

## 유리집적광학을 이용한 다중모드간섭 1×4 광파워 분리기 제작

강동성<sup>†</sup> · 전금수 · 장명호 · 반재경

전북대학교 전자정보공학부, 전기전자회로합성연구소  
☎ 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지

(2000년 8월 3일 받음, 2000년 11월 7일 수정본 받음)

본 논문에서는 다중모드간섭(multimode interference: MMI) 1×4 광파워 분리기를 위한 차분빔전파법(FD-BPM)을 이용하여 모델링하고 BK7 유리기판에 Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> 이온교환법을 이용하여 제작하였다. 제작된 MMI 1×4 광파워 분리기의 분리비는 0.46 dB이었다.

OCIS codes : 230.3120, 230.7370, 230.7380, 230.7390.

### I. 서 론

파장 다중화 기법이 광통신에 적용되면서 많은 분기를 요구하게 되었다. 일반적인 Y-분리기나 방향성 결합기는 손실을 줄이기 위해 작은 각도로 분기되어 제작되므로 출력을 2단자 이상 늘이기 위해서는 여러 단을 종속적으로 연결함으로써 소자의 길이가 길어져서 하나의 기판 위에 제작하기 어려워지며 손실이 증가하고, 이를 해결하기 위해 성형 결합기, MMI(multimode interference) 1×N 광파워 분리기 등이 대두되었다.

MMI는 1973년 Bryngdahl에 의해 처음 제안되었고 1975년 Ulrich에 의해 더욱 구체적으로 적용되기 시작한 기법으로서 손실이 작고 크기를 작게 할 수 있으며 편광의존도가 낮게 설계할 수 있다.<sup>[1,3]</sup> 또한 제작 허용오차를 크게 할 수 있어서 제작의 어려움을 줄일 수 있으며 파장 다중화 시스템에 적용하는데 있어서 큰 광대역성을 갖는 장점이 있다.<sup>[4]</sup> 따라서 수동 소자로서 가격이 저렴하고 제작이 용이한 유리기판 MMI 소자는 점차 확산되어가는 광통신 망에 필요한 소자가 될 것이다.

그리고 소자 제작에 사용한 유리기판의 경우 근본적으로 광섬유와 굴절률이 유사하여 굴절률 차이에 의한 반사손실을 줄일 수 있으며, 기판의 가격이 저렴하고 도파로를 형성할 때 Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup>의 이온교환을 이용함으로써 한 단계의 과정으로 광소자를 제작할 수 있어서 제작과정이 다른 재료와 비교할 때 매우 간단하고 경제적인 장점을 갖는다. 특히 높이 평가되는 장점은 편광에 무관한 소자를 제작할 수 있다는 점이다. 이는 유리의 굴절률이 중앙 대칭형으로 이온교환 시에 형성되는 도파로에 의해서도 낮은 정도의 복굴절 특성을 갖게 되어 편광에 따른 변화를 무시할 수 있는 정도이기 때문이다.<sup>[5]</sup> 본 논문에서는 수동 소자로 기판의 가격이 저렴하고 대량생산의 장점이 있는 2" BK7 유리기판을 이용하여 MMI 1×4 광파워

분리기를 제작하였다.

본 논문은 MMI의 원리를 2장에서 설명하고 3장에서 MMI 광파워 분리기의 변수에 따른 모델링을 하였다. 그리고 4장에서는 유리기판을 이용한 소자 제작 및 측정된 결과를 나타내고, 5장에서 결론을 맺었다.

### II. 다중모드간섭 결합기의 원리

그림 1과 같은 MMI는 다중모드 도파로에 유입된 입력 전계의 모양이 도파로 방향을 따라 주기적으로 나타나는 자기형상반복에 기초를 두고 있다. 여기에서  $W_{MMI}$ 는 다중모드 도파로의 폭,  $n_r$ 은 도파로의 유효 굴절률,  $n_c$ 는 클래딩의 유효 굴절률을 나타낸다.  $W$ 는 입력 및 출력 도파로의 폭을 나타내고  $D$ 는 출력 도파로 중심사이의 간격을 나타낸다. 그리고 진행 방향의 전파상수는  $\beta_v^2 = k_0^2 n_r^2 - k_{yv}^2$ 이다. 여기서,  $v$ 는 모드 수를  $k_{yv} = (v+1)\pi/W_{ev}$ 는 수평 방향 전파상수를 나타내며  $W_{ev}$ 는 유효 도파로 폭으로 각 모드의 꼬리 부분이 클래딩 영역으로 들어간 부분까지 포함한 값이다. 일반적으로 유효 도파로 폭  $W_{ev}$ 는 첫 번째 모드의 유효 도파로 폭인  $W_{e0}$ 로 근사화할 수 있으며  $W_e$ 로 간단히 사용한다.  $k_0^2 n_r^2 \gg k_{yv}^2$  일 때 전파상수는 식 (1)과 같이 할 수 있다.<sup>[3,6]</sup>

$$\beta_v \approx \sqrt{k_0^2 n_r^2 - \frac{\pi^2 (v+1)^2}{W_e^2}} \approx \frac{k_0 n_r - \frac{\pi^2 (v+1)^2}{2k_0 n_r W_e^2}}{2k_0 n_r W_e^2} \quad (1)$$

$L_\pi = \pi/(\beta_0 - \beta_1)$ 라 정의하면 다중모드 도파로 영역에서의 전파상수는 식 (2)와 같다.

$$\beta_v \approx k_0 n_r - \frac{\pi(v+1)^2}{3L_\pi} \quad (2)$$

또한 다중모드 도파로가  $m$ 개의 모드를 도파시킬 때 각 모드의 전계 분포를  $h_v$ 라 하면 임의의  $z$  위치에서 전체 전계 분포는 각 모드 전계의 선형적인 합으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

<sup>†</sup>E-mail: dskang@shinbiro.com

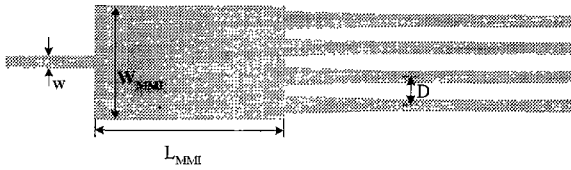


그림 1. MMI 1×4 광파워 분리의 구조.

표 1. 입력 위치에 따른 여러 간섭현상의 특성

입력위치	입력의 위치	$y = \pm W_M/6$	$y = 0$
입력×출력	$N \times N$	$2 \times N$	$1 \times N$
최소입력파형 반복 거리	$3L_\pi$	$L_\pi$	$3L_\pi/4$
N개 출력 거리	$3L_\pi/N$	$L_\pi/N$	$3L_\pi/4N$
모드여기 요구사항	none	$c_v = 0$ for $v = 2, 5, 8, \dots$	$c_v = 0$ for $v = 1, 3, 5, \dots$

$$H(y, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v h_v(y) \exp(-j\beta_v z) \quad (3)$$

여기에서  $c_v$ 는 각 모드의 크기를 나타내는 모드상수이다. 특히, 입력 부분  $z=0$ 에서의 전개 분포는 식 (4)와 같다.

$$H(y, 0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v h_v(y) \quad (4)$$

식 (4)는 입력을 도파 가능한 모든 모드로 분리해서 나타낸 것으로 모드상수  $c_v$ 는 입력 전개  $H(y, 0)$ 와 각 모드의 전개  $h_v(y)$ 의 overlap integral을 통해서 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$c_v = \frac{\int H(y, 0) h_v(y) dy}{\sqrt{\int h_v^2(y) dy}} \quad (5)$$

그리고 다중모드 도파로의 끝단  $z=L_{MMI}$ 에서 전개 분포는 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$H(y, L_{MMI}) = \exp(-jk_0 n_r L_{MMI}) \cdot \sum_{v=0}^{m-1} c_v h_v(y) \cdot \exp\left(j \frac{\pi(v+1)^2 L_{MMI}}{3L_\pi}\right) \quad (6)$$

여기에서  $j\beta_0 z$ 만큼의 위상을 공통으로 가지므로  $\exp(-jk_0 n_r L_{MMI})$  성분을 제거할 수 있어 결론적으로,  $H(y, L_{MMI})$ 의 형태는 모드상수  $c_v$ 와 모드 위상성분  $\exp(j\pi(v+1)^2 L_{MMI}/3L_\pi)$ 에 의해 결정된다.

표 1은 다중모드 영역에서 입력 도파로의 위치에 따라서 나타나는 간섭현상의 특성을 보이고 있다. 여기에서 중요한 점은 입력 위치에 따라서 N개의 출력을 만들기 위한 다중모드 영역의 거리가 크게 차이가 난다는 것이다. 임의의 위치에 입력 단을 둘 경우 N개의 출력 단을 만들기 위한 다중모드 영역의 거리는  $3L_\pi/N$ 로 중앙 즉,  $y=0$ 에서 입력할 때의 거리인  $3L_\pi/4N$ 보다 4배정도 소자의 길이가 길어진다. 즉,  $y=0$  위치

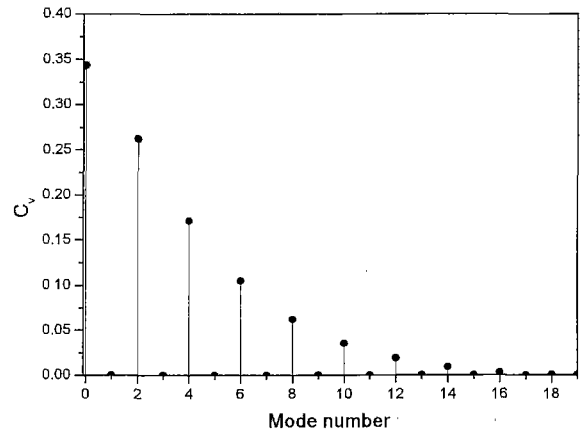


그림 2. 입력단이 중앙에 위치할 경우 모드 상수  $C_v$ 의 크기.

에서 입력을 할 경우는  $1 \times N$  형태의 광파워 분리의 길이를 줄일 수 있다. 그 이유는 홀수 모드( $v=1, 3, 5, \dots$ )에서는 모드가 중앙을 기준으로 대칭이기 때문에 overlap integral에 의해 모드상수  $c_v$ 가 0이 되기 때문이다. 그림 2는 입력단이 중앙에 위치할 경우 모드 수에 따른 각 모드의 모드상수의 크기를 나타내고 있으며 홀수 모드의 모드상수가 모두 0이 됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 1×4 광파워 분리를 제작하기 위해서 입력 도파로가 중앙에 위치한 대칭형의 MMI 형태를 이용하여 소자의 길이를 줄였다.

### III. 모델링

본 논문에서는 MMI 1×4 광파워 분리를 모델링하기 위하여 FD-BPM을 사용하였다. 이 광파워 분리기에서 입력과 출력 도파로의 폭  $W$ 는  $1.55 \mu\text{m}$  파장에서 단일 모드 조건을 만족하는  $3.5 \mu\text{m}$ 로 정하였으며 출력 도파로 사이의 간격  $D$ 는 결합이 일어나지 않을 정도의 충분한 간격인  $20 \mu\text{m}$ 로 정하였다. 따라서 MMI의 폭  $W_{MMI}$ 은  $4 \times 20 = 80 \mu\text{m}$ 로 하였다. 출력 도파로는 광파워의 손실을 줄이기 위해  $5000 \mu\text{m}$  길이에  $6 \mu\text{m}$ 에서  $3.5 \mu\text{m}$ 까지 점차 줄여지는 테이퍼를 두었다.

도파로의 굴절률 분포는 유리기판에 이온교환의 단위 공정<sup>[7]</sup>

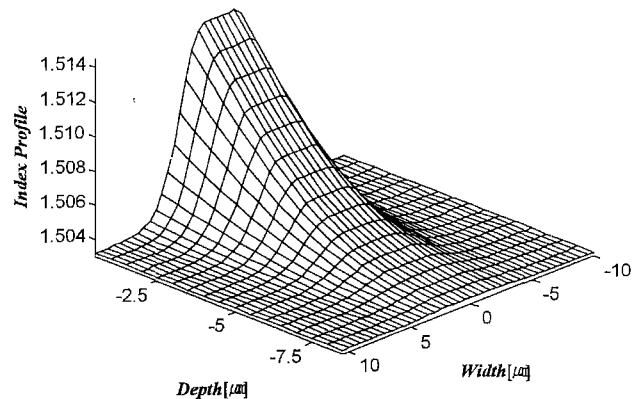


그림 3. BK7 유리에 이온교환법으로 형성된 채널형 광도파로의 굴절률 분포,  $W=3.5 \mu\text{m}$ ,  $t=12 \text{ h}$ ,  $T=350^\circ\text{C}$ ,  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ .

으로 제작한 채널형 도파로의 굴절률 분포와 각 변수들을 사용하였다. 그림 3은 유리기판에 이온교환을 통해서 얻은 채널 도파로의 굴절률 분포를 나타내고 있으며 유리집적광학을 이용해 제작된 도파로의 굴절률 분포는 폭 방향으로는 가우시안 분포를 하고 깊이 방향으로는 에러 함수 분포를 한다.

도파로 해석에서는 계산 시간을 줄이기 위해서 3차원 구조를 2차원 구조로 간략화하였다. 즉, 도파로의 진행방향과 도파로의 수평 방향만을 고려하고 깊이 방향으로는 유효굴절률을 계산하여 그 영역에서의 굴절률  $n_e$ 로 대체하였다. 계산된 유효굴절률의 2차원 구조에서 모드의 유효 도파로 폭  $W_e$ 를 구하였다.

입력 도파로가 다중모드 영역의 중앙에 위치한 대칭 구조에서 다중모드 영역의 길이  $L_{MMI}$ 는 출력 단이 4개일 때 다음과 같은 식 (7)을 이용하여 구하였다.<sup>[8]</sup>

$$L = \frac{1}{4} \left( \frac{3}{4} L_\pi \right) = \frac{1}{4} \frac{n_r W_e^2}{\lambda_o} = 1680 [\mu\text{m}] \quad (7)$$

그림 4는 위의 소자 변수들을 이용하여 모델링한 1×4 광파

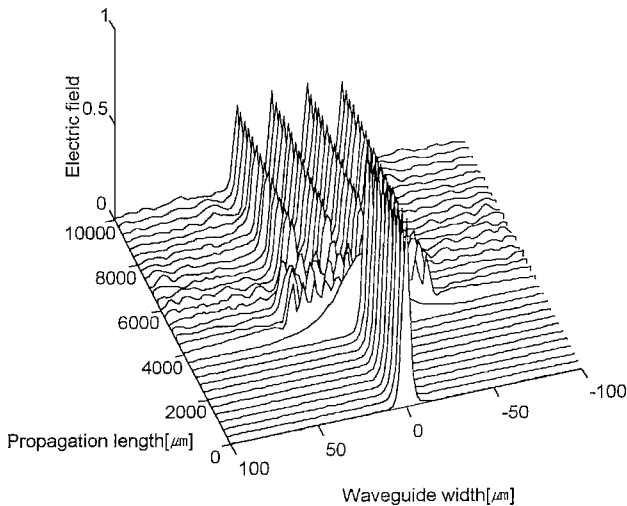


그림 4. MMI 1×4 광파워 분리기기의 FD-BPM 모델링 결과.

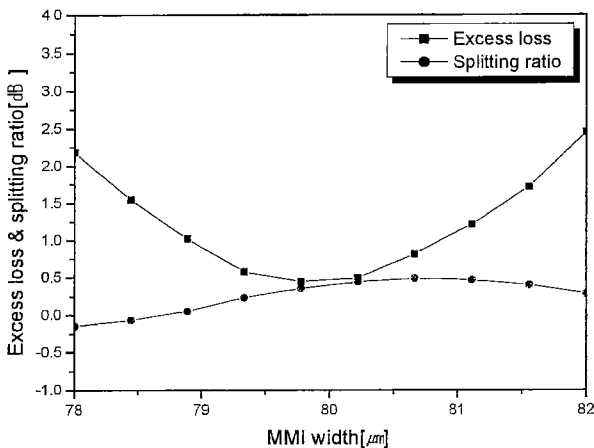


그림 5. MMI 1×4 광파워 분리기기의 다중모드 도파로 폭에 따른 잉여손실과 광파워 분리비.

워 분리기기의 전체 분포를 나타내고 있다. 이 때 잉여손실( $L_e = -10\log\{(P_1+P_2+P_3+P_4)/P_{in}\}$ )과 출력 도파로 사이의 광파워 분리비( $R = -10\log(P_{min}/P_{max})$ )는 각각 0.48 dB와 0.25 dB이었다. 여기에서  $P_{min}$ 는 출력 도파로 중에서 가장 작은 출력파워 값을  $P_{max}$ 는 가장 큰 출력파워 값을 나타낸다.

다음으로 광파워 분리기기의 제작 허용오차를 다중모드 영역의 폭과 길이를 변수로 고찰하였다. 그림 5는 다중모드 도파로의 폭에 따라서 잉여손실과 분리비가 변하는 것을 나타내고 있다. 80 μm을 기준으로 ±1 μm 정도의 범위까지 1 dB 이하의 잉여손실을 보이고 있고 광파워 분리비의 경우는 ±2 μm 내에서 0.5 dB 이하의 영향만을 받고 있다. 그림 6은 다중모드 도파로의 길이에 따른 잉여손실과 출력 광파워 분리비를 나타내고 있다. 1680 μm를 중심으로 1 dB 이하의 잉여손실을 고려할 때 ±40 μm 이상의 허용오차를 얻을 수 있다. 그림 7에 파장에 따른 잉여손실과 광파워 분리비를 나타내었다. 0.8 dB의 잉여손실과 0.4 dB의 파워 비까지 약 60 nm 정도의 대역폭을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

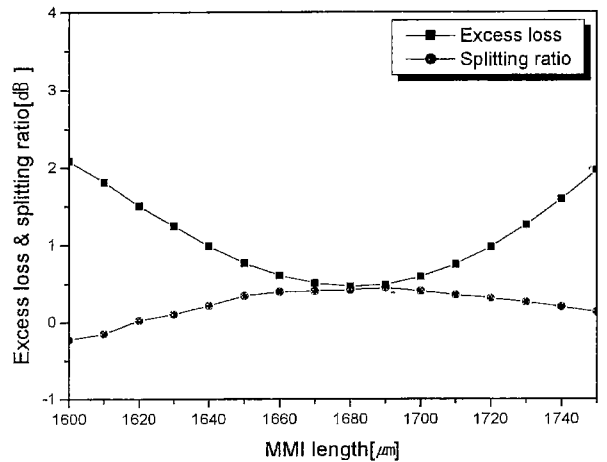


그림 6. MMI 1×4 광파워 분리기기의 다중모드 도파로 길이에 따른 잉여손실과 광파워 분리비.

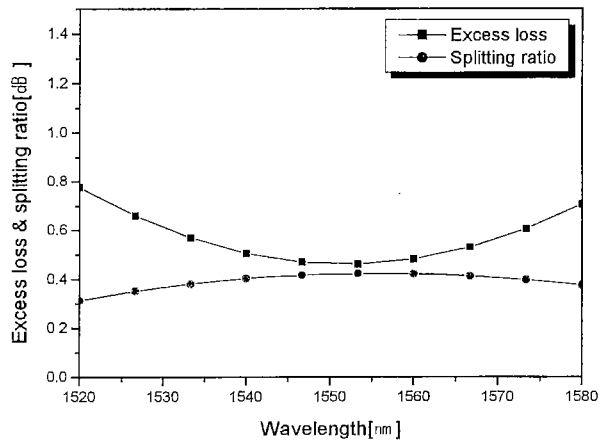


그림 7. MMI 1×4 광파워 분리기기의 파장에 따른 잉여손실과 광파워 분리비.

IV. 실험 및 결과 고찰

1×4 MMI 광파워 분리기를  $Ag^+Na^+$  이온교환법과 유리기판을 이용하여 제작하였다. 2" BK7 유리기판에 알루미늄을 1000Å 증착한 후 일반적인 사진공정을 통해 이온교환용 마스크를 형성하였다. 이온교환은 350°C에서 12시간 동안 진행하고 이온교환용 염은  $AgNO_3[0.001MF]: KNO_3[0.33MF]: NaNO_3[0.67MF]$  비율로 혼합하여 사용하였다.<sup>[9]</sup>

확산 원으로 순수한  $AgNO_3$ 를 사용하지 않고  $NaNO_3$ 에 희석하여 사용한 이유는 순수한  $AgNO_3$ 를 사용할 경우 최대 굴절률 변화량이 0.1정도가 되어 매우 짧은 시간에 다중모드 형성되기 때문에 소자 제작을 위해서는 정확한 온도제어 뿐만 아니라 수초 범위의 시간 제어가 필요하게 된다. 따라서 굴절률의 변형을 쉽게 예측하기 위해 오랜 시간을 이온교환 함으로써 정확한 결과를 예측하고자 함이다. 또한,  $NaNO_3$ 에 희석하여 사용하면 수 시간동안의 이온교환에서 단일 모드가 형성되기 때문에 공정시간을 매우 정확하게 제어하지 않아도 원하는 특성을 얻을 수 있으며  $KNO_3$ 의 역할은 이온교환 중에 BK7 내부에 존재하는  $K^+$  이온이 외부로 확산되는 것을 방지하여 기판 내부의  $Na^+$  이온과 확산 원의  $Ag^+$  이온만의 순수한 이온교환을 기대하기 위해서이다. 그리고  $Ag^+$  이온교환에 의해 형성된 도파로의 경우 도파로 표면의 불균일성이나  $Ag^+$

이온이 표면에서 금속화되어 도파로의 잉여손실이 증가하는 경향이 있기 때문에, 도파로 형성 후 annealing 공정을 해서 도파로를 기판 내부로 더 깊게 확산시켜 잉여손실을 줄이기도 한다. 하지만 이온교환 시간을 12시간 정도의 충분히 길게 할 경우 별도의 annealing 공정을 하지 않아도 그러한 효과를 얻을 수 있다. 그림 8은 소자의 제작과정을 나타내고 있다.

염을 녹이는 동안 생기는 금속화된 이온들은 최대한 적게 하여야 하며 본 실험에서는 여러 차례 염을 녹이고 굳히는 방법을 사용하였다. 마지막으로 이온교환을 통해 제작된 샘플을 단면절개와 연마과정을 거쳐 도파 특성을 단면 결함을 이용해 조사하였다. 그림 9에 제작된 소자의 특성을 파악하기 위한 시스템 구성도를 나타내었다. 1.55 μm 파장을 입사하여 얻은 결과는 그림 10과 같으며 적외선 CCD 영상과 수평 방향 출력의 세기를 비교하였다. 제작된 MMI 1×4 광파워 분리의 광파워 분리비는 1.55 μm의 파장에서 0.46 dB이었다.

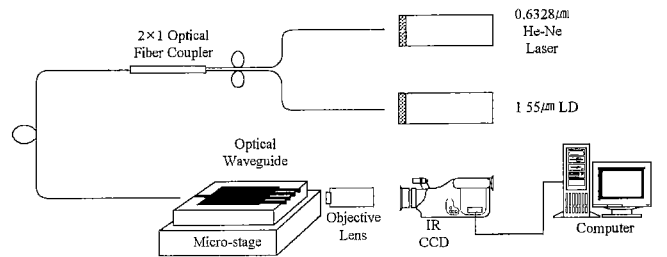


그림 9. 제작된 MMI 1×4 광파워 분리의 특성 측정 장치 구성도.

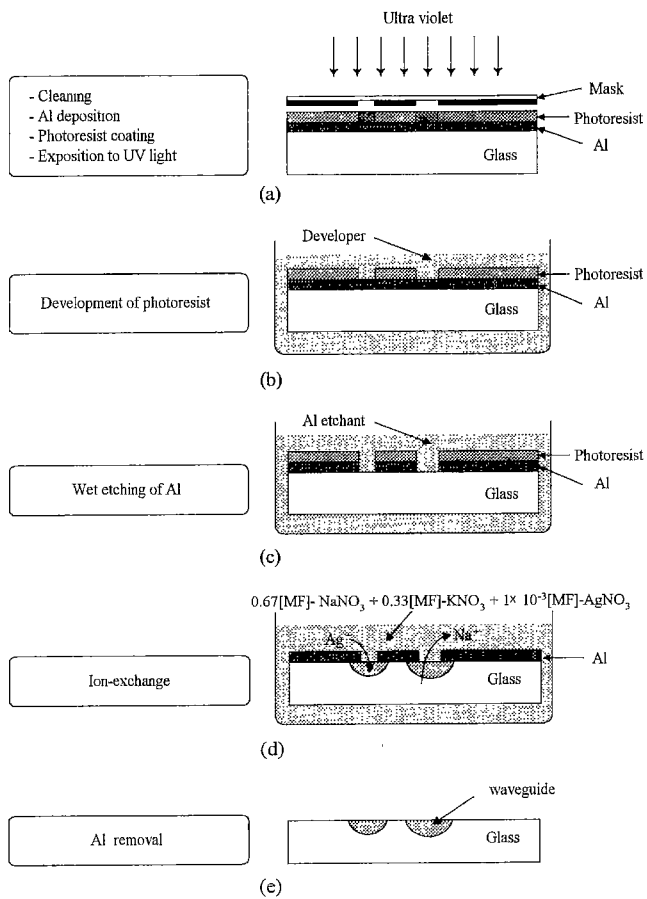


그림 8. 이온교환법을 이용한 광소자 제작 과정.

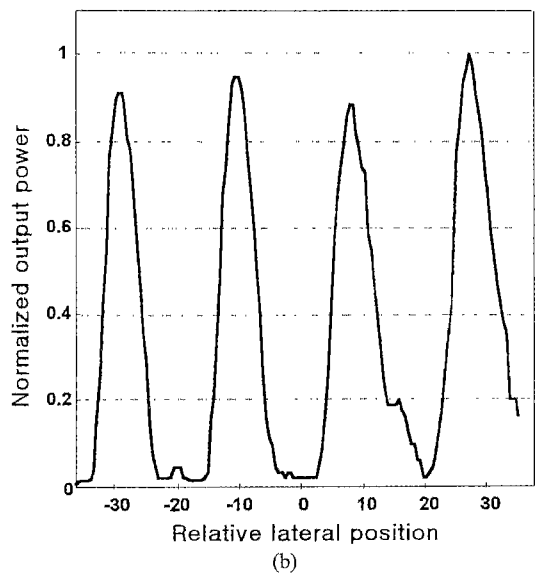


그림 10. 측정된 MMI 1×4 광파워 분리의 모드 사진 (a) 및 수평 방향 광 분포 (b).

### V. 결 론

FD-BPM을 통해 모델링한 결과를 바탕으로 2" BK7 유리기판에 Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> 이온교환을 이용하여 MMI 1×4 광파워 분리기를 제작하였다. 확산 원으로 일정한 비율로 혼합된 염을 사용하였으며 350°C에서 12시간 동안 이온교환하였다. 입력 광원으로 1.55 μm 파장을 입사했을 때 출력되는 소자의 광파워 분리비는 0.46 dB이었다.

### 참고문헌

[1] O. Bryngdahl, *J. Opt. Soc. Amer.* **63**(4), 416-419 (1973).  
 [2] R. Ulrich, *Optics Commun.* **13**(3), 259-264 (1975).  
 [3] L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit, B. H.

Verbeek, A. H. Dubost, and E. C. M. Pennings, *J. Lightwave Technol.* **10**(12), 1843-1850 (1992).  
 [4] P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, and M. K. Smit, *J. Lightwave Technol.* **12**(6), 1004-1009 (1994).  
 [5] G. Motta, G. Perrone, and I. Montrosset, *Proc. SPIE* **3620**, 240-249 (1999).  
 [6] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, *J. Lightwave Technol.* **13**(4), 615-627 (1995).  
 [7] 김민수, Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> 이온교환법을 이용한 BK7 방향성 광결합기의 설계 및 제작, 전북대학교 석사학위논문, 1999.  
 [8] M. A. Fardad and M. Fallahi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**(6), 697-699 (1999).  
 [9] 전금수, 반재경, 대한전자공학회논문지 **35D**(1), 84-93 (1998).

## Fabrication of multi-mode interference 1×4 optical power splitter using glass integrated optics

Dong-Sung Kang<sup>†</sup>, Keum-Soo Jeon, Myung-Ho Jang, and Jae-Kyung Pan

*Division of Electronics & Information Engineering, Chonbuk National Univ., Chonju 561-756, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: dskang@shinbiro.com*

(Received August 3, 2000 ; Revised manuscript received November 7, 2000)

In this paper, we have modeled and fabricated a multimode interference (MMI) 1×4 optical power splitter using finite-difference beam propagation method and Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> ion-exchanged method in BK7 glass. The power splitting ratio of the fabricated MMI 1×4 optical power splitter shows 0.46 dB.

*OCIS codes* : 230.3120, 230.7370, 230.7380, 230.7390.