으로 만들어지고, 편광 빔분할기(PBS)에 의해 두 개의 빔으로 나뉘어 포토폴리머의 표면 법선에 대해 20°(외부 입사반각)로 입사된다. 그리고 빔감쇄기(ATT)는 기록빔의 전체 파워를 조정하는데 사용되며, 2개의 λ/2편광판 및 PBS는 두 기록빔의 세기비 및 편광상태를 조정하기 위해 사용되었다. 본 실험에서 두 빔의 편광상태는 포토폴리머의 입사평면에 대해 TE편광이 되도록 조정하였다. 기록하는 동안 노출시간에 따른 격자의 형성과정은 전기적 셔터(S) 및 광검출기 D_1 , D_2 , 그리고 컴퓨터를 통해 회절된 빔과 투과된 빔의 세기 데이터를 실시간으로 수집하였고, 이렇게 측정된 데이터를 이용하여 부피격자의 회절효율을 측정하였다. 일반적으로 포토폴리머의 회절효율 η 는 매질 및 유리기판 내부에서 흡수와 프레넬 반사에 의한 손실을 고려하여 매질 및 유리기판을 투과하는 총 빛의 세기에 대한 회절광의 세기비로 계산한다. 본 연구에서 사용된 홀로그래픽 포토폴리머 필름은 DuPont사의 HRF150-38/100 계열의 필름에 비해 굴절률 변조값이 크고 투과형 및 반사형 부피격자를 기록할 수 있는 두께가 20 μm 인 HRF600-20 필름을 이용하였다. 그리고 포토폴리머 지지용 유리기판은 532nm 파장에서 무반사 코팅된 BK7을 사용하였다.

그림 9는 두 입사빔의 세기비가 1:1이고, 포토폴리머 전단에서 두 입사빔의 세기를 0.05mW/cm², 0.1mW/cm², 0.15mW/cm², 0.2mW/cm², 0.3mW/cm², 0.4mW/cm²로 변화시키면서 200초 동안 노출시켰을 때 노출시간에 따른 회절효율 곡선이다. 반복 측정결과 HRF600-20 필름의 경우 두 입사빔의 세기가 0.15mW/cm² 근처에서 최대 98%이상의 효율을 얻을 수 있었다.

그림 10은 두 빔의 입사각을 변화시키면서 각도마다 5~10개 시료를 반복 측정한 후 이 중 특성이 좋은 5개 시료를 선택하여 그런 회절효율 곡선으로, 두 빔의 외부 입사반각은 20°에서 70°까지 10° 간격으로 변화시켜 측정하였다. 본 시료의 경우 외부 입사반각이 70°에서도 회절효율이 ~77.9%의 높은 회절을 유지함을 알 수 있다.

이러한 넓은 각에서 비교적 높은 회절효율을 유지하기 때문에 본 연구의 경우와 같이 비대칭 기록구조의 넓은 입사각을 갖는 VGC 설계 및 제작에 적합함을 알 수 있다.

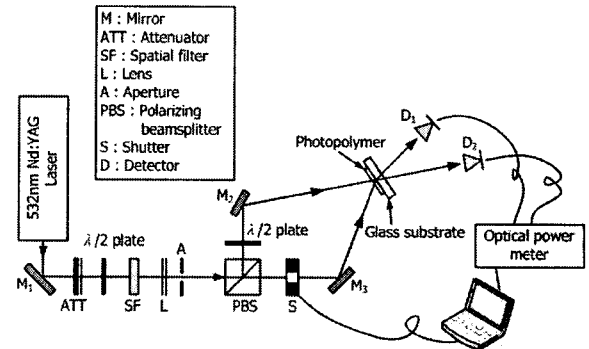


그림 8. 포토폴리머의 실시간 회절효율 측정을 위한 실험 구성도

Fig. 8. Experimental setup for measuring the real-time diffraction efficiency of photopolymer

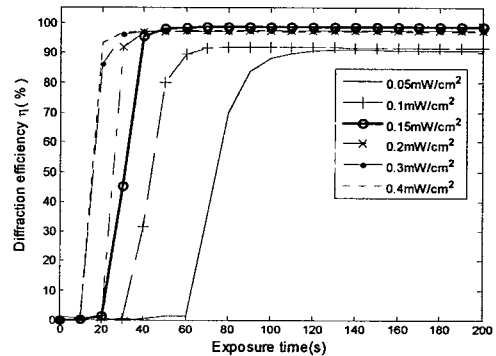


그림 9. 입사빔의 세기에 따른 회절효율

Fig. 9. Diffraction efficiency as a function of the incidence intensity

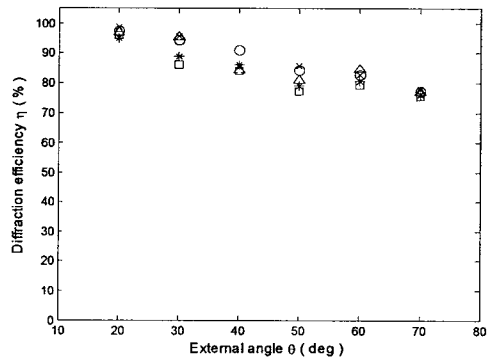


그림 10. 외부 입사각에 따른 회절효율

Fig. 10. Diffraction efficiency as a function of the external incidence angle

3.2 VGC 설계 및 제작

그림 11은 VGC를 제작하기 위한 실험 구성도이다. 기록광원은 파장이 532nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였으며 공간필터(SF), 렌즈(L) 및 사각형 조리개(A)의 조합을 이용하여 5mm × 5mm 평행광을 만들어 기록빔으로 사용하였다. 그리고 그림 8의 실험 구성도와 마찬가지로 2개의 λ/2 편광판 및 PBS 조합을 이용하여 입사빔의 세기비 및 편광상태(TE)를 조정하였다.

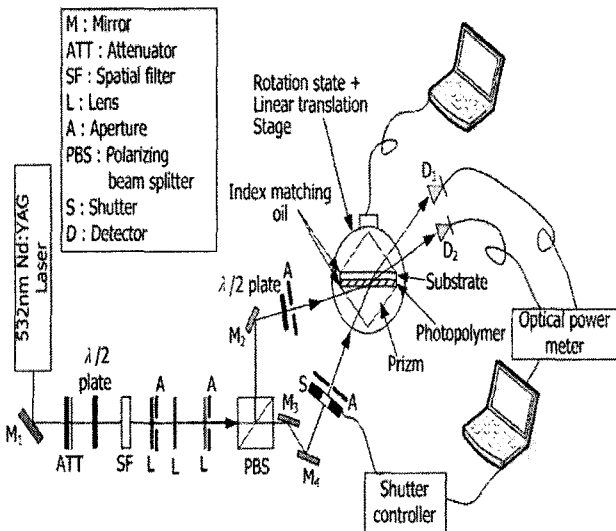


그림 11. VGC 제작을 위한 프리즘 시스템의 구성도
Fig. 11. Configuration of a prism system for the fabrication of VGC

두 기록빔의 각도는 0.001° 간격으로 제어 가능한 Newport사의 492CC 회전스테이지 및 ESP300 다축 제어기를 사용하여 기록각을 제어하였다. 그리고 x, y, z 세축을 제어할 수 있도록 선형이동 스테이지를 부착하여 프리즘에 의해 굴절된 두 빔이 포토폴리머의 기록면에 일치하도록 하였다. 또한 전기적 셔터(S) 및 광검출기 D₁, D₂를 통해 부피격자의 회절효율, 최적의 입사빔 및 세기비 조건, 노출시간 등을 결정하였다. 본 연구에서는 532nm 레이저로 제작된 VGC의 시험용 광원(판독빔)으로 632.8nm 및 1550nm 파장 대역의 레이저를 사용하기 위해, 그리고 비대칭형 45°격자를 효과적으로 기록하기 위해서는 프리즘에 입사되는 두 기록빔의 입사각이 가능하면 작아야 하기 때문에 실험 편의상 필름의 굴절률보다도 굴절률이 높은 SF2 프리즘 및 SF2 유리기판을 사용하였다. 사용된 45°-45°-90° 프리즘의 크기는 50 mm × 50 mm × 50 mm, 유리기판의 크기는 80mm×20mm×1.5mm이고, 기록된 간섭무늬에 영향을 미치는 기판-공기 경계면에서 반사를 최소화시키기 위해

유리기판 뒤에 또 다른 SF2 프리즘을 사용하였다. 그리고 서로 다른 굴절률을 갖는 프리즘-포토펠리머 및 유리기판-프리즘 경계면에는 굴절률이 1.6460 ± 0.002인 Cargille Labs.[20]의 굴절률 정합액을 사용하여 두 매질간의 굴절률을 일치시켰다. 격자 기록시 격자의 회절효율에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나인 기록빔의 세기비는 대칭구조의 경우 1:1로 조정하면 되나, 본 구조와 같은 비대칭 45° 기록구조에서는 기록면에서 두 기록빔의 크기가 다르게 되므로 빔의 크기에 따른 적절한 세기비를 결정하여야만 격자의 효율을 높일 수 있다. 본 연구에서는 가능한 여러 조건을 반복 실험한 결과 프리즘-포토펠리머 경계면에서 두 빔의 면적비, 그리고 각 매질에서 Fresnel 투과도 등을 고려하여 유도된 식 (21)을 이용하여 두 기록빔의 세기비를 결정하였다.

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = T \frac{\cos\theta_{w2} \cdot \cos\theta_{p2} \cdot \cos(\theta_{p1} - 45^\circ)}{\cos\theta_{w1} \cdot \cos\theta_{p1} \cdot \cos(45^\circ - \theta_{p2})} \quad (21)$$

$$T = \frac{T_2(\text{air-prism}) T_2'(\text{prism-photopolymer})}{T_1(\text{air-prism}) T_1'(\text{prism-photopolymer})} \quad (22)$$

여기서 P_{w1} 및 P_{w2}는 두 기록빔의 파워이고, T_{1,2} 및 T'_{1,2}는 서로 다른 두 매질의 경계면에서 두 기록빔의 투과도(transmission)를 나타낸다. 표 1의 기록조건 및 Fresnel 방정식으로부터 두 기록빔의 투과도는 T₁ = ~93.76%, T₂ = ~91.98%, T'₁ = ~98.24%, T'₂ = ~99.92%이고, θ_{p1} = ~51.821°, θ_{p2} = ~28.245°이므로 두 기록빔의 파워비는 ~1.324이다.

표 1은 1550nm 영역에서 동작하는 입·출력 VGC를 제작하기 위한 설계 파라메타 값이다.

표 1. VGC의 설계 파라메타 값

Table 1. Design parameters for VGC

VGC design Parameter	Value
Writing wavelength	532nm
Reading wavelength	1550nm
HRF600-20 film thickness(d)	20μm
Film writing index (n _{gw})	1.51
Film reading index (n _{gr})	1.5
SF2 Prism writing index (n _{pw})	1.6457@532nm
SF2 Substrate reading index (n _{sr})	1.6359@632.8nm 1.6131@1550nm
Angle of beam 1 in grating (θ _{g1})	58.951°
Angle of beam 1 in air (θ _{w1})	11.271°
Angle of beam 2 in grating (θ _{g2})	31.049°
Angle of beam 2 in grating (θ _{w2})	28.322°
Grating slant angle (φ _g)	45°
Grating period (Λ _g)	0.73068μm

여기서 기록각 θ_{w1} , θ_{w2} 는 격자의 경사각이 $\phi_o = 45^\circ$ 이고, 격자주기가 $\Lambda_o = 0.73068\mu m$ 일 때 수축을 고려하지 않고 계산된 값이다. 본 논문에서는 편의상 수축을 고려하지 않고 VGC를 제작한 다음, 제작된 VGC의 성능 평가 시에는 이러한 포토폴리머의 수축효과를 감안하여 각 파장에 따른 Bragg 각을 결정하였다.

그림 12는 1550nm 파장영역에서 제작된 VGC 소자의 성능을 평가하기 위한 실험구성도이다. 그림에서 입사빔의 편광상태는 $\lambda/2$ 편광판을 이용하여 조정하였고, 광검출기, UV파인더 및 CCD카메라를 이용하여 VGC를 빠져나온 출력신호를 검출하였다.

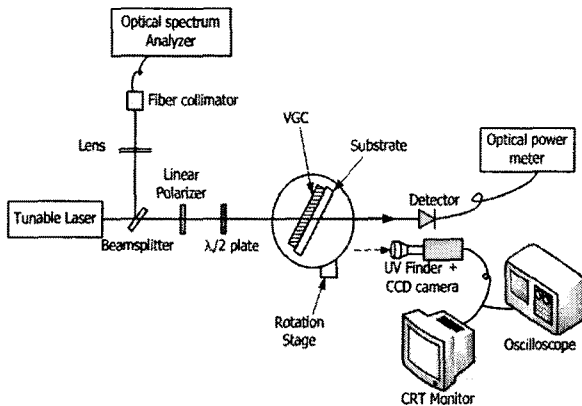


그림 12. $\lambda_r=1550nm$ 에서 VGC 성능평가 실험 구성도
Fig. 12. Experimental setup for testing the performance of VGC at $\lambda_r=1550nm$

3.2.1 632.8nm 동작 파장의 입·출력 VGC

먼저 VGC 기록 시스템의 성능 및 설계 변수 값 등의 교정을 위해 예비 실험 과정으로 632.8nm 파장 영역에서 동작하는 단일격자 및 격자쌍 VGC를 기록하여 테스트하였다. 실험에 사용된 단일격자(입력 VGC) 및 격자쌍(입·출력) VGC 시료는 격자간격이 $\Lambda_o = 0.5\mu m$, 격자의 경사각이 $\phi_o = 45^\circ$, 격자폭이 $w = \sim 6.5mm$ 이고, 격자쌍의 경우 그림 13과 같이 입·출력 VGC간의 간격이 $z_t = 3mm$, $h = 5mm$ 로 설계하였다. 이러한 조건에서 시료의 수축을 고려하지 않을 경우 외부 Bragg 각은 $\theta_B' = \sim 30.944$, 두 기록빔의 외부 입사각은 각각 $\theta_{w1} = \sim 19.491^\circ$, $\theta_{w2} = \sim 39.529^\circ$ 이고, 포토폴리머에서 입사각은 각각 $\theta_{g1} = \sim 65.629^\circ$, $\theta_{g2} = \sim 24.371^\circ$ 이다.

그림 14는 입·출력 VGC를 제작하기 전에 먼저 그림 11의 기록구조에서 포토폴리머의 노출시간에 따른 효율을 알아보기 위해 앞에서 언급한 기록각으로 포토폴리머를 노출시켜 측정한 노출시간에 따른 회절효율 곡선이다. 측정방법은 두 기록빔의 세기를 $0.126m W/cm^2$,

$0.083m W/cm^2$ 으로 고정하고 셔터(S)를 3초 주기로 on/off 될 수 있도록 컴퓨터로 프로그램화하여 300초 동안 회절된 빔의 세기를 실시간으로 광검출기를 통해 검출한 다음, UV광으로 노출하여 격자를 정착하고, 632.8nm 파장의 He-Ne레이저를 이용하여 격자의 회절효율을 측정하였다.

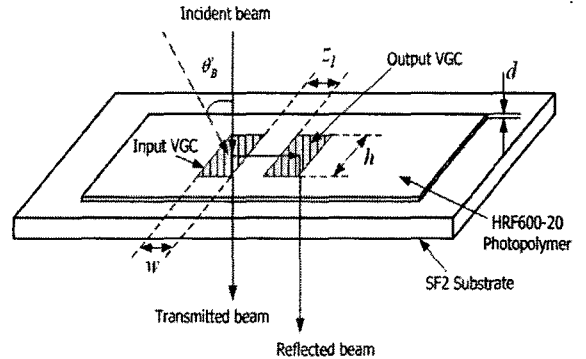


그림 13. 입·출력 VGC의 구조
Fig. 13. Configuration of the input-output VGC

그림 14의 측정시료의 경우 기록과정에서 최대효율은 75.4%이고, UV정착 후 Bragg각을 조정하여 측정한 최대 효율 값은 90.2%이다. 측정곡선의 형태가 대칭구조에서 측정한 곡선(그림 9)과는 달리 노출시간이 증가할수록 빠른 비율로 회절효율이 떨어지므로 VGC 기록 시에는 노출시간에 따른 회절효율을 실시간으로 모니터링하면서 기록하여야한다.

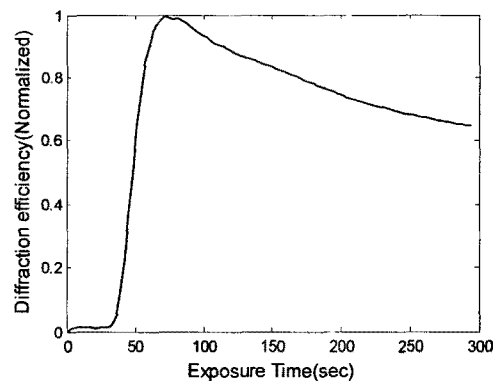


그림 14. 노출시간에 따른 회절효율
Fig. 14. Diffraction efficiency versus exposure time

그림 15은 앞에서 언급한 $\Lambda_o = 0.5\mu m$ 격자 기록조건으로 단일격자를 기록하고 UV 정착 후 632.8nm 파장의 He-Ne 레이저빔으로 측정한 입사각에 따른 투과빔의 세기 곡선이다. 이 시료의 경우 외부 입사각 31.68° 에서 격자의 투과도는 13.4%이고 나머지 86.6% 이상이 입력 VGC에 의해 커플링 되어 필름안으로 도파된다. 외부 입사 Bragg 각 31.68° 로 수축율을 계산하면

$\delta_p \sim 2.9\%$ 이고, 이 경우 격자의 경사각은 $\phi_s = 44.146^\circ$ 이고, 격자주기는 $\Lambda_s = \sim 0.49249\mu\text{m}$ 이다. 그리고 비대칭 실험구조에서 HRF600-20 포토폴리머 필름의 수축율을 측정기 위해 앞의 실험과 동일한 기록 조건으로 기록된 5개의 또 다른 시료의 외부 Bragg각을 측정하여 수축율을 계산하였다. 실험결과 본 시료의 수축율은 최소 $\sim 2.9\%$ 에서 최대 $\sim 3.86\%$ 까지 변화였다.

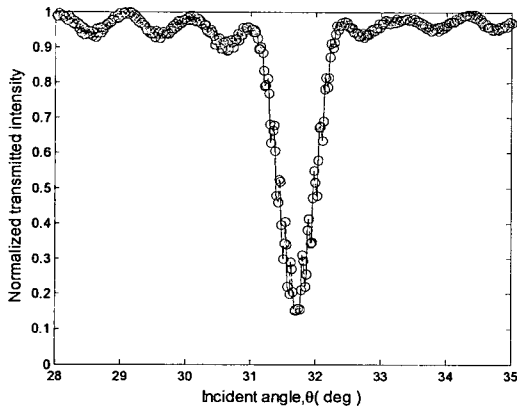


그림 15. 제작된 단일격자 커플러에서 입사각에 따른 투과빔의 세기

Fig. 15. Normalized transmitted intensity versus incident angle for the fabricated single-grating coupler

그림 16은 그림 15의 실험과 동일 조건에서 노출시간 조정 및 그림 11의 x, y축 선형이동 스테이지의 조정을 통해 3mm 간격으로 2개의 격자를 서로 다른 위치에 기록하여 제작한 격자쌍 VGC 시료의 출력 사진이다. 측정결과 이 시료의 경우 입력 커플러의 투과도는 $\sim 45.3\%$ 이고, 두 번째 격자의 출력 반사도는 $\sim 41.2\%$ 정도이다.

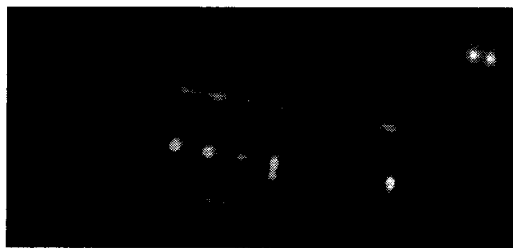


그림 16. 격자쌍 커플러의 출력사진

Fig. 16. Output photo of the grating-pair coupler

3.2.2 1550nm 동작 파장의 입·출력 VGC

1550nm에서 동작하는 1×2 VGC(한 개의 입력 커플러와 두 개의 출력 커플러를 갖는 구조) 시료는 격자간격이 $\Lambda_o = 0.73068\mu\text{m}$, 격자의 경사각이 $\phi_o = 45^\circ$, 격자폭이 $w = \sim 6.2\text{mm}$, 입출력 커플러간의 간격이 $z_l = 3\text{mm}$ 로 설계하였다. 그리고 이러한 조건에서 편의상 시료의 수축

율을 고려하지 않고 표 1의 설계 파라메타 값을 이용하여 기록하였다.

그림 17은 앞의 기록조건으로 입출력 VGC를 기록한 다음 그림 12의 구조에서 $\lambda/2$ 편광판을 변화시켜 2번째 출력 커플러로부터 반사되어 나온 빔을 측정할 출력 VGC의 편광의존성 실험측정값이다.

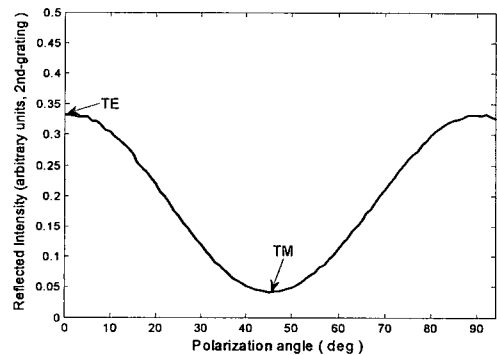


그림 17. 1550nm에서 출력 VGC의 편광의존성
Fig. 17. Polarization dependence of the output VGC operating at 1550nm.

이 결과는 Kogelnik 이론[11]에서 예측한바와 같이 1550nm 동작파장에서 TM 편광의 결합효율은 TE 편광에 비해 큰 폭으로 감소하기 때문에 통상 본 연구와 같은 도파로 구조에서는 TE편광을 사용한다.

그림 18은 1×2 입·출력 VGC 시료를 632.8nm 파장에서 측정할 입사각에 따른 각 VGC의 투과빔 및 반사빔의 세기를 나타낸 곡선이다. 그림에서 외부 Bragg 각 $\theta_B' = 46.5^\circ$ 이고, 이 경우 수축율은 $\sim 3.4\%$ 이다. 그리고 첫 번째 입력 VGC의 입력 결합효율은 $\sim 90.8\%$, 두 번째 출력 VGC의 반사율은 $\sim 41.9\%$ 세 번째 출력 VGC의 반사율은 $\sim 31.3\%$ 이다.

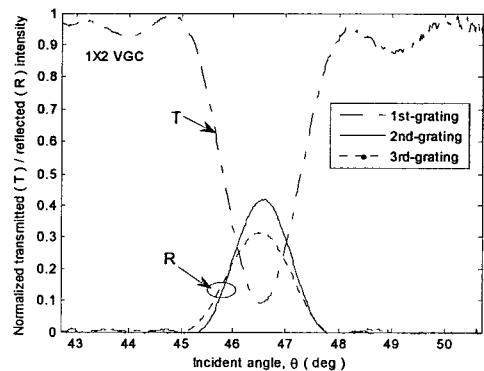


그림 18. 제작된 1×2 입·출력 VGC의 632.8nm에서 입사각에 따른 투과빔 및 반사빔의 세기

Fig. 18. Normalized transmitted-reflected intensity versus incident angle for the fabricated 1×2 input-output VGC at 632.8nm

그림 19는 그림 12의 1550nm 성능평가 실험 구성도에 서 외부 Bragg 입사각이 2.652°일 때 획득한 오실로스코 프 파형 및 모니터 출력 사진이다.

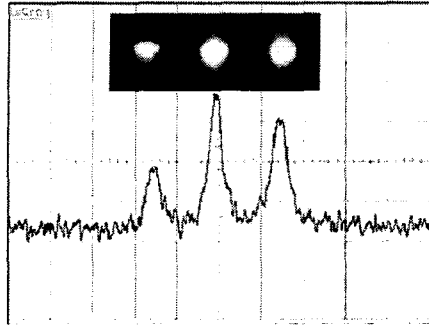


그림 19. 1550nm에서 1×2 입·출력 VGC의 모니터 영상 및 출력파형

Fig. 19. Monitor image and output waveform of the 1×2 input-output VGC operating at 1550nm

IV. 결론

본 논문에서는 DuPont사의 HRF600-20 포토폴리머 필름을 이용하여 격자의 경사각이 45°이고, 632.8nm 및 1550nm 파장 영역에서 동작하는 도파로 삽입형 입·출력 VGC를 제안하고 실험적으로 입증하였다. 실험결과 632.8nm 파장 영역에서 동작하는 격자간격이 $\Lambda_0 = 0.5\mu\text{m}$, 격자의 경사각이 $\phi_0 = 45^\circ$, 격자폭이 $w = \sim 6.5\text{mm}$ 인 단일격자를 갖는 입력 VGC 시료의 경우 외부 입사각 31.68°에서 격자의 투과도는 13.4%이고 나머지 86.6% 이상이 입력 VGC에 의해 커플링 되어 필름 안으로 도파됨을 확인하였다. 그리고 동일한 기록조건에서 입출력 VGC는 노출시간 및 선형이동 스테이지를 조정하여 3mm 간격으로 2개의 격자를 서로 다른 위치에 기록하여 제작하고 특성을 분석하였다. 또한 이러한 632.8nm 동작파장에서의 실증을 통해 1550nm 파장영역에서 동작하는 1×2 입·출력 VGC를 제작하고 평가함으로써 도파로형 광연결 구조뿐만 아니라 광통신 영역의 소자로도 효과적으로 응용 가능성을 입증하였다. 그러나 본 연구에서는 기록광원으로 532nm 레이저를 사용한 관계로 광 PCB용 광연결에 다소 부적합한 SF2 기판을 사용하였으나, 향후 더 짧은 파장의 기록 광원 및 필름의 굴절률을 보다 낮은 굴절률을 갖는, 예를 들면 용융 실리카 유리 등의 기판을 이용하고 액체 타입의 포토폴리머를 사용한다면 더 효과적이고 실제 응용 가능한 광연결 VGC를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 광학과 기술-광연결특집, 한국광학회, Vol. 9, No. 3, 2005.
- [2] S. M. Schultz, High efficiency volume grating coupler, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [3] J. W. Goodman, "Optics as an interconnect technology" in Optical processing and Computing, Academic Press, Inc., pp. 1-32, 1989.
- [4] S. Piazzolla, Real time effects in volume holographic materials for optical storage, copying, and optical neural network, PhD thesis, Univ. of Southern California, 1997.
- [5] M. R. Feldman, et al., "Comparison between holographic and guided wave interconnects for VLSI and multiprocessor systems," in Design Issues in Optical processing, Ed. John N. Lee, Cambridge Univ. Press, Chapter 4, pp. 137-168, 1995.
- [6] F. Lin, et al., "Optical multiplanar VLSI Interconnects based on multiplexed waveguide holograms," Appl. Opt., Vol. 29, No. 8, pp. 1126-1133, 1990.
- [7] E. N. Glytsis, et al., "Substrate-embedded and flip-chip-bonded photodetector polymer-based optical interconnects : analysis, design, and performance," J. Lightwave Tech., Vol. 21, pp. 2382-2394, 2003.
- [8] W. Y. Wang and T. J. Dilauro, "Bragg effect waveguide coupler analysis," Appl. Opt., Vol. 16, No. 12, pp. 3230-3236, 1977.
- [9] L. Gu, X. Chen, Z. Shi, and R. T. Chen, "Bandwidth-enhanced volume grating for dense wavelength-division multiplexer using a phase-compensation scheme," Appl. Phys. Lett., Vol. 86, No. 18, pp. 1103-1105, 2005.
- [10] Z. Shi, L. Gu, B. Howley, Y. Jiang, Q. Zhou, and R. Chen., "Tru-time-delay modules based on a single tunable laser in conjunction with a waveguide hologram for phased array antenna," Opt. Eng., Vol. 44, No. 8, pp. 4301-4307, 2005.
- [11] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," Bell Syst. Tech. Jour., Vol. 48, pp. 2909-2947, 1969.
- [12] L. Solymar, "A general two-dimensional theory for volume holograms," Appl. phys. Lett., Vol. 31, No. 12, pp. 820-822, 1977.

[13] L. Solymar and M. P. Jordan, "Finite beams in large volume holograms," *Microwaves Opt. & Acoust.*, Vol. 1, No. 3, pp. 89-92, 1977.

[14] K. K. Svidzinskii, "Optical properties of specially shaped waveguide diffraction gratings," *Sov. J. Quantum Electron.*, Vol. 11, No. 10, pp. 1323-1327, 1981.

[15] P. St. J. Russell and L. Solymar, "The properties of holographic overlap gratings," *Optica Acta*, Vol. 26, No. 3, pp. 329-347, 1979.

[16] P. St. J. Russell, "Optical volume holography," *Physics Reports (Review Section of Physics Letters)*, Vol. 71, No. 4, pp. 209-312, 1981.

[17] R. P. Kenan, "Theory of crossed-beam diffraction gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. Qe-14, No. 12, pp. 924-930, 1978.

[18] M. L. Jones, et al., "Rectangular Characteristic gratings for waveguide input and output coupling," *Appl. Optics*, Vol. 32, No. 20, pp. 4149-4158, 1995.

[19] C. Zhao, et al., "Shrinkage-corrected volume holograms based on photopolymeric phase media for surface-normal optical interconnects," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, No. 11, pp. 224-229, 1997.

[20] <http://www.cargille.com>



이권연(Kwon-Yeon Lee)

1986년 2월 연세대 전자공학과(공학사)
 1988년 8월 연세대 전자공학과
 (공학석사)
 1995년 8월 연세대 전자공학과
 (공학박사)

1996년 3월 ~ 현재 순천대 전자과 교수
 ※ 주관심분야 : 광정보처리, 홀로그래픽 광소자, 3-D 광 디스플레이 시스템, 광메모리 시스템



정상혁(Sang-Huek Jeung)

2003년 2월 순천대 전자공학과(공학사)
 2005년 2월 순천대 전자공학과
 (공학석사)

2005년 3월~현재 순천대 박사과정 재학
 ※ 주관심분야 : 광정보처리, 홀로그래피, 광섬유 센서, 레이저 거리계



조병모(Byung-Mo Cho)

1982년 2월 인하대 전자공학과(공학사)
 1984년 2월 연세대 전자공학과(공학석사)
 1991년 2월 연세대 전자공학과(공학박사)
 1991년 3월 ~ 현재 순천대 전자과 교수

※ 주관심분야 : Digital Signal Processing, Multirate/SubBand Signal Processing



손명식(Myung-Sik Son)

1992년 2월 중앙대 전자공학과(공학사)
 1995년 2월 중앙대 전자공학과(공학석사)
 1999년 2월 중앙대 전자공학과(공학박사)
 2005년 2월~현재 순천대 전자과 조교수

※ 주관심분야 : 반도체 공정/소자/회로 모델링 및 시뮬레이션, 안테나 및 RFIC 집적회로 설계



전석희(Seok-Hee Jeon)

1981년 2월 연세대 전자공학과(공학사)
 1983년 2월 연세대 전자공학과(공학석사)
 1990년 2월 연세대 전자공학과(공학박사)
 1991년 8월 ~ 현재 인천대 전자과 교수

※ 주관심분야 : 광정보처리, 광보안알고리즘, 3-D 광 디스플레이 시스템, 광메모리 시스템