

4 분기 광도파로를 이용한 새로운 1×4 광파워분할기 (New 1×4 optical power divider using a 4-branch waveguide)

宋炫采*, 吳泰元*, 申相永*, 李相潤**, 張祐赫**,
李泰衡**

(Hyun-Chae Song, Tae-Won Oh, Sang-Yung Shin, Sang-Yun Yi,
Woo-Hyuk Jang, and Tae Hyung Rhee)

요약

1×N 광파워분할기를 확장하는 단위소자로서 4 분기 광도파로를 이용한 새로운 1×4 광파워분할기를 제안하고 이를 제작하였다. 제안된 구조는 4 분기 광도파로와 출력비를 조절하기 위한 한개의 빔분할자와 두개의 빔확장자로 구성된다. 이 1×4 광파워분할기는 2차원 유한차분 빔전파방법(2D FD-BPM)으로 설계하고 폴리머 재료를 사용하여 제작하였다. 제작된 1×4 광파워분할기의 각 출구에서의 측정된 광출력비는 TE모드에서 25.0 : 25.7 : 25.3 : 24.0, TM모드에서 25.7 : 25.2 : 24.1 : 25.0 이었다. 제안된 소자는 기존의 1×2 Y자형 분기를 이용한 광파워분할기에 비해 소자 길이가 1/3 정도 짧고 도파손실과 복사손실로 기인한 삽입 손실 또한 작은 장점이 있다. 그리고 이 구조는 응용 목적에 따라 출구의 광파워분할비를 조정할 수도 있다.

Abstract

A new 1×4 optical waveguide power divider is proposed and fabricated. It consists of a 1×4 multi-branch structure with a beam separator and two beam expanders that can control the splitting ratios between the output ports. The proposed optical waveguide power divider is designed by employing the two dimensional finite difference beam propagation method and is fabricated by a reactive ion etching method. The splitting ratio of fabricated device is 25.0 : 25.7 : 25.3 : 24.0 for TE mode and 25.7 : 25.2 : 24.1 : 25.0 for TM mode. Compared with the conventional Y-branch structure, the proposed structure shortens the length of a 1×N divider by the factor 3. Thus it reduces the total propagation loss and the total radiation loss at the branch points. Furthermore, the splitting ratios between the output ports may be controlled in this structure for some special applications.

I. 서론

광파워분할기는 어떤 입력광을 한곳에서 원하는 여러 곳으로 분배하는 소자로서 광통신 시스템(optical communication system)이나 광가입자망(optical access network) 등 그 응용분야가 넓은 기본 광소자중의 하나이다. 일반적으로 이러한 기능을 가지는 광파워분할기(optical power divider)는 Y자형 분기(Y-branch), 방향성 결합기(directional coupler),

* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 正會員, 三星電子 情報通信研究所 光通信研究그룹

(Opt. Comm. R&D Team, Telecom. R&D Center, Information Systems Business Samsung Electronics co., LTD.)

接受日: 1998年2月25日, 수정완료일: 1998年5月28日

tapered velocity coupler와 같은 단일 모드를 갖는 1×2 또는 2×2 의 단위소자들을 나무(tree)모양으로 직렬과 병렬로 연결하여 구현한다. 또는 다중모드 간섭기(multimode interferometer)나 성형결합기(star coupler)와 같은 다중모드 파워분할기(multimode power divider)로 구현할 수 있다^{[1] [2] [3]}. 그러나 수동소자인 광파워분할기는 실제 현장에서 사용되기 위하여 균일한 광분할비를 갖는 것 뿐만아니라 기존의 포설된 광섬유를 사용하기 위하여 편광 의존성이 적어야 하고 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing) 방식에 응용되기 위하여 파장 의존성도 적어야 한다. 또한 소자의 제작이나 확장성을 고려하여 전체 소자길이를 짧고 삽입손실도 작아야 한다. 이러한 여러 조건들을 만족시키기 위하여 일반적으로 현장에서는 Y자형 분기(Y-branch)를 직렬과 병렬로 연결하여 $1 \times N$ 으로 확장한 광파워분할기를 사용하고 있다.

Y자형 분기 광도파로는 작은 분기각(θ)으로 이루어진 분기 영역과 나란한 두개의 광도파로로 이루어진 평행도파로 영역으로 나누어진다. 이러한 두개의 출구(output port)를 갖는 Y자형 분기 광도파로를 나무모양으로 병렬과 직렬로 연결하여 1×4 , $1 \times 8, \dots, 1 \times N$ 으로 확장할 수 있다. 그러나 이런 확장 방법은 출구의 수가 늘어날수록 소자의 길이가 거의 선형적으로 길어지기 때문에 출구수를 확장하는데 큰 제한을 준다. 뿐만아니라 소자의 길이가 길어지면 광도파로를 지나가는 광의 전파손실(propagation loss) 또한 커지게 된다. 손실이 작고 길이가 짧은 광파워분할기를 구현하기 위해서는 그 단위소자의 설계가 중요하다. 소자 길이를 줄이는 방법으로는 먼저 분기 영역에서 직선도파로를 사용하지않고 벤딩(bending)을 사용한 곡선도파로를 사용할 수 있다. 이때 곡선 도파로의 곡률은 벤딩으로 인한 광손실이 무시될 정도로 설계해야 한다. 둘째 분기각(branch angle)의 크기를 크게 할 수 있다. 그러나 이 경우에는 분기점에서의 복사손실(radiation loss)이 커지는 문제점이 있다. 또 다른 접근으로는 마이크로 프리즘을 사용하는 방법과 분기 영역(branch region)을 특별한 구조로 설계하는 방법이 연구되어 왔다^{[4] [5] [6]}. 이 두가지 방법은 모두 분기각을 크게 하면서도 이로 인한 복사손실을 최소화하기 위한 연구들이다.

본 논문에서는 기존의 광파워분할기에서 출구수를

확장할때 생기는 소자길이와 추가손실(전파손실+복사손실)의 증가를 최소화하는 다른 방법을 제시한다. 1×2 를 단위소자로 확장하는 기존의 방법에서 1×4 를 단위소자로 확장하는 방법을 제안하고 1×4 단위소자로서 4 분기 광도파로를 사용한 구조를 제안한다. 제안된 구조의 1×4 광파워분할기를 단위소자로 하여 출구수를 확장할 경우 기존의 Y자형 분기를 이용한 광파워분할기에 비해 소자길이가 $1/3$ 정도 짧고 삽입손실(도파손실+복사손실) 또한 작다. 그리고 제안된 1×4 구조는 특정 응용에 따라 출구의 광파워분할비를 조절할 수 있는 장점도 있다. 제안된 구조의 1×4 광파워분할기를 설계하기 위하여 광도파로 소자를 해석하는 방법중의 하나인 2차원 유한차분 빔전파방법(2D FD-BPM)을 사용하였다. 그리고 설계된 광파워분할기를 폴리머 재료를 사용하여 제작하고 그 동작 특성을 확인하였다.

본 논문은 먼저 새로운 단위소자로서 1×4 광파워분할기를 제안하고 제안된 광파워분할기를 기존의 Y자형 분기 광도파로형과 비교하여 그 장점들을 기술한다. 그리고 폴리머 광도파로 공정을 이용한 광파워분할기를 제작하고, 측정 결과로부터 그 특성을 기술하고 결론을 맺는다.

II. 제안된 1×4 광파워분할기의 동작 원리 및 설계

본 논문에서 제안한 1×4 광파워분할기의 구조는 그림 1과 같다. 인근 광도파로와의 분기각 θ 를 가지는 4 분기 광도파로의 기본 구조에 출력비를 조절하기 위한 한개의 빔분할자(beam separator)와 두개의 빔확장자(beam expander)가 있는 구조이다. 빔분할자와 빔확장자는 가상선 AA'과 BB'사이의 분기영역내에 위치하며 그 크기는 x_1, x_2 이다. 빔분할자와 빔확장자의 배치는 가상선 AA'과 BB'사이의 사다리꼴 모양의 분기영역을 b에서 c방향으로 반으로 쪼개어 광의 진행방향의 수직인 방향으로 특정 각도로 나누어 놓은 구조와 흡사하다.

제안된 구조의 1×4 광파워분할기의 동작은 그림 2와 같다. 먼저 빔분할자와 빔확장자가 없을 때 입력에 입사된 입력광은 입구에서 볼 때 분기각이 작은 내측 출구(port 2, 3)로 몰리게 된다. 따라서 본 광파워분할기의 대칭적 구조로 인해 내측 출구(port 2, 3)가 외

측 출구(port 1, 4)보다 각각 큰 출력광의 세기를 가지게 된다. 그러나 적당한 길이 x_1, x_2 를 가지는 빔분할자와 빔확장자는 4개의 출구에 입력광을 균등하게 분배시켜 준다. 빔분할자는 입력빔을 분기 영역에서부터 나누어 내측 출구로 몰리지 않게 한다. 빔확장자는 이러한 역할을 하는 빔분할자가 분기영역에서 나뉘는 빔을 외측으로 확장시켜 입력빔이 외측출구로 더 잘 분배되도록 한다. 적절한 빔분할자와 빔확장자의 역할로 입력광은 외, 내측 출구에서 출력광이 균일하게 나누어지게 된다. 도파광의 도파모드크기와 분기각의 크기에 따라 적절한 빔분할자와 빔확장자의 길이 x_1, x_2 가 다르며 분기각이 작은 경우에는 빔분할자, 빔확장자중 하나만을 사용하여서도 균등한 출력특성을 얻을 수 있다.

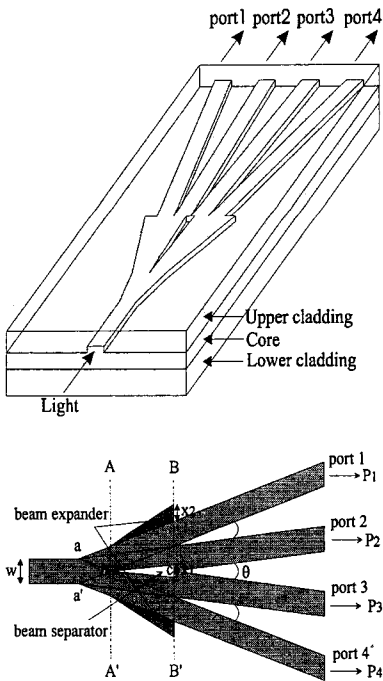


그림 1. 4 분기 광도파로를 이용한 1×4 광파워분할기의 구조

Fig. 1. Configuration of the 1×4 optical power divider using a 4-branch waveguide.

본 논문에서 제안된 1×4 광파워분할기를 해석, 설계하기 위하여 유한차분 빔전파방법(finite difference beam propagation method)을 사용하였다. 수치모사

에 사용된 폴리머 광도파로의 구조는 그림 4와 같다. 클래딩, 코어 물질로는 UV-15, Cyclotene-3022를 각각 사용하였고 사용된 립 구조의 광도파로는 클래딩 두께 $h_U = h_L = 4 \mu\text{m}$, 코어 두께 $h_C = 2 \mu\text{m}$, 에칭 깊이가 $h_G - h_C = 0.3 \mu\text{m}$, 채널광도파로폭 $w = 6 \mu\text{m}$, 분기각 $\theta = 1^\circ$ 이다. 수치해석의 계산시간을 줄이기 위하여 3차원 구조의 채널광도파로를 유효굴절률법(effective index method)을 사용하여 2차원으로 근사하여 계산하였다. 2차원 유한차분 빔전파방법에서 사용된 파라미터로는 코아와 클래딩의 유효굴절률이 각각 1.5276, 1.5248 이고, $\Delta x = 0.05 \mu\text{m}$, $\Delta z = 0.2 \mu\text{m}$ 이다.

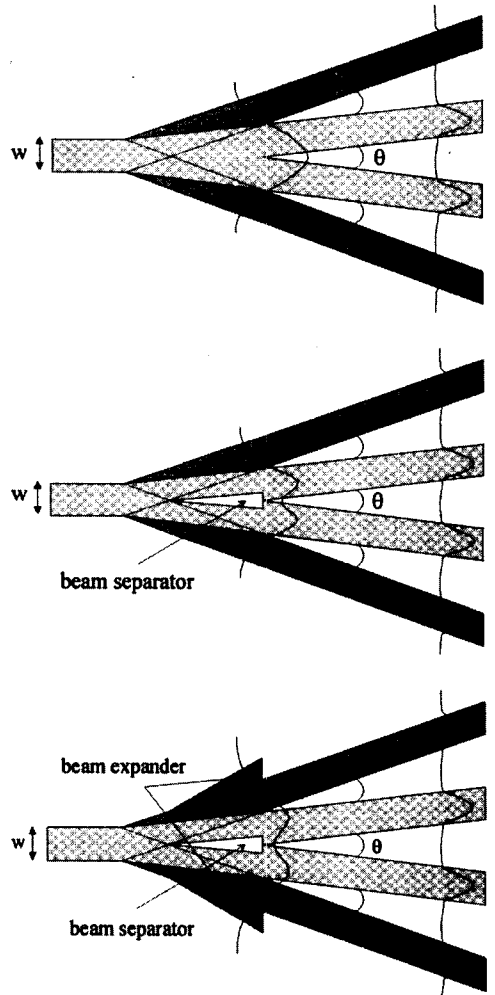


그림 2. 제안된 1×4 광파워분할기의 동작원리
Fig. 2. Operation principle of the proposed 1×4 optical power divider.

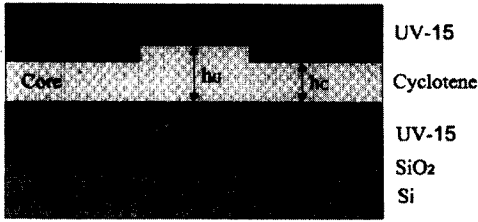


그림 3. 빔전파방법에 사용된 폴리머 광도파로 단면도
Fig. 3. Cross section of the polymeric optical waveguide for the BPM simulation.

그림 4는 빔분할자와 빔확장자의 길이 x_1, x_2 에 따른 외측(port1, 4)과 내측(port2, 3) 출구간의 출력광의 비($10 \times \log_{10}(P_{1,4}/P_{2,3})$)를 나타내고 있다. 빔분할자와 빔확장자의 길이가 적절할 때 각 출구에서 균등한 출력광을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 응용 목적에 따라 출력광의 비가 수 dB 차이가 나도록 설계할 수 있음도 알 수 있다.

이 분할기의 파장의존성을 살펴보기 위해 입력광의 파장을 변화시키면서 광출력비의 변화를 수치모사를 통해 살펴보았다. 1550 nm 파장 대역을 중심으로 ± 40 nm 내에서 광출력비의 변화가 0.2 dB 보다 작음을 확인하였다. 현재 파장분할방식의 채널 간격이 보통 0.8 nm (100 GHz) 인것을 고려할때 이 광파워분할기가 파장분할방식에 응용 가능함을 알 수 있다.

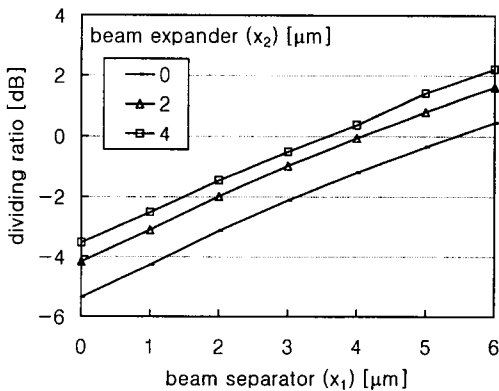


그림 4. 빔분할자와 빔확장자의 길이에 따른 광파워분할기의 출력비
Fig. 4. Splitting ratios of the optical power divider versus beam separators and beam expanders.

표 1은 기존의 Y자형 분기 광도파로와 본 논문에서 제안한 4 분기 광도파로를 각각 단위소자로 하여 $1 \times N$ 광파워분할기로 확장할 경우 소자의 길이를 비교한

것이다. 분기각 θ , 평행화 부분 길이 l 과 출력 광도파로간의 간격 s 는 서로 동일하다고 가정하고 출구수는 $N = 2^m = 4^n = 4, 16, 64, \dots$ ($m = 2, 4, 6, \dots, n = 1, 2, 3, \dots$) 으로 하였다.

표 1. Y자형 분기와 4 분기 광도파로를 이용한 $1 \times N$ 광파워분할기의 비교

Table 1. Comparison between $1 \times N$ optical power dividers using a Y-branch and a 4-branch waveguide.

	Y자형 분기	4 분기	비교
출구의 수	$N = 2^m$	$N = 4^n = 2^m$	
분기점의 수	$m (= 2n)$	n	1/2
분기 영역 길이	$L_b = (N-1)s/2 \tan(\theta/2)$	$L_b = [(N-1)s/2 \tan(\theta/2)]/3$	1/3
평행도파로 영역 길이	$L_l = ml = 2nl$	$L_l = nl$	1/2
총 길이	$L = L_b + L_l$	$L = L_b + L_l$	$\sim 1/3$

(단 $n = 1, 2, 3, \dots, m = 2, 4, 6, \dots$)

표 1에서 알 수 있듯이 4 분기가 Y자형 분기에 비해 평행도파로 영역 길이가 1/2, 분기 영역 길이가 1/3 정도 짧다. 일반적으로 Y자형 분기 소자의 분기각의 크기는 분기 영역에서의 복사손실을 고려하여 1° 미만으로 작게 하기 때문에 전체소자의 길이는 분기 영역의 길이로 결정된다고 할 수 있다. 이렇게 볼 때 본 논문에서 제안한 4 분기 구조가 기존의 Y자형 분기 구조에 비해 1/3 정도 길이가 짧다. 예를 들어 분기각이 1° , 출력 광도파로간의 간격이 30 μm 인 선형분기 1×4 광파워분할기의 경우에 대하여 분기영역의 길이를 계산해 보면 Y자형 분기를 사용하면 5156 μm , 4 분기를 사용하면 1719 μm 정도이다. 본 논문에서 제안한 구조는 추가손실면에서도 장점이 있다. 추가손실로는 입력광이 광도파로를 지나면서 겪게 되는 도파손실과 Y자형 분기와 같은 천이 영역에서 원하지 않는 모드 결합 현상으로 인해 발생하는 복사손실 등이 있다. 본 논문에서 제안된 구조는 기존의 구조에 비해 소자의 길이가 1/3 정도 짧아 도파손실이 작고 분기점의 수도 1/2 로서 복사손실도 줄일 수 있다. 그리고 특정 응용으로 사용되는 출구의 분할비가 다른 광파워분할기를 쉽게 설계, 제작할 수 있는 장점도 있다.

III. 1×4 광파워분할기의 제작 및 측정

제안된 1×4 광파워분할기는 폴리머 재료를 사용하

여 제작되었다. 폴리머를 이용한 광도파로 소자는 저가의 재료와 비교적 간단한 제작공정으로 인해 소자의 가격경쟁력을 높일 수 있다. 뿐만아니라 다른 재료에 비해 대체로 패키징이 쉽고 사용기판에 제한이 없어 실리콘이나 GaAs 기판을 사용할 경우 전기회로와 광도파로 소자를 함께 집적할 수 있다. 그리고 큰 크기의 실리콘 기판을 사용하여 매우 넓은 범위에서 광도파로 소자를 제작할 수 있어 소자 생산수율을 높일 수 있는 장점도 있다.

폴리머 광도파로 제작에 사용한 폴리머 물질로는 먼저 코아 물질로서 Dow Chemical에서 생산하는 Cyclotene-3022를 사용하였다. 이 물질은 BCB 모노머 (benzocyclobutene monomer)를 중합한 열경화성 폴리머로서 근적외선 영역에서 흡수가 적고(0.04 dB/cm @ 1.3 μm), 화학약품에 대한 내성이 강하며 열적 안정성($T_g > 350^\circ\text{C}$)이 우수한 것으로 알려져 있다. 클래딩 물질로는 Master Bond에서 공급하는 자외선 경화 에폭시의 일종인 UV-15을 사용하였다.

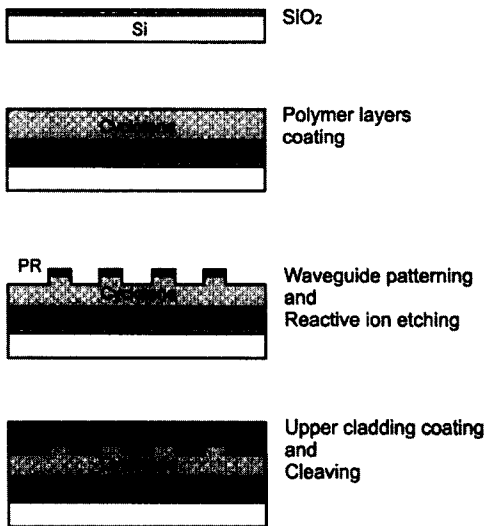


그림 5. 폴리머 광도파로 제작공정
Fig. 5. Fabrication procedure for the polymeric optical waveguide.

제작공정은 그림 5와 같다. 열산화(thermal oxidation)공정으로 SiO_2 가 1 μm정도 형성된 실리콘 기판위에 하부클래딩으로 UV-15을 3~4 μm정도 스핀코팅하고 그 위에 코아로서 Cyclotene-3022를 2 μm정도 스핀코팅한다. 그리고 일반적인 자외선 리소그래피방법으로 광도파로 패턴을 만들고 반응이온식각공정

(reactive ion etching, RIE)을 이용하여 립(rib)모양의 채널 광도파로를 형성시킨다. 마지막으로 상부클래딩으로 다시 UV-15을 3~4 μm정도 스핀코팅하면 3층 구조의 채널 광도파로 구조를 만들 수 있다.

실제 제작된 폴리머 광도파로는 클래드 두께 $h_U = h_L = 3.3 \mu\text{m}$, 코아 두께 $h_C = 1.9 \mu\text{m}$, 에칭 깊이 $h_U - h_C = 0.39 \mu\text{m}$ 이다.

제작된 1×4 광파워분할기의 출력광 비를 측정하기 위해 그림 6과 같은 측정장치를 사용하였다. 레이저 다이오드에서 나오는 1.55 μm 파장을 갖는 입력광을 편광기와 반파장 위상변조판($\lambda/2$ waveplate)을 이용하여 원하는 선편광상태로 만들고 이 광을 대물렌즈를 이용하여 제작된 소자에 결합(end-fire coupling)시켰다. 출구에서 나오는 출력광의 세기를 적외선 CCD 카메라와 파워미터를 사용하여 측정하였다.

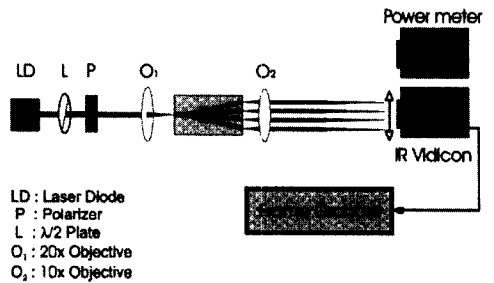


그림 6. 측정장치
Fig. 6. Measurement set-up.

제작된 단일 모드 폴리머 광도파로의 도파손실은 컷백(cut-back)방법으로 측정하여 약 2 dB/cm이었다. 이러한 도파손실은 근적외선에서 흡수가 적은 코아물질에 비해 상대적으로 큰 흡수도를 갖는 클래딩 물질에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 근적외선에서 흡수가 적은 다른 물질을 클래딩으로 사용한다면 이를 개선할 수 있을 것이다.

그림 7은 TM모드에 대한 1×4 광파워분할기의 출력 모드 사진과 그 수평방향 모드분포를 나타낸다. 각 출구에서의 광출력비는 25.7 : 25.2 : 24.1 : 25.0 을 나타내어 가장 나쁜 출구간의 광출력비가 0.28 dB로 나타났다. TE모드에 대해서는 25.0 : 25.7 : 25.3 : 24.0 으로 가장 나쁜 출구간의 광출력비가 0.30 dB이었다. 각 편광에 대한 이러한 출력비의 차이는 TE, TM모드에서의 수평방향 모드크기의 차이에서 비롯될 수 있다. 그리고 출력광의 분포에서 나타난 약간의 비

대칭성은 폴리머 제작공정시 생길 수 있는 불균일성 등의 영향으로 볼 수 있다.

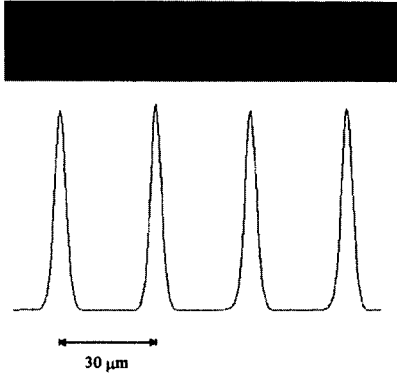


그림 7. 제작된 1×4 광파워분할기의 출력 모드사진과 그 수평방향 모드분포

Fig. 7. Photograph and lateral profiles of the output guided mode of the fabricated 1×4 power divider.

IV. 결 론

본 논문에서는 $1 \times N$ 광파워분할기를 확장하는 단위 소자로서 새로운 형태의 1×4 광파워분할기를 제안하고 폴리머 재료를 사용하여 제작하였다. 제안된 광파워분할기는 일반적인 4 분기 광도파로의 분기영역에 빔분할자와 빔확장자를 도입하여 출력광분포를 조절할 수 있는 구조이다. 2 차원 유한차분 빔전파방법(2D FD-BPM)을 사용하여 광파워분할기의 출력광분포가 균일하도록 빔분할자와 빔확장자의 크기를 설계하였고 O_2 와 CF_4 를 사용한 반응이온식각방법으로 립형태의 채널광도파로를 제작하였다. 제작된 1×4 광파워분할기의 출력광은 TE, TM모드에서 각각 0.3 dB 이하의 균일한 출력광분포를 보였다.

기존의 1×2 Y자형 분기를 단위소자로 하여 $1 \times N$ 광파워분할기를 확장하는 대신 본 논문에서 제안한 1×4 광파워분할기를 단위소자로 할 경우 전체 소자길이와 손실면에서 장점이 있음을 보였다

참 고 문 헌

- [1] E. C. M. Pennings, R. J. Deri, A. Scherer, R. Bhat, T. R. Hayes, N. C. Andreadakis, M. K. Smit, L. B. Soldano, and R. J. Hawkins, Ultracompact, low-loss directional couplers on InP based on self-imaging by multimode interference, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 14, pp. 1926-1928, 1991.
- [2] Lucas B. Soldano and Erik C. M. Pennings, Optical multi-mode interference devices based in self-imaging: principles and applications, *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615-627, 1995.
- [3] K. Okamoto, H. Takahashi, M. Yasu, and Y. Hibino, Fabrication of wavelength-insensitive 8×8 star coupler, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 61-63, 1992.
- [4] H. P. Chan, S. Y. Cheng, and P. S. Chung, Low loss wide-angle symmetric Y-branch waveguide, *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 7, pp. 652-654, 1996.
- [5] H. Hatami-Hanza, P. L. Chu and M. J. Lederer, A new low-loss wide-angle Y-branch configuration for optical dielectric slab waveguides, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 528-530, 1994.
- [6] Han-Bin Lin, Rei-Shin Cheng, and Way-Seen Wang, Wide-angle low-loss single-mode symmetric Y-junctions, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 825-827, 1994.

저 자 소 개



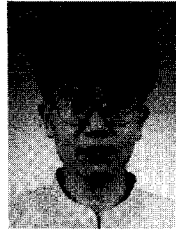
宋 炫 采(學生會員)

1970년 11월 13일생. 1993년 2월 경
북대학교 전자공학과 공학사. 1995년
2월 한국과학기술원 전기및전자공학
과 공학석사. 1995년 3월 ~ 현재 한
국과학기술원 전기및전자공학과 박
사과정. 주 관심 분야는 폴리머 광도

파로 소자 설계 및 제작

吳 泰 元(正會員) 第 34卷 D編 第 11號 參照

申 相 永(正會員) 第 34卷 D編 第 11號 參照



李 相 潤(正會員)

1967년 8월 17일생. 1989년 2월 중
앙대학교 전자공학과 공학사. 1991년
2월 한국과학기술원 전기및전자공학
과 공학석사. 1996년 2월 한국과학기술
원 전기및전자공학과 공학박사.
1996년 2월 ~ 현재 삼성전자 정보

통신개발센터 광통신연구그룹 선임연구원. 주관심분야는
광도파로 소자 설계 및 제작



張 祐 赫(正會員)

1963년 8월 7일. 1986년 2월 한양대
학교 자원공학과 공학사. 1989년 12
월 University of Utah 금속공학과
공학석사. 1994년 11월 University
of Utah 금속공학과 공학박사. 1995
년 12월 University of Florida 재

료공학과 post-Doc. 1996년 2월 ~ 현재 삼성전자 정보
통신개발센터 광통신연구그룹 선임연구원. 주관 분야는
폴리머 광도파로 소자



李 泰 衡(正會員)

1962년 11월 19일생. 1987년 6월
Tennessee 주립대 B.Chem 1989년
12월 Rensselaer Polytechnic
Institute M.S. 1994년 6월 Re-
nsselaer Polytechnic Institute
Ph.D. 1995년 3월 ~ 현재 삼성전자

정보통신개발센터 광통신연구그룹 선임연구원. 주관심분
야는 광도파로 소자