

論文98-35D-11-11

# 다중모드간섭 현상에 입각한 1×4 폴리머 광파워분할기의 제작

## (Fabrication of a 1×4 Polymeric Optical Power Divider Based on the Multi-Mode Interference Effect)

金起弘\*, 宋炫采\*, 吳泰元\*, 申相永\*, 李云榮\*\*

(Ki-Hong Kim, Hyun-Chae Song, Tae-Won Oh, Sang-Yung Shin, and Woon-Yeong Lee)

### 요 약

다중모드간섭 현상에 입각한 1×4 폴리머 광파워분할기를 설계, 제작하였다. 이 광파워분할기는 2차원 유한차분 빔전파방법을 사용하여 설계하였다. 코어와 클래딩 물질로 각각 Cyclotene-3022과 UV-15이 사용되었고, 반응이온식각 공정에 의해 제작되었다. 제작된 1×4 광파워분할기의 각 출구에서의 측정된 광출력비는 TE모드에서 0.93 : 1.00 : 0.93 : 0.90, TM모드에서 0.84 : 0.94 : 1.00 : 0.83 이었다. 다중모드간섭 현상을 이용한 1×4 광파워분할기는 소자의 길이가 작고, 편광에 따른 의존도가 작은 장점이 있다.

### Abstract

A 1×4 polymeric optical power divider based on the multimode interference effect is designed and fabricated. The two dimensional finite difference beam propagation method has been utilized in designing the device. Polymers used for the core layer and the cladding layer are Cyclotene-3022 and UV-15, respectively. The device is fabricated by the reactive ion etching method. The splitting ratio of the fabricated device is 0.93 : 1.00 : 0.93 : 0.90 for TE mode and 0.84 : 0.94 : 1.00 : 0.83 for TM mode. The advantages of this device are small size and low polarization-dependence.

### I. 서 론

최근 대용량의 데이터(data)를 전송하기 위해 파장 분할다중(Wavelength Division Multiplexing) 시스템을 사용한다. 파장이 다른 여러 개의 빛을 하나의 광섬유로 혼합시킴으로써 많은 양의 데이터를 전송할 수 있다. 이런 시스템에서는 광 대역폭(optical band-

width)이 넓고, 손실이 작은 소자들이 요구된다. 또한 저가의 광집적회로를 제작하기 위해 소자 크기가 작고 제작 허용 오차가 큰 소자들이 필요하다. 이러한 관점에서 다중모드간섭(Multi-Mode Interference) 현상을 이용한 소자들이 주목을 받기 시작했다<sup>[1][2]</sup>.

다중모드간섭 현상을 이용한 소자들을 보면, 하나의 입력광을 여러 개의 출력으로 동일하게 분할해 주는 광분할기<sup>[3][4][5]</sup>, 여러 개의 입력광을 하나의 출력으로 모아주는 광결합기<sup>[6]</sup>, 입력광을 원하는 위치의 출력으로 보내주는 광스위치<sup>[7]</sup>, 그리고 파장 분할 다중화기, 역다중화기<sup>[8][9]</sup> 등이 있다.

이러한 다중모드간섭 현상을 이용한 집적 광학 소자들을 제작하는 재료로는 지금까지 대부분 III-V족 화합물 반도체나 LiNbO<sub>3</sub> 등이 쓰여졌다<sup>[3][7][10]</sup>. 최

\* 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, 韓國通信 通信網研究所  
(Telecommunications Network Laboratory, Korea Telecom Co.)

接受日字:1998年7月20日, 수정완료일:1998年9月28日

근에는 새로운 광학 재료로서 폴리머를 사용하여 여러 가지 집적광학 소자를 제작하려는 노력이 있다<sup>[11]</sup>. 폴리머를 사용하여 집적광학 소자를 제작할 경우 제작 공정이 쉽고 저가로 제작이 가능하여 대량 생산이 가능하고, 기판의 사용에 제한이 없어서 실리콘(silicon)이나 GaAs 기판을 사용하여 여러 전기회로와 광도파로와의 집적이 가능하며, 광원과 광도파로와의 집적도 가능하다.

본 논문은 폴리머 광도파로를 이용한 다중모드간섭 1×4 광파워분할기의 제작에 관한 것이다. 본 논문의 순서로 먼저 다중모드간섭 현상을 설명하고, 이를 이용하여 1×4 광파워분할기를 설계했다. 광파워분할기를 설계, 해석하기 위하여 2차원 유한차분 빔전파방법(two dimensional finite difference beam propagation method)을 사용하였다. 그리고 폴리머 광도파로 공정을 이용하여 설계된 광파워분할기를 제작하고 그 동작 특성을 측정하였다. 마지막으로 측정 결과를 고찰하고 결론을 내렸다.

## II. 1×4 광파워분할기의 설계

다중모드간섭 현상은 R. Ulrich에 의해 발표된 자기형상반복 현상(self-imaging effect)에 기초를 두고 있다<sup>[12]</sup>. 자기형상반복 현상이란 다중모드 도파로로 유입된 입력필드의 모양이 도파로 방향을 따라 주기적으로 반복되어 나타나는 현상이다.

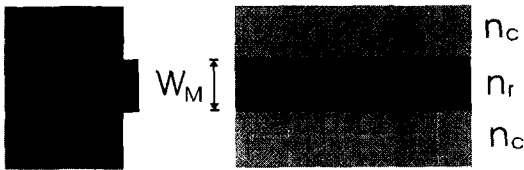


그림 1. 릿 채널 광도파로의 2차원 구조  
Fig. 1. 2-dimensional structure of the rib channel waveguide

다중모드간섭 현상은 3차원 다중모드 도파로 내에서 발생하지만, 3차원 구조는 계산량이 방대하고 수식전개에도 어려움이 있어 2차원 구조로 간략화 하였다. 그림 1과 같이 릿(rib)형태의 광도파로를 유효 굴절률 방법(effective-index method)를 사용하여 2차원 구조로 나타낼 수 있다. 여기서, 다중모드 도파로의 폭은  $W_M$ , 코어(core)의 유효 굴절률은  $n_r$ , 클래딩(cladding)의 유효 굴절률은  $n_c$ 이다.

두개의 최저차 모드의 비트 길이(beat length)를  $L_\pi$ 라고 정의하면,  $L_\pi$ 는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0} \quad (1)$$

여기서  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ 은 다중모드 도파로에서의 두 개의 최저차 모드의 전파상수이고,  $\lambda_0$ 는 사용된 광의 파장이며,  $W_e$ 는 유효 도파로 폭으로 각 모드의 꼬리(tail) 부분이 클래딩 영역으로 들어간 부분까지 포함한 폭이다. 코어와 클래딩의 굴절률의 차가 크면 이러한 모드의 꼬리가 거의 나타나지 않으므로  $W_e \approx W_M$ 으로 놓을 수 있다.

다중모드간섭 현상을 이용해 1×4 광파워분할기를 설계하기 위해서는 기본 모드(fundamental mode)가 다중모드 도파로의 가운데로 입사될 때의 현상을 이해하면 된다. 이때 다중모드 도파로에서의 모드 패턴은 그림 2와 같다.

다중모드 도파로의 길이(L)가

$$L = p \left( \frac{3L_\pi}{4} \right) \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

일때 다중모드 도파로의 입력의 자기형상이 반복된다. 또한,

$$L = \frac{p}{N} \left( \frac{3L_\pi}{4} \right) \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

일때 다중모드 도파로의 입력이 N개로 분할된다. 그러므로 다중모드 도파로의 길이(L)를  $3L_\pi/16$  ( $N=4$ )으로 정하면 1×4 광파워분할기를 설계할 수 있다.

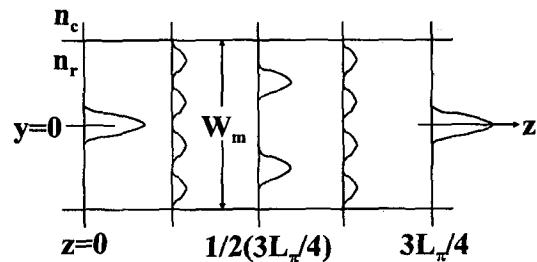


그림 2. 다중모드 도파로에서의 모드 패턴  
Fig. 2. Mode pattern of the multimode waveguide.

다중모드 간섭 현상을 이용한 1×4 광파워분할기를 해석, 설계하기 위하여 유한차분 빔전파방법(finite difference beam propagation method)을 사용하였다. 수치모사에 사용된 광분할기의 평면 구조와 단면

구조는 그림 3과 같다. 클래딩, 코어 물질로는 UV-15, Cyclotene-3022를 각각 사용하였다. 사용된 립(rib) 구조의 광도파로는 클래딩 4  $\mu\text{m}$ , 코어 2  $\mu\text{m}$ , 식각깊이 0.5  $\mu\text{m}$  이다. 입력, 출력단에서 사용된 단일모드 광도파로 폭은 6  $\mu\text{m}$  이고, 다중모드 광도파로 폭은 120  $\mu\text{m}$  이며, 출력측에서 단일모드 광도파로 사이는 30  $\mu\text{m}$  씩 간격을 두었다. 수치해석 할 때의 계산 시간을 줄이기 위하여 유효 굴절률 방법(effective-index method)을 사용하여 2차원으로 근사하여 해석하였다. 2차원 유한차분 빔전파방법에서 사용된 파라미터는 코어, 클래딩의 유효 굴절률이 각각 1.5276, 1.5226이다.

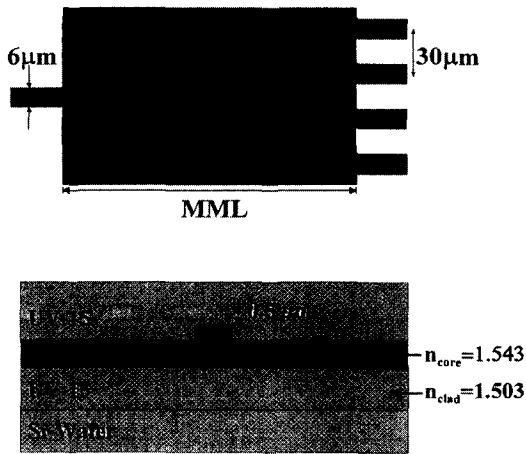


그림 3. 수치모사에 사용된 1×4 광분할기의 구조  
Fig. 3. Configuration of the 1×4 optical power divider used in numerical simulation.

그림 4는 다중모드 도파로의 길이의 변화에 따른 출력광의 균일도( $10 \times \log(\text{최대 출력 도파로의 광파워}/\text{최소 출력 도파로의 광파워})$ )와 도파로의 추가 손실을 나타낸다. 다중모드 도파로의 길이가 식 (3)의  $3L_\pi/16$  ( $N=4$ )일때 손실이 가장 작고, 이 길이 주위에서 0.6 dB 이하의 균일한 출력광 분포를 얻을 수 있다. 이처럼 손실이 가장 작은 지점에서 균일도가 가장 작지 않고, 그 주위에서 균일도가 작은 지점이 나타나는 이유는 내측의 전장 세기 분포와 외측의 전장 세기 분포의 국한(confinement) 정도가 다르기 때문이다. 수치모사 결과 다중모드 도파로의 길이가 3850  $\mu\text{m}$  일때 추가 손실이 가장 작다. 또한, TE 모드와 TM 모드의 편광에 의한 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 이처럼 다중모드간섭 현상을 이용하면 소자의 길이를 줄일 수 있고, 광도파로의 손실도 줄일 수 있다. 또한,

편광에 의한 의존도가 작음을 확인할 수 있었다.

이 분할기의 파장의존성을 살펴보기 위해 입력광의 파장을 변화시키면서 출력광 균일도의 변화를 수치모사를 통해 살펴보았다. 그림 5에 이 결과를 나타내었다. 1550 nm 파장 대역을 중심으로  $\pm 70$  nm 내에서 광출력비의 변화가 0.6 dB 보다 작음을 확인하였다. 현재 파장다중분할 시스템에서 사용하는 어븀이 첨가된 광섬유 증폭기(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)의 광대역폭이 대략 30 nm 인 것을 고려할 때 이 광파워분할기가 파장분할방식에 응용 가능함을 알 수 있다.

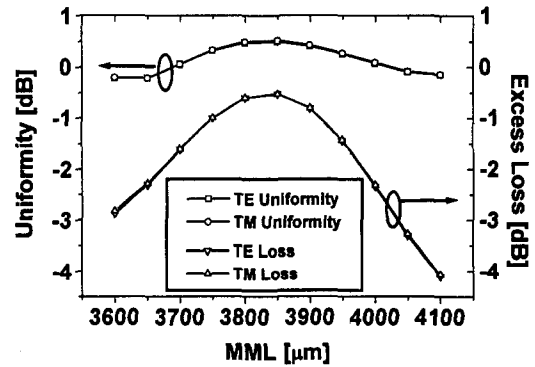


그림 4. 다중모드 도파로 길이의 변화에 따른 출력광 균일도의 변화와 추가 손실의 변화  
Fig. 4. Dependence of the output power uniformity and the excess loss on the multimode waveguide length.

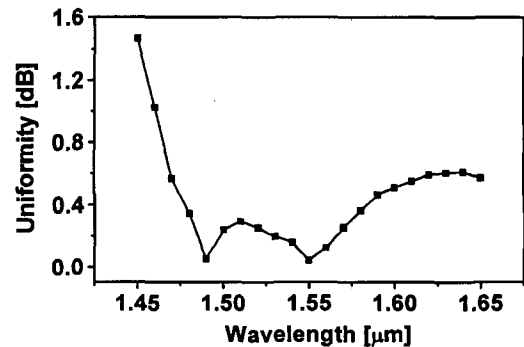


그림 5. 입력광의 파장의 변화에 따른 출력광 균일도의 변화  
Fig. 5. Dependence of the output power uniformity on the wavelength.

### III. 1×4 광파워분할기의 제작 및 측정

다중모드간섭 현상을 이용한 1×4 광파워분할기는

폴리머 재료를 사용하여 제작되었다. 폴리머를 이용한 광도파로 소자는 저가로 제작이 가능하고, 기판의 사용범위에 제한이 없으므로 실리콘(silicon)이나 GaAs 기판을 사용할 경우 동일한 기판위에 전기 회로와 광도파로 소자를 함께 집적시킬 수 있으며, 광원과 광도파로의 집적도 가능하다.

폴리머 광도파로 제작에 사용한 폴리머 물질로는 먼저 코어 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<sub>g</sub> > 350℃)이 우수한 것으로 알려져 있다. 클래딩 물질로는 Master Bond에서 공급하는 자외선 경화 에폭시의 일종인 UV-15을 사용하였다.

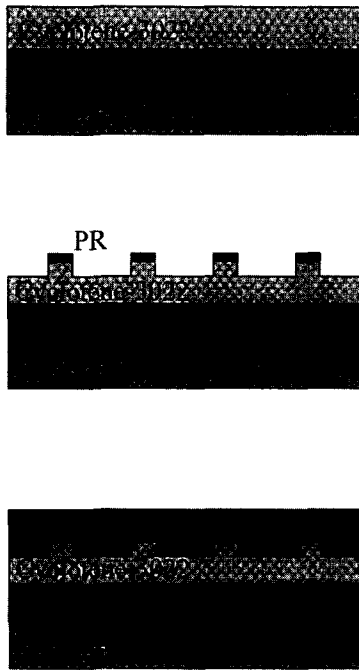


그림 6. 폴리머 광도파로 제작과정  
Fig. 6. Fabrication procedure for the polymeric optical waveguide.

제작 공정은 그림 6과 같다. 실리콘 기판 위에 하부 클래딩으로 UV-15을 3~4 μm 정도 스핀코팅하고, 그 위에 코어로서 Cyclotene-3022를 2 μm 정도 스핀코팅한다. 그 위에 포토레지스트(photoresist, PR)를 코팅한 후 패턴이 그려진 마스크를 씌워서 UV를 쬐어

광도파로 패턴을 만든다. 다음에 O<sub>2</sub>와 CF<sub>4</sub>를 사용한 반응이온식각 공정(reactive ion etching, RIE)을 이용하여 릿(rib)형태의 채널 광도파로를 형성시킨다. 포토레지스트를 제거한 후 상부클래딩으로 다시 UV-15을 3~4 μm정도 스핀코팅하면 3층 구조의 채널 광도파로 구조를 만들 수 있다.

제작된 1×4 광파워분할기의 출력광 비를 측정하기 위해 그림 7과 같은 측정장치를 사용하였다. 레이저 다이오드에서 나오는 1.55 μm 파장을 갖는 입력광을 편광기와 반파장 위상변조판(λ/2 waveplate)을 이용하여 원하는 선편광(linear polarization) 상태로 만들고, 이 광을 대물렌즈를 이용하여 제작된 소자에 결합(end-fire coupling)시켰다. 출구에서 나오는 출력광의 세기를 적외선 CCD 카메라와 파워미터를 사용하여 측정하였다.

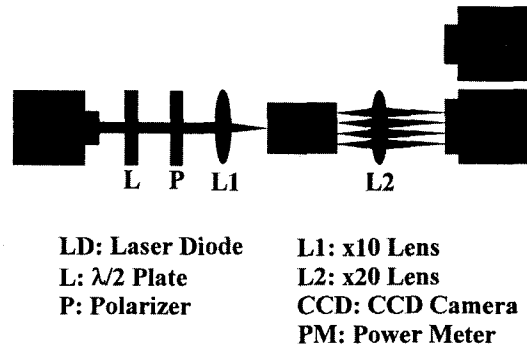


그림 7. 측정장치  
Fig. 7. Measurement set-up.

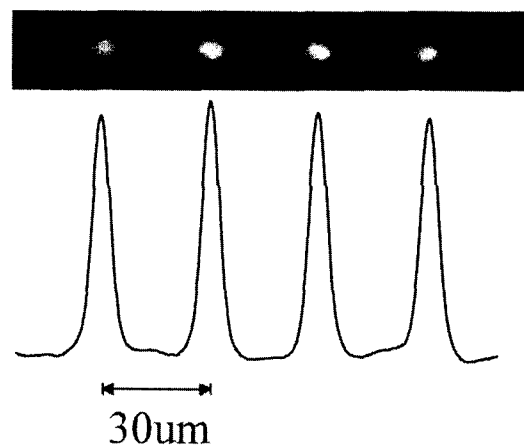


그림 8. TE편광의 출력 모드 사진과 수평방향 모드분포  
Fig. 8. Photograph and lateral profile of the output guided mode with TE-polarization.

1×4 광파워분할기의 TE모드에 대한 출력 모드 사진과 그 수평방향 모드분포의 측정 결과는 그림 8에 나타내었다. TE모드의 경우 각 출구에서의 광출력비는 0.93 : 1.00 : 0.93 : 0.90 을 나타내어 가장 나쁜 출구간의 광출력비가 0.46 dB 로 나타났다. TM모드에 대해서는 0.84 : 0.94 : 1.00 : 0.83 으로 가장 나쁜 출구간의 광출력비가 0.81 dB 였다. 각 편광에 대한 이러한 출력비의 차이는 각 편광에 따라 출력광의 비를 균일하게 해주는 다중모드 광도파로의 길이가 약간 달라져야 하기 때문에 나타난 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 다중모드간섭 현상을 간단하게 설명한 후 이를 이용한 1×4 광파워분할기를 폴리머 광도파로로 구현하였다. 광파워분할기의 해석 및 설계를 위하여 2 차원 유한차분 법전파방법(2D FD-BPM)을 사용하였다. 다중모드 광도파로의 길이를 조정함으로써 출력측에서의 광분할비가 균일하도록 1×4 광분할기를 설계할 수 있었다.

코어와 클래딩 물질로 각각 Cyclotene-3022과 UV-15이 사용되었고, O<sub>2</sub>와 CF<sub>4</sub>를 사용한 반응이온 식각 공정에 의해 제작되었다. 제작된 1×4 광분할기는 TE 모드에서 0.93 : 1.00 : 0.93 : 0.90의 광분할비를, TM 모드에서 0.84 : 0.94 : 1.00 : 0.83의 광분할비를 가졌다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Pierre A. Besse, Maurus bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, and M. K. Smit, "Optical bandwidth and Fabrication Tolerances of Multimode Interference Couplers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 6, pp. 1004-1009, 1994.
- [3] J. M. Heaton, R. M. Jenkins, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, and K. P. Hilton, "Novel 1-to-N way integrated optical beam splitters using symmetric mode mixing in GaAs/AlGaAs multimode waveguides", *Appl. Phys. Lett.* vol. 61, no. 15, pp. 1754-1756, 1992.
- [4] R. M. Jenkins, R. W. J. Devereux, and J. M. Heaton, "Waveguide beam splitters and recombiners based on multimode propagation phenomena", *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 14, pp. 991-993, 1992.
- [5] 김정욱, 정영철, "깊이 식각된 다중모드 간섭 영역으로 구성된 광전력 분배기 및 결합기의 설계", *대한전자공학회논문지*, 제 34권, D편, 제4호, pp. 62-72, 1997
- [6] Lucas B. Soldano, Frank B. Veerman, Meint K. Smit, Bastiaan H. Verbeek, Alain H. Dubost, and Erik C. M. Pennings, "Planar Monomode Optical Couplers Based on Multimode Interference Effects", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 12, pp. 1843-1992, 1992.
- [7] R. M. Jenkins, J. M. Heaton, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, G. W. Smith, and K. P. Hilton, "Novel 1N and NN integrated optical switches using self-imaging multimode GaAs/AlGaAs waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 6, pp. 684-686, 1994.
- [8] M. R. Paiam, C. F. Janz, R. I. MacDonald, and J. N. Broughton, "Compact Planar 980/1550-nm Wavelength Multi/Demultiplexer Based on Multimode Interference", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7. no. 10, pp. 1180-1182, 1995.
- [9] Lars Oddvar Lierstuen and Aasmund Sudbø, "8-Channel Wavelength Division Multiplexer Based on Multimode Interference Couplers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7. no. 9, pp. 1034-1036, 1995.
- [10] J. C. Campbell and T. Li, "Electro-optic multimode waveguide switch", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 710-712, 1979.
- [11] Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin,

“Polarization-insensitive digital optical switch using an electro-optic polymer rib waveguide”, *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 4, pp. 314-315, 1997.

[12] R. Ulrich and G. Ankele, “Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, no. 6, pp. 337-339, 1975.

---

저 자 소 개

---



金 起 弘(正會員)

1972년 8월 9일생. 1997년 2월 전북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1997년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 광 집적회로 소자

宋 炫 采(正會員) 第 35卷 D編 第 7號 參照

吳 泰 元(正會員) 第 35卷 D編 第 7號 參照

申 相 永(正會員) 第 35卷 D編 第 7號 參照

李 云 榮(正會員) 第 34卷 D編 第 11號 參照