《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 2, April 2020, pp. 105-110
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.105
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Design and Analysis of a Red-Green-Blue Beam Combiner Based on Multimode Waveguides

Youngchul Chung†

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, 20, Gwangun-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, Korea

(Received January 6, 2020; Revised February 18, 2020; Accepted February 19, 2020)

A compact beam combiner based on two-mode interference (TMI) in multimode waveguides is proposed, and its feasibility is shown through simulation with the three-dimensional beam propagation method. The input waveguides are separated by about 1 μm at the interface with the multimode waveguide, so that the fabricated waveguide pattern is well repeated. The power transmission to the output port from the red, green, and blue input port is 93.5%, 94%, and 93%, respectively. When the wavelength deviation from a center wavelength is 10 nm, the power transmission is maintained to be greater than 90%. When the waveguide width error is 40 nm, the power transmission is maintained to be greater than 85% for all the three colors. The polarization dependence of the beam combiner is almost negligible, and its size is as tiny as 0.02×4 mm^2.

Keywords: Red-green-blue beam combiner, Multi-mode waveguide, Two-mode interference, Integrated optics, Pico-projectors
OCIS codes: (130.3120) Integrated optics devices; (230.7390) Waveguides, planar; (060.4230) Multiplexing; (090.2820) Heads-up displays

다중 모드 도파로를 이용한 적녹청 빔 합파기 설계 및 분석

정영철†

광운대학교 전자통신공학과
㊞ 01897 서울특별시 노원구 광운로 20

(2020년 1월 6일 받음, 2020년 2월 18일 수정본 받음, 2020년 2월 19일 게재 확정)

다중 모드 도파로에서 두 모드 간섭(TMI)에 기반한 소형 빔 합파기가 제안되었으며, 그 가능성을 삼차원 BPM (beam propagation method) 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 다중 모드 도파로와 접할 때, 입력 도파로들은 약 1 μm 정도 분리되어 있기 때문에 제작 공정 후의 도파 구조 패턴의 재현성이 우수하다. 적색, 녹색 및 청색 입력 포트에서 출력 포트로의 파워 전달은 각각 93.5%, 94% 및 93%로 계산되었다. 각 색상의 파장 편차가 10 nm인 경우, 투과율은 90%보다 크게 유지되었고, 도파로 폭의 편차가 40 nm 정도일 때, 85% 이상의 파워 전달을 유지함을 알 수 있다. 또한, 제안된 합파기는 편광의존성이 거의 없으며, 0.02×4 mm^2 정도의 크기로 작게 구현될 수 있다.

Keywords: 적녹청 빔 합파기, 다중 모드 도파로, 두 모드 간섭, 집적광학, 피코 프로젝터
OCIS codes: (130.3120) Integrated optics devices; (230.7390) Waveguides, planar; (060.4230) Multiplexing; (090.2820) Heads-up displays

I. 서 론

스마트폰용 디스플레이는 OLED (organic light emitting diode) 또는 LCD 디스플레이와 같이 100 cm^2 정도의 작은 면적의 평면 패널 형태이다. 따라서 대형 이미지 디스플레이를 위한 휴대용 프로젝터 장치(소위 피코 프로젝터)가 많은 관심을 끌고 있다. 피코 프로젝터를 통하여 벽이나 종이에 대형 영상을 투사할 수 있다. 더구나, 레이저 스캔 피코 프로젝터는 무한 초점 성능을 나타내기 때문에, 울퉁불퉁한 프로파일의 표면에 이미지를 투영할 수 있게 한다.

모바일 프로젝터, 안경형 프로젝터, 헤드 마운트(head-mount) 디스플레이, 헤드업(head-up) 디스플레이 및 가상 망막(virtual-retina) 디스플레이와 같은 피코 프로젝터는 광범위하게 연구되고 있다[1,2]. 특히, 아이웨어(eyewear) 프로젝터 또는 헤드

†E-mail: ychung@kw.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2460-2618
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

마운트 디스플레이가 장착된 웨어러블 컴퓨터가 활발하게 개발되고 있다. 이러한 모바일 시스템에서는 실제 컴퓨터에서 생성된 시각적 정보를 오버레이하고 핸즈프리 방식으로 즉시 정보를 제공할 수 있다[3]. 따라서 안경형 프로젝터와 같은 소형 프로젝터는 웨어러블 컴퓨터로 증강 현실(augmented reality, AR)의 새로운 패러다임을 열어 다양한 분야에 유용한 도구를 제공할 수 있다[4]. 소형 피코 프로젝터는 LED 조명이 장착된 LCD (액정 디스플레이)를 사용하여 실현한 후에, 이를 헤드마운트 디스플레이에 적용할 수 있지만[5], 눈에 쉽게 초점을 맞추기 위해서는 매우 정확한 렌즈 시스템이 장착되어야 한다. 반면 레이저 스캔 이미지 프로젝터는 헤드마운트 디스플레이에 쉽게 적용될 수 있다[6-8]. 레이저 스캔 이미지 프로젝터는 레이저 다이오드 광원, RGB (red-green-blue) 빔 합파기 및 레이저 스캐너로 구성된다. 레이저 광원의 RGB 색상은 RGB 빔 합파기를 통하여 백색 빔이 되고, 복잡한 초점 렌즈 시스템을 사용하지 않더라도 레이저 스캐너로 화면에 스캔되어 컬러 이미지를 얻을 수 있다.

운전자가 시선을 약간 이동함으로써 자동차 속도 또는 기타 정보를 인식할 수 있도록 하는 헤드업 디스플레이(head-up display, HUD)를 자동차 산업에 도입하려는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 동시에 복잡한 데이터를 처리하고 위치를 인식할 수 있는 스마트폰이 등장하면서 AR 기술은 점점 더 실용적으로 실생활에 다가오고 있다. 일부 AR HUD 내비게이션 시스템에서 운전자의 전면 배경 정보에 AR 정보가 겹쳐지는 디스플레이를 제공하고 있다[9,10].

기존의 RGB 빔 합파기에서는 크기를 줄이는데 한계가 있는 복잡한 렌즈 및 미러 시스템이 필요하다. 최근에는 특별히 설계된 방향성 결합기가 적절하게 연결된 매우 작은 집적 도파로 형 RGB 빔 합파기가 제안되었다[11]. 본 논문에서는 다중 모드(multimode) 도파로에서 두 모드 간섭(two-mode interference, TMI) 효과[12,13]에 기초한 새로운 소형 집적 도파로 형 RGB 빔 결합기 구조를 제안한다. 이 빔 합파기는 TMI 현상을 이용한다는 면에서 기존에 보고된 빔 합파기와 원리가 동일하지만[14], 두 모드 도파로 대신에 다중 모드 도파로를 사용한다는 면에서 차별점이 있다. 두 모드 도파로를 사용하는 경우에는, 입력단 및 출력단의 두 도파로가 약 1° 이하의 각도를 유지하면서 두 모드 도파로와 접하는 형태를 유지해야 입력 도파로 부분의 우모드와 기모드가 두 모드 도파로의 우모드와 기모드로, 두 모드 도파로의 두 모드가 출력 도파로 영역의 두 모드로 손실없이 서서히 천이되어서 전체 TMI 구조 상에서 손실이 최소화되게 된다. 입력 또는 출력 도파로 영역의 두 도파로가 두 모드 도파로와 만나는 순간에서만 접하는 것이 이상적이지만, 제작 공정 과정에서 두 입력 또는 출력 도파로 사이의 영역이 메워지는 현상이 종종 발생하게 된다. 결과적으로 제작된 소자의 삽입 손실이 1~2 dB 정도 추가적으로 발생하고, 중심 파장에 대한 재현성이 저하될 우려가 상존한다. 본 논문에서 제시하는 구조는 다중 모드 도파로에 접하는 입력 및 출력 도파 영역의 두 도파로가 1 μm 이상 분리되도록 설계하여, 포토리소그래피를 통한 패턴 형성 과정에서 재현성이 우수하고, TMI 현상은 입출력 도파로 영역에서는 거의 발생하지 않고, 다중 모드 도파로 영역에서만 발생하도록 하였다. 다중 모드 도파로의 최저차 우모드와 기모드의 전파 상수의 파장 의존성은 서로 상이하며, 두 모드를 적절히 균형있게 여기시키는 경우에 파장 변화에 따른 두 모드 사이의 위상 차이가 π 또는 2π가 됨에 따라서 좌측 또는 우측에 입력 빔의 이미지가 발생하게 된다. 이와 같은 성질을 이용하면, 다중 모드 도파로의 길이를 적절히 설정하는 경우 특정 파장의 두 빔을 합파(또는 다중화) 또는 분리(역다중화)할 수 있다. 입출력 도파로의 위치를 적절히 조절하여 최저차 우모드와 기모드만을 균형적으로 여기하여야 한다.

II장에서는 소자의 구조 및 동작 원리에 대해 설명한다. III장에서, RGB 빔 합파기의 설계 예가 제시되고 빔 결합 성능을 삼차원 BPM 시뮬레이션에 의해 확인한다. 파장 편차에 따른 빔 합파기의 성능 저하를 확인하고, 제조 공정에서 불가피하게 발생할 가능성이 있는 도파로 폭 편차의 영향도 조사한다. 마지막으로 결론을 제시한다.

II. 소자 구조 및 동작 원리

그림 1에 RGB 빔 분파기/합파기의 기본 구조인 다중 모드 TMI 빔 분파기/합파기를 보였다. 입력 및 출력 도파로는 S자 곡선 형태이며, TMI가 발생하는 영역은 두 개 이상의 모드들이 도파하는 다중 모드 도파로로 구성되어 있다. 다중 모드 도파로에 접속되는 입출력 도파로 간격은 1 μm 이상이 되도록 하여 제작 공정에서 재현성이 유지되도록 고려하였다. 입출력 도파로의 위치를 적절히 조절하여, 다중 모드 도파로의 기본 우모드와 차 상위 기모드를 대부분 발생시키고, 상위 모드들은 최대한 억제하여야 한다. 또한 입출력 도파로들 사이 간격은 1 μm 이상으로 유지되기 때문에 입출력 도파로들 사이의 광 결합(우모드와 기모드의 간섭)은 거의 발생하지 않고, 두 모드 간섭은 다중 모드 도파로에서 대부분

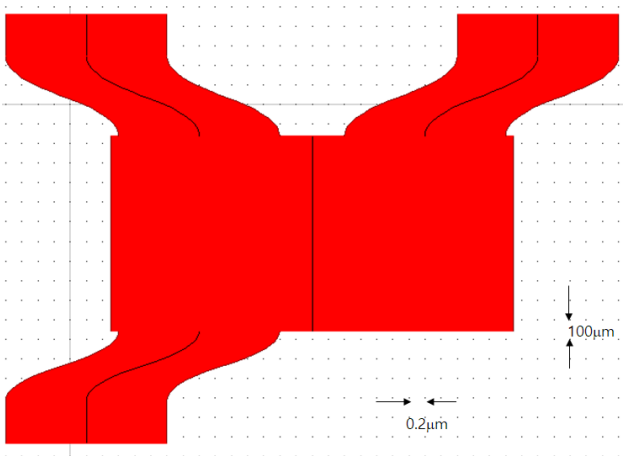


Fig. 1. Dual-color two-mode interference beam combiner (multiplexer) composed of a multi-mode waveguide.

발생하도록 한다.

다중 모드 도파로에 여기된 기본 우모드와 차 상위 기모드는 상이한 전파상수($\beta_s \neq \beta_o$)를 갖기 때문에, 길이가 L_M인 다중 모드 도파로를 지나는 과정에서 두 모드 사이의 위상차($\phi = (\beta_s - \beta_o)L_M$)가 축적된다. 이 위상차에 의하여 bar 상태와 cross 상태로의 광 파워 전달은 다음과 같다.

$$P_{=}/P_{in} = 2(\alpha_s\alpha_o)\cos^2(\phi/2) + (\alpha_s - \alpha_o)^2/2 \quad (1a)$$

$$P_{\times}/P_{in} = 2(\alpha_s\alpha_o)\sin^2(\phi/2) + (\alpha_s - \alpha_o)^2/2 \quad (1b)$$

여기서 α_s는 여기된 우모드의 진폭 비율이고, α_o는 기모드의 진폭 비율이다. 이에 대한 일반적인 논의는 [12,13]에 있다. 두 모드의 전파상수가 파장에 따라 변화하기 때문에, 축적된 위상차는 파장에 따라 변화한다. 두 모드의 전파상수가 파장에 따라 변화하는 요인은 도파로 구성 물질의 굴절률이 파장에 따라 변화함으로 인한 물질 분산 특성과 더불어 도파 구조 자체로부터 발생하는 도파로 분산 특성에 기인한다. 두 모드가 동일하게 여기된다고 가정하면 bar 상태와 cross 상태로의 광 파워 전달은 다음과 같이 간략해진다.

$$P_{=}/P_{in} = \cos^2(\phi/2) \quad (2a)$$

$$P_{\times}/P_{in} = \sin^2(\phi/2) \quad (2b)$$

여기서 두 모드 사이 위상차의 파장에 따른 변화는 다음 식과 같다[15].

$$\phi(\lambda) = (\beta_s - \beta_o)L_M = \frac{3\pi}{4W_e^2}\frac{\lambda}{n_{eff}(\lambda)}L_M \quad (3a)$$

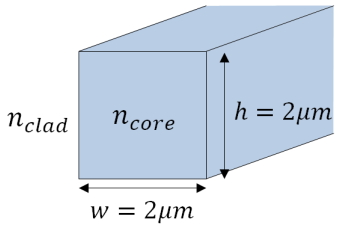
$$W_e = W_M + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)\left(\frac{n_{clad}}{n_{eff}}\right)^{2\sigma}\left(n_{eff}^2 - n_{clad}^2\right)^{-1/2} \quad (3b)$$

(TE 모드의 경우 $\sigma = 0$, TM 모드의 경우 $\sigma = 1$)

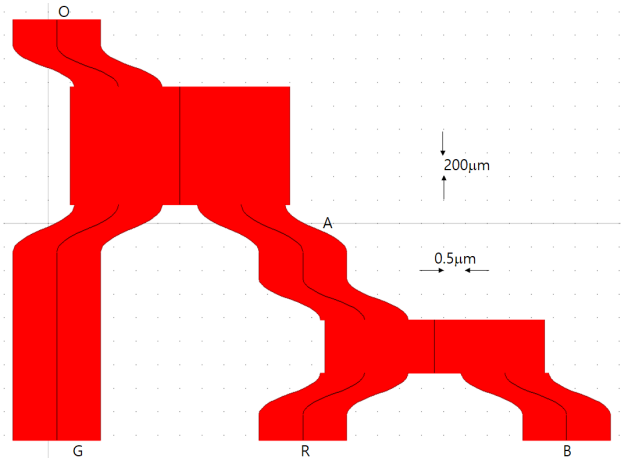
여기서 n_{eff}는 도파로 코어 영역에서의 유효굴절률이고, n_{clad}는 코어를 둘러싼 클래딩 영역의 굴절률이다. 도파로 재료인 석영의 경우 청색에서 적색으로 0.3 μm 정도 파장이 변화함에 따라서 약 0.02 정도 굴절률이 감소하고, 그 결과 n_{eff}도 파장에 따라 변화하기 때문에 식 (3a)에서 n_{eff}를 파장의 함수로 표현하였다. 식 (3a)에서 보듯이 위상 차이 $\phi(\lambda)$는 파장에 대체적으로 비례한다. 다중 모드 도파로의 길이 L_M을 적절히 조절하여, 청색과 적색은 $P_{=}/P_{in} = 1$, $P_{\times}/P_{in} = 0$인 조건을 만족하고, 녹색은 $P_{=}/P_{in} = 0$, $P_{\times}/P_{in} = 1$인 조건을 만족하게 되는 경우, bar 출력단으로는 청색과 적색이 출력되고, cross 출력단에서는 녹색이 출력되도록 할 수 있다. 즉, 그림 1을 상하 대칭 이동하여 왼쪽 입력 도파로로 청색과 적색이 같이 입사하고, 다른 입력 도파로로 녹색이 입사하는 경우, RGB 합파 결과를 얻을 수 있게 된다. 약 반 정도 길이의 다중 모드 도파로로 구성된 합파기 구조를 이용하는 경우 청색과 적색을 합파할 수 있다.

III. 설계 및 시뮬레이션

제작 오차에 강건한 RGB 빔 분파기/합파기 설계의 예로서, 그림 2에 보인 바와 같은 구조를 고려한다. 광 도파로는 그림 2(a)에 보인 바와 같이 사각형 단면의 채널 도파로를 채택하였다. 채널 도파로의 폭(w_1) 및 높이(h)는 각각 2 μm이다. 본 논문에서 제안하는 RGB 빔 분파기/결합기 도파구조의 설계 예로서, 도파로 구조를 그림 2(b)에 도시하였다. 이 빔 합파기 구조의 크기는 0.02×4 mm^2 정도로 매우 작다. 아래 합파기에서는 다중 모드 도파로의 길이를 450 μm로 하여 적색(R)과 청색(B)을 합파하도록 설계하였다. 합파된 적색과 청색은 다중 모드 도파로 길이가 1000 μm인 상단의 합파기를 통하여 녹색과 추가적으로 합파되는 구조이다. 그림에서 보는 바와 같이, 다중 모드 도파로와 S자형 출력 도파로들이 만나는 지점에서 도파로 간의 간격은 1 μm로서, 두 도파로 사이에서는 거의 광 파워의 결합이 이루어지지 않도록 하였다. 또한 다중 모드 도파로에서 우모드와 기모드가



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Channel waveguide of square cross-section. (b) Layout of the proposed red-green-blue beam combiner composed of multi-mode waveguides. Two dual-color beam combiners are cascaded. Red, green, and blue colored beams launched into ports R, G, and B, respectively, are combined towards port O.

균형있게 여기되도록 도파로의 위치를 적절히 조절하였다. 석영 클래딩의 굴절률은 다음과 같이 파장 λ(μm)에 따라 변한다[16].

$$n_{clad} = 1.522 - 0.065(\lambda - 0.4) \tag{5}$$

코어 유리 재료의 굴절률은 $n_{core} = n_{clad} + 0.015$로 설정된다. 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 0.015이므로 폭이 5 μm인 다중 모드 도파로의 경우, 파장이 0.4 μm일 때는 횡방향 V 파라미터($V = (2\pi w_M/\lambda)\sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$) 값이 16.7 정도로 5개의 모드를 도파시키고, 파장이 0.7 μm일 때는 V값이 약 9.5이므로 3개의 모드를 도파시킨다. 재료 분산 특성은 식 (5)에 따른 굴절률의 변화로 반영되고, 도파로 분산 특성은 BPM (beam propagation method) 시뮬레이션 과정에서 자연스럽게 반영된다.

포트 R에서 A, 포트 B에서 A로의 파장에 따른 파워 전달을 삼차원 BPM (RSoft BeamPROP 소프트웨어)을 사용하여 계산하였으며, 그 결과를 그림 3(a)에 나타내었다. 중앙 입력 도파로(포트 R)로 입사된 적색(640 nm)과 오른쪽 도파로(포트 B)로 입사되는 청색(460 nm)은 포트 A에 결합되어 출력될 것임을 알 수 있다. 포트 G에서 O, 포트 A에서 O로의 파장에 따른 파워 전달은 그림 3(b)에 나타내었다. 왼쪽 도파로(포트 G)로 입사된 녹색 빔(540 nm), 포트 A로 들어가는 청색(460 nm) 및 적색(640 nm) 빔은 포트 O에서 결합되어 출력된다. R, G, B 포트로 입사하는 각각의 경우에, 전체 RGB 빔 결합기를 통과하는 광파의 파장에 따른 파워 전달 특성을 그림 3(c)에 나타내었다. 입력 포트 G로 입사된 녹색(540 nm), 포트 R로 입사된 적색(640 nm) 및 포트 B로 입사된 청색(460 nm)은 출력 포트 O에서 결합되어 출력됨을 알 수 있다. 해당 입력 포트에서 460 nm, 540 nm 및 640 nm의 출력 포트(O)로의 전송은 각각 93%, 94% 및 93.5%이다. 각각의 해당 입력 포트에 입사된 청색, 녹색 및 적색 빔의 전파에 대한 BPM 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 각각의 입력 포트로 입사된 녹색, 적색 및 청색 빔이 출력 포트 O로 결합되어 전달됨을 알 수 있다.

RGB 광원의 파장은 RGB 설계 및 제작된 빔 결합기의 RGB 중심 파장에서 벗어날 가능성이 있으며, 파장 편차에 따른 성능 저하 정도를 확인하기 위하여 그림 3(c)의 최대

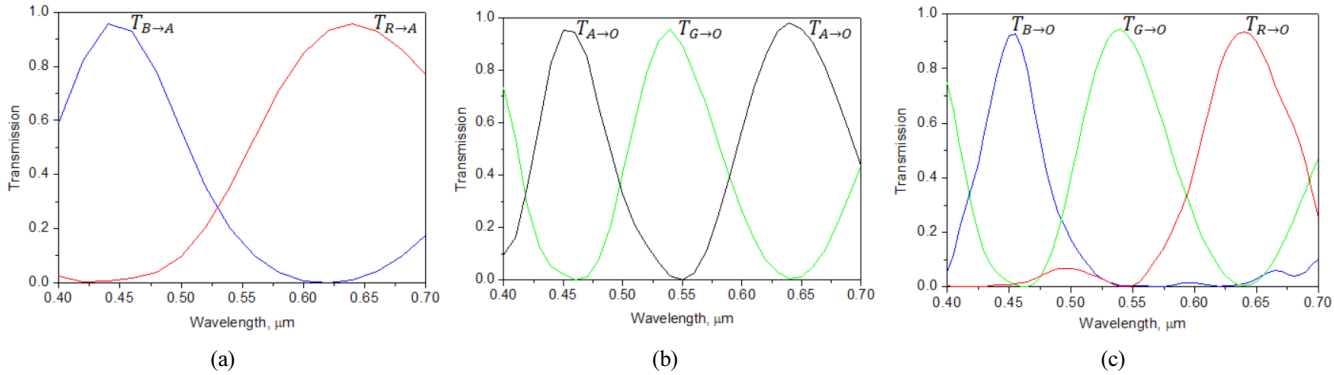


Fig. 3. (a) Power transmissions versus wavelength from port B to A and from port R to A. (b) Power transmissions versus wavelength from port A to O and from port G to O. (c) Overall RGB beam combiner transmissions (R to O, G to O, and B to O) calculated using the 3-dimensional beam propagation method.

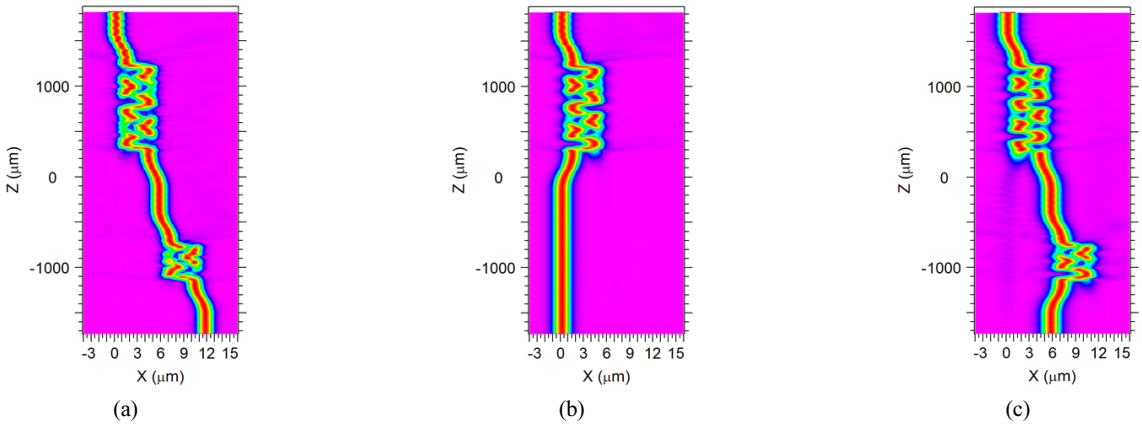


Fig. 4. BPM simulation results for (a) blue (440 nm), (b) green (540 nm), and (c) red (640 nm) beams launched into the corresponding input ports.

파워 전달 영역을 확대하여, RGB 중심 파장으로부터의 파장 편차의 함수로 그림 5에 나타내었다. ±10 nm의 파장 편차가 발생할 때, 적색과 녹색의 경우 90% 이상, 청색의 경우 80%

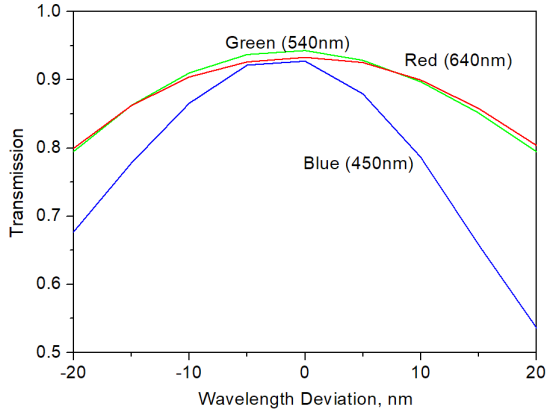


Fig. 5. Enlarged view of the peak transmission regions in Fig. 3(c) as a function of the wavelength deviation from RGB center wavelengths.

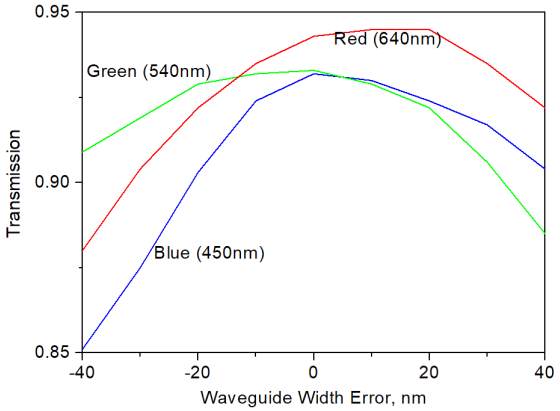


Fig. 6. Variation of power transmissions versus waveguide width error.

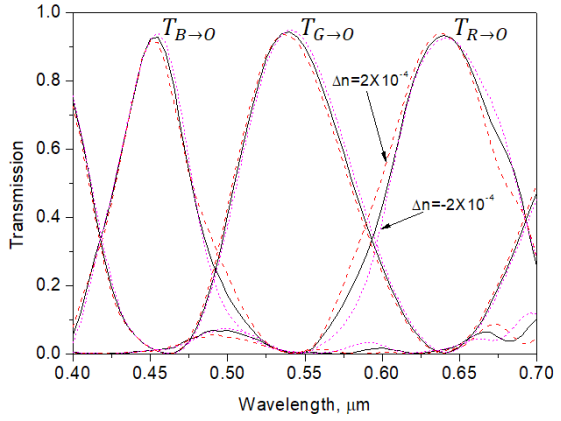


Fig. 7. Overall RGB beam combiner transmissions (R to O, G to O, and B to O) for polarization-dependent refractive index variations ($\triangle n$ = ±2 × 10^{-4}).

이상의 파워 전달이 유지됨을 알 수 있다. 제작 공정에서 도파로 폭 오차는 불가피하게 발생할 수 있기 때문에 도파로 폭 오차의 영향도 확인할 필요가 있다. 도파로 폭 오차에 대한 광 파워 전달 변화를 그림 6에 나타내었다. 도파로 폭 편차가 ±40 nm 발생할 때 적색, 녹색, 청색의 경우 모두 85% 이상의 광 파워 전달을 유지함을 알 수 있다.

일반적으로 TE 모드와 TM 모드의 유효 굴절률 차이를 최소화하기 위하여, 그림 2(a)에 보인 바와 같이 도파로의 단면 구조를 정사각형으로 설계하게 된다. 그런 경우에도 도파로 제작 공정상의 스트레스가 존재하게 되고 TE 모드와 TM 모드가 느끼는 굴절률이 차이가 나는 복굴절이 발생할 수 있다. 이 굴절률 차이는 보통 0.5~1 × 10^{-4} 정도로 관측된다[17]. 이에 따른 TE 모드와 TM 모드의 RGB 빔 합파기 특성 변화를 확인하기 위하여, 편광에 따른 굴절률의 차이가 $\triangle n = \pm 2 \times 10^{-4}$인 경우에 대한 투과 특성을 BPM으로 계산하여 그림 7에 나타내었다. 제안한 RGB 빔 합파기에서는 통상적으로 발생하는 복굴절의 경우 투과 특성이 거의 동일하여, 편광의존성을 무시할 만함을 알 수 있다.

IV. 결 론

다중 모드 도파로에 최저차 우모드와 기모드를 여기하여, 이 두 모드 간의 간섭(two-mode interference, TMI)을 이용한 RGB 빔 결합기를 제안하고, 설계 예 및 삼차원 BPM 시뮬레이션을 통하여 실현 가능성을 보였다. 이 소자에서는 입력 도파로들이 다중 모드 도파로와 접하는 지점에서 서로 분리되어 있기 때문에 TMI 현상이 다중 모드 도파로에서만 발생하고, 입력 도파로 영역에서는 거의 발생하지 않는다. 따라서 중심파장은 다중 모드 도파로의 길이에 의해서만 결정되어 설계가 단순하다. 첫 단계의 다중 모드 도파로에서 청색(440 nm) 및 적색(640 nm) 빔이 결합된 후, 다음 단계의 다중 모드 도파로 TMI 결합기에서 녹색(540 nm) 빔과 추가적으로 결합된다. 440 nm, 540 nm 및 640 nm 파장의 해당 입력 포트에서 출력 포트로의 파워 전달은 각각 93%, 94% 및 93.5% 이다. 파장 편차가 ±10 nm 발생할 때, 적색과 녹색의 경우 90% 이상, 청색의 경우 80% 이상의 파워 전달이 유지된다. 도파로 폭 오차가 40 nm인 경우, 세 가지 색상 모두에 대한 파워 전달은 85%보다 크게 유지된다. 제안한 빔 합파기는 편광의존성이 거의 없음을 확인하였고, 소자 크기는 0.02 × 4 mm^2 정도로 매우 작다. 결론적으로, 다중 모드 도파로에서 두 모드 간섭(TMI) 효과를 이용하여 소형 집적 도파로 RGB 빔 결합기를 간단하게 설계하고 실현할 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

1. J. Kimura and M. Takaso, "New markets for projection system and ongoing breakthrough technology," in *Proc. The International Display Workshop/Asia Displays (IDW/AD '12)* (Kyoto, Japan, Dec. 2012), Vol. 19, p. 1355.
2. J.-W. Pan, S.-H. Tu, C.-M. Wang, and J.-Y. Chang, "High efficiency pocket-size projector with a compact projection lens and a light emitting diode-based light source system," Appl. Opt. **47**, 3406-3414 (2008).
3. M. Billinghurst and T. Starner, "New ways to manage information," Computer **32**, 57-64 (1999).
4. H. Tamura, "Steps toward a giant leap in mixed and augmented reality," in *Proc. The International Display Workshop/Asia Displays* (IDW/AD '12) (Kyoto, Japan, Dec. 2012), Vol. 19, p. 7.
5. S.-C. Kim and E.-S. Kim, "A novel configuration of LCD projectors for efficient orthogonal polarization of two projected views," Opt. Commun. **266**, 55-66 (2006).
6. J. Miller, S. J. Woltman, and T. Byeman, "Laser based scanned beam display system," in *Proc. The 1st Laser Display Conference (LDC'12)* (Yokohama, Japan Apr. 2012), LDC6-2, pp. 25-27.
7. Oculus VR, LLC., "Oculus Rift S," https://www.oculus.com/rift-s/ (Accessed date: Feb. 26, 2020).
8. Samsung Electronics, "Gear VR with Controller (R3250)," https://www.samsung.com/sec/wearables/gear-vr-r3250 (Accessed date: Feb. 26, 2020).
9. C. Shih and C. Tseng, "Dual-eyebox Head-up Display," in *Proc. 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)* (National University of Singapore, Singapore, Sep. 2018), pp. 105-109.
10. O. Utsuboya, T. Shimizu, and A. Kurosawa, "40.1: *Invited Paper*: Augmented reality head up display for car navigation system," SID Symp. Dig. Tech. Pap. **44**, 551-554 (2013).
11. A. Nakao, R. Morimoto, Y. Kato, Y. Kakinoki, K. Ogawa, and T. Katsuyama, "Integrated waveguide-type red-green-blue beam combiners for compact projection-type displays," Opt. Commun. **330**, 45-48 (2014).
12. R. Forber and E. Marom, "Symmetric directional coupler switches," IEEE J. Quantum Electron. **22**, 911-919 (1986).
13. Y. Chung, J. C. Yi, S. H. Kim, and S. S. Choi, "Analysis of a tunable multichannel two-mode-interference wavelength-division multiplexer/demultiplexer," IEEE J. Lightwave Technol. **7**, 766-777 (1989).
14. Y. Chung, "Red-green-blue beam combiner based on two-mode interference," Curr. Opt. Photon. **3**, 22-26 (2019).
15. L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," IEEE J. Lightwave Technol. **13**, 615-627 (1995).
16. M. A. Khashan and A. Y. Nassif, "Dispersion of the optical constants of quartz and polymethyl methacrylate glasses in a wide spectral range: 0.2-3 μm," Opt. Commun. **188**, 129-139 (2001).
17. H. Takahashi, Y. Hibino, Y. Ohmori, and M. Kawachi, "Polarization-insensitive arrayed-waveguide wavelength multiplexer with birefringence compensating film," IEEE Photon. Technol. Lett. **5**, 707-709 (1993).