

Ag⁺-Na⁺ 이온교환법을 이용한 1.31/1.55 μm 두파장 방향성 광 결합기의 모델링 및 제작

강동성¹ · 김희주 · 반재경

전북대학교 전자정보공학부

(561-756) 전북 전주시 덕진동 1가 664-14번지

(2000년 6월 5일 받음, 2000년 9월 15일 수정본 받음)

본 논문에서는 2" BK7 유리 기판에 Ag⁺-Na⁺ 이온교환법을 이용한 1.31/1.55 μm 두 파장 방향성 광 결합기를 제작하였다. 제작 및 모델링 조건으로는 이온교환 온도 340°C, 이온교환 시간 12h, 확산이온농도 0.67[MF]-NaNO₃+0.33[MF]-KNO₃+1×10⁻³[MF]-AgNO₃ 이었으며 굴절율의 분포는 폭 방향으로 가우시안 함수로, 깊이 방향으로 에리 함수 분포로 근사화 하였다. 광 결합기를 구성하는 채널 도파로의 폭은 단일 모드 조건으로부터 4 μm이었고 간격은 8 μm이었다. 제작된 소자의 전체 길이는 16 mm이었으며 광 결합길이는 12.6 mm이었고 1.31/1.55 μm 두 파장에서 각각 18 dB 이상의 소멸비를 나타내었다.

OCIS codes · 230.7390, 130.3120.

I. 서 론

II. 모델링

단일 광섬유에 여러 파장의 광 신호를 동시에 전송하고 수신단에서 혼합된 광 신호를 각각의 파장에 대하여 분리하게 되면 하나의 광섬유를 이용하여 파장 수에 해당하는 배수만큼의 전송용량을 증가시키게 된다. 두 파장 방향성 광 결합기를 이용하면 1.31/1.55 μm 두 파장에 대하여 파장 다중화 및 역다중화가 가능하다. 방향성 광 결합기는 광통신 시스템의 송신단과 수신단에서 광섬유에 광 신호를 입사시키거나 광섬유로부터 광 신호를 분리해내기 위하여 파장 다중화/역다중화 역할을 수행한다. 또한 두 파장을 이용하는 광 CATV와 같은 양방향 통신 시스템을 구축하기 위해서는 방향성 광 결합기는 필수적인 기초소자라 할 수 있다.

1969년 Miller에 의하여 집적광학이 제안되었고 1972년 Izawa에 의하여 유리에 K⁺ 이온을 확산시켜 광 도파로를 제작하는 방법인 이온교환법이 소개되면서 광소자 제작에 대한 연구가 본격화되었다.^[1]

본 논문에서는 BK7 유리 기판에 Ag⁺-Na⁺ 이온교환법을 이용하여 1.31/1.55 μm 방향성 광 결합기를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 일반적으로, 유리에 이온교환법을 이용하여 도파로를 제작할 경우 0.2 dB/cm 이하의 전파손실을 유지할 수 있으며 또한 도파로의 굴절율 분포가 단일모드 광섬유와 매우 유사하여 광섬유와 광소자 사이의 접합면에서 발생하는 접합손실을 줄일 수 있다. 또한 유리를 이용하면 도파로를 제작하였을 때 복굴절 현상이나 편광 의존성이 적어서 수동 소자 제작에 유용하다는 장점이 있다.^[2,3]

방향성 광 결합기의 기본 구조는 그림 1과 같이 두 개의 동일한 채널 도파로로 구성되며 각 도파로는 단일 모드만을 갖고, 광 결합기는 정상 모드로서 그림 3과 같은 전개 분포를 가진 기본 모드와 1차 모드를 갖는다. 약한 결합을 가지는 유리 도파로의 경우, 입력 단에서 이러한 두 모드가 거의 동일한 광 전력을 나누어 가지게 되며 각 모드는 다른 위상 속도로 도파로를 진행한다. 그러므로 두 개의 모드의 상대 위상차이가 180°인 거리에서 완전한 광 결합이 일어나게 되며 이를 결합길이라고 정의한다. 따라서 임의의 거리에서의 광 결합비는 이격 거리 L_G 와 광 전력이 완전히 전달되는 결합길이 l_c , 그리고 모드의 모양을 결정짓는 소멸계수에 의한 모드의 침투도에 의하여 결정된다.

이온교환에 의한 광 도파로의 제작시 굴절율의 형태는 언덕형 굴절율의 형태로 폭 방향에 대해서는 가우시안 분포를 하며 깊이 방향에 대해서는 에리 함수 분포 형태를 갖는다. 이는 일반적으로 깊이 방향에서 사용되는 가우시안 함수와 달리 에리 함수를 그대로 사용하였으며 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.^[4]

$$N(x, y; \lambda) = n_s(\lambda) + \Delta n(\lambda) \operatorname{erfc}(x/d)$$

$$\left[\exp\left(-\frac{(y - W_M)^2}{W_i^2}\right) U(y - W_M) + \exp\left(-\frac{(y + W_M)^2}{W_i^2}\right) U(-y - W_M) + U(y + W_M) - U(y - W_M) \right] \quad (1)$$

¹E-mail: dskang@shinbiro.com

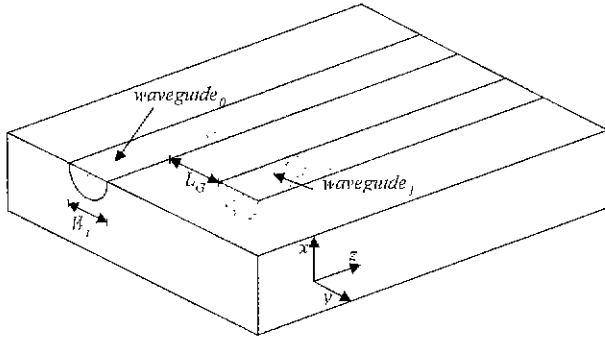


그림 1. 방향성 광결합기의 기본 구조

$$\text{for } x \geq 0, W_M \geq 0, U(y - W_M) = \begin{cases} 0, & y < W_M \\ 1, & y \geq W_M \end{cases}$$

여기에서 $x=0$ 은 광 도파로의 표면을 의미하며, λ 는 자유공간 상태에서의 파장을, $n_y(\lambda)$ 는 파장에 따른 기판의 굴절율을, $\Delta n(\lambda)$ 는 파장에 따른 광 도파로의 최대 굴절을 변화율, d 는 확산 도파로의 유효깊이를, W_M 은 마스크의 폭을, 그리고 W_i 는 폭 방향의 유효확산 반폭을 나타낸다. 굴절을 분포의 $1/e$ 에 해당하는 W_i 는 이온교환 공정으로 인하여 실제 마스크 폭 W_M 에 비해 약 3배정도 넓어지게 되는데 이것은 기판 위에 존재하는 Al 박막 마스크가 전계를 형성하기 때문에 Al 박막 마스크 아래로 이온을 유입시켜 측면 확산을 증가시키기 때문이다. 유효 확산깊이 d 는 $d = \sqrt{D_e t}$ 과 같은 수식을 이용하여 구할 수 있다. 여기에서 t 는 확산시간, D_e 는 확산계수를 나타낸다. 또한 확산온도 K 와 확산계수 D_e 는 $D_e(T) = D_0 e^{-\Delta H/RT}$ 과 같은 관계를 만족한다. 여기에서 ΔH 는 활성화 에너지를 나타내며 온도와 관련된 기체상수 R 은 $8.314[\text{J/K}]$ 이며 K 는 절대 온도를 나타낸다. 평판형 도파로 제작을 통하여 확산계수 D_e 는 확산온도 340°C 에서 $0.355[\mu\text{m}^2/\text{min}]$ 이며 또한 $\ln D_e$ 와 $1/K$ 의 관계곡선의 기울기 $\Delta H/R$ 은 $13208[\text{m}^2/\text{sec}]$ 로 결정하였다. 따라서 활성화 에너지 ΔH 는 $1.098 \times 10^5[\text{J}]$ 이 되며 확산상수는 $1.2597 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{sec}]$ 가 되었다. BK7의 굴절율은 $1.31 \mu\text{m}$ 와 $1.55 \mu\text{m}$ 에 대해서 각각 1.5032와 1.5004이며 이온교환 도파로의 경우 확산깊이에 대한 확산폭의 비가 2.5~3배가 되기 때문에 굴절율과 마스크 폭 W_M 에 따른 유효확산 폭 W_i 를 식 (2), 식 (3)과 같이 정하였다.^[5-7] 그리고 확산 깊이 d 는 채널 도파로에 대한 비례상수를 적용하였다.

$$N = \sqrt{n_0 + n_1 \lambda^2 + n_2 \lambda^{-2} + n_3 \lambda^{-4} + n_4 \lambda^{-6} + n_5 \lambda^{-8}}$$

$$\begin{aligned} n_0 &= 2.269185 \\ n_1 &= -9.449785 \times 10^{-3} \\ n_2 &= 1.163685 \times 10^{-2} \\ n_3 &= -1.380360 \times 10^{-4} \\ n_4 &= 4.419505 \times 10^{-5} \\ n_5 &= -2.344665 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_i = C W_M, C = \frac{1}{7} (W_M - 3) + 2.5 \quad (3)$$

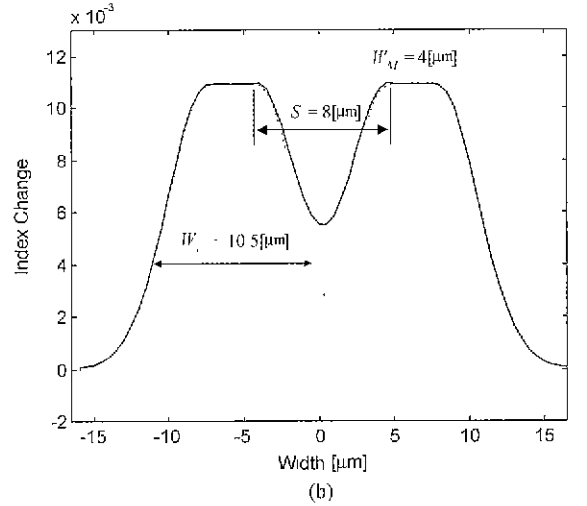
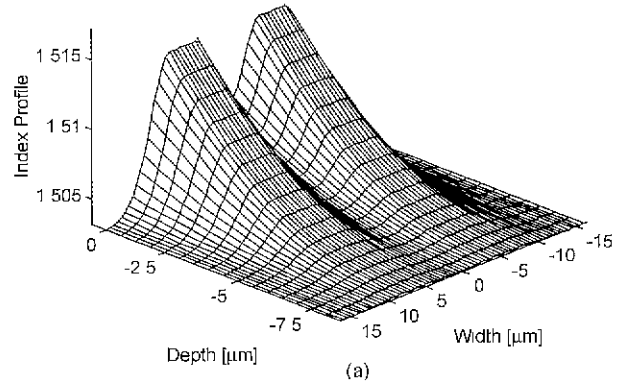


그림 2. 굴절을 분포. 점선(---): 각각의 채널도파로의 굴절을 분포, 실선(—): 직선형 방향성 광결합기의 굴절을 분포

방향성 광 결합기는 동일한 두 개의 채널 도파로로 구성되어 있기 때문에 굴절을 분포는 채널 도파로의 굴절율의 합으로 간주할 수 있다. 그림 2의 (a)는 마스크 폭 W_M 이 $4 \mu\text{m}$ 이고 채널 도파로 사이의 이격 거리 S 가 $8 \mu\text{m}$ 인 방향성 광 결합기의 3차원 굴절율 분포를 나타낸 것이다. 이 때 이온교환 시간 t 와 이온교환 온도 T 는 채널 도파로 제작 시 사용했던 값과 동일하게 적용하였다. 그림 2의 (b)는 기판 표면에서의 굴절을 분포를 나타낸 것으로 점선은 각각의 채널 도파로의 굴절을 분포를 나타내며, 실선은 각각의 채널 도파로의 굴절율의 합인 방향성 광 결합기의 굴절율 분포를 나타낸다. 이를 토대로 유한 차분법을 이용하여 그림 3과 같은 전계 분포를 갖는 방향성 광 결합기의 모드 해석 결과를 나타내었다. 그림 3의 (a)와 (c)는 각각 $1.31 \mu\text{m}$ 와 $1.55 \mu\text{m}$ 광에 대한 기본 모드를 나타낸 것이며 (b)와 (d)는 각각 $1.31 \mu\text{m}$ 와 $1.55 \mu\text{m}$ 광에 대한 1차 모드를 나타낸 것이다. 즉, 설계된 방향성 광결합기는 두 파장에서 각각 두 개의 모드를 가지게 되며 각 파장에 대한 기본 모드의 전파상수 β_{fund} 와 1차 모드의 전파상수 β_{1st} 값을 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \beta_{\text{fund}}(1.31) &= 7.2153300 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \\ \beta_{1st}(1.31) &= 7.2144006 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

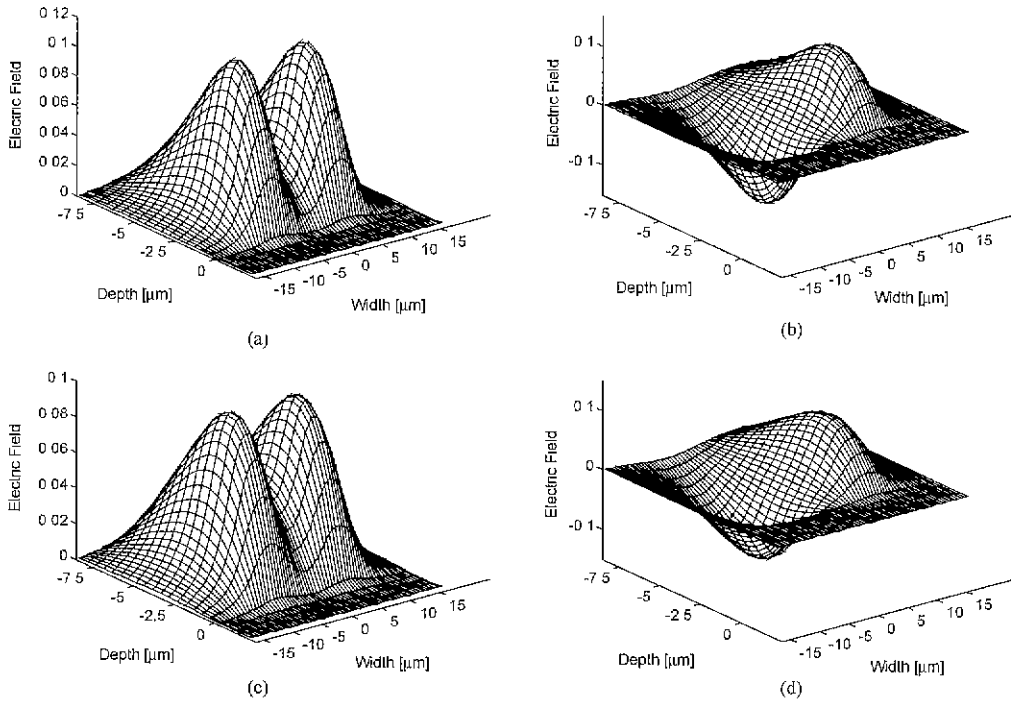


그림 3. 방향성 광결합기의 기본 모드와 1차 모드. (a) λ=1.31 μm에 대한 기본모드의 전계 분포, (b) λ=1.31 μm에 대한 1차모드의 전계 분포. (c) λ=1.55 μm에 대한 기본모드의 전계 분포, (d) λ=1.55 μm에 대한 1차모드의 전계 분포.

$$\begin{aligned} \beta_{fund}(1.55) &= 6.0821882 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \\ \beta_{1st}(1.55) &= 6.0807854 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 1.31 μm와 1.55 μm 광의 첫 번째 결합길이는 두개의 모드가 180°의 상대 위상차이를 갖는 거리이며 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$l_c(1.31) = \frac{\pi}{\beta_{fund} - \beta_{1st}} \cong 4.3 \text{ [mm]} \quad (6)$$

$$l_c(1.55) = \frac{\pi}{\beta_{fund} - \beta_{1st}} \cong 2.432 \text{ [mm]} \quad (7)$$

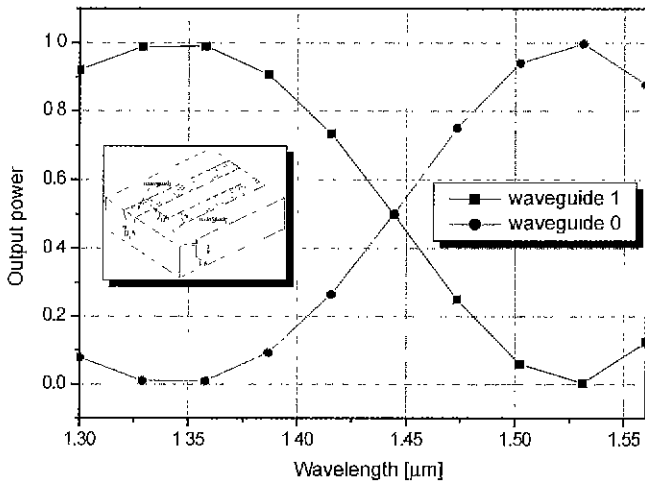


그림 4. 방향성 광결합기의 출력 파워.

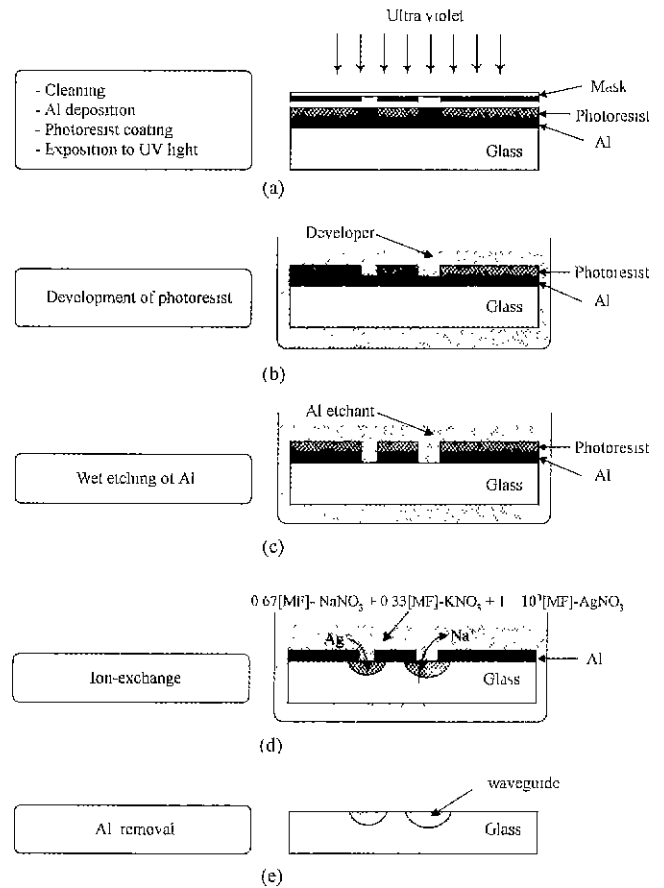


그림 5. 방향성 광결합기 제작공정.

위 결과에 따르면 1.31 μm 광이 4.3 mm를 진행한 후 이웃하는 채널 도파로로 완전 광전달이 이루어지고 1.55 μm 광은 4.864 mm를 진행하면 두 번의 재결합을 통하여 초기 채널 도파로로 완전 광전달을 하게 된다. 하지만 1.31/1.55 μm 파장의 광 결합길이가 서로 배수관계에 적용되지 않기 때문에 유한 차분법에 의한 모델링 결과에 의존하여 12.6 mm로 설정하였으며 이에 따른 출력 파워를 그림 4에 보였다. 여기에서 도파로 0과 도파로 1의 출력 파워를 각각 P_0 와 P_1 으로 정의한다면 교차비는 같은 파장에 대해 $10\log(P_0/P_1)$ 로 정의하여 완전한 광 파워 전달에 대한 상대적인 값으로 나타내었으며 소멸비는 각 출력단에 서로 다른 두 개의 파장이 갖는 광 파워의 비로 각각 $10\log\{P_0(1.31 \mu\text{m})/P_0(1.55 \mu\text{m})\}$, $10\log\{P_1(1.55 \mu\text{m})/P_1(1.31 \mu\text{m})\}$ 로 나타내었다. 특히, 1.32 μm 와 1.53 μm 에서 최고의 교차비를 보였으며 각각 20.2 dB와 25.2 dB이었다. 그리고 1.31 μm 와 1.55 μm 에서는 19 dB와 20 dB를 가졌다. 또한 이론적인 소멸비는 1.31 μm 와 1.55 μm 에서 각각 20.02 dB로 거의 같은 값을 보였다.

III. 제작과정

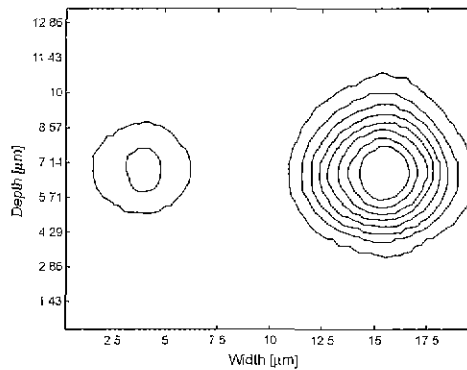
그림 5에서 방향성 광 결합기의 제작과정을 설명하였다. 이온교환은 NaNO_3 와 KNO_3 를 혼합하여 사용하였으며 이는 순수한 AgNO_3 를 이용할 때 보다 굴절율의 조절이 용이하며 소자 제작 후 다시 열처리를 하지 않고도 이온교환과 동시에 열

처리의 효과를 가질 수 있기 때문이다.

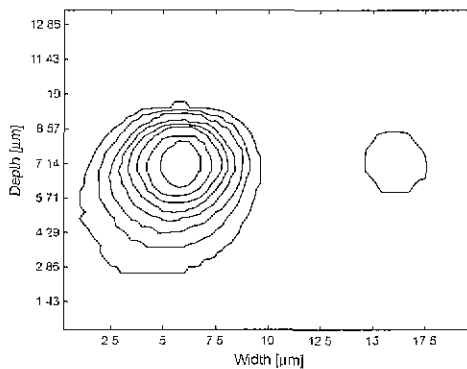
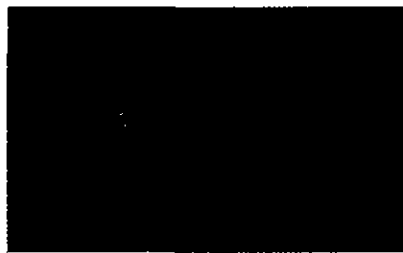
IV. 측정 및 결과고찰

제작된 방향성 광 결합기의 도파 특성을 측정하기 위하여 1.31 μm 와 1.55 μm 출력 파장의 반도체 레이저 다이오드를 사용하여 도파 모드를 측정하였다. 제작된 소자가 1.31 μm 와 1.55 μm 에 대하여 소자의 도파로 폭과 도파로 사이의 간격 그리고 방향성 광 결합기의 길이에 따라 광 전력 전달도가 결정되기 때문에 길이에 따라 모드가 양 도파로에 모두 존재하거나 또는 이웃하는 도파로 혹은 최초로 광이 입사된 도파로로 재결합하여 하나의 도파로에만 모드가 집중될 수 있다. 이것은 진행방향에 대하여 광 전력의 전달이 이루어지고 있음을 보이는 것이며, 방향성 광 결합기의 출력단에서 광 전력을 측정하였을 때 두 도파로 모두에서 출력이 발생할 경우 광 전력이 완전히 전달되는 길이에 대하여 연마작업을 하면 두 도파로 중 어느 한 도파로에서만 도파 모드를 관측할 수 있다.

그림 6의 (a)와 (b)는 마스크 폭 W_M 이 4 μm , 채널 도파로 사이의 간격 S 가 8 μm 인 경우로, 1.31 μm 의 파장에서 오른쪽 도파로에 대부분의 모드가 집중되었으며 1.55 μm 파장에서는 왼쪽 도파로에 광 전력이 집중되어 있다. 즉, 하나의 도파로에 다중화된 1.31 μm 와 1.55 μm 의 광을 입력하면 출력단에서는 각각의 도파로에서 이상적인 경우에 단일 파장만을 취할 수 있게 된다. 이것은 파장 분리기의 가장 단순한 형태라



(a) $W_M=4\mu\text{m}$, $S=8\mu\text{m}$, $\lambda=1.31\mu\text{m}$



(b) $W_M=4\mu\text{m}$, $S=8\mu\text{m}$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$

그림 6. 제작된 방향성 광결합기의 측정 모드

고 볼 수 있다. 역으로 입출력 방향을 바꾸어 각각의 도파로에 1.31 μm 와 1.55 μm 의 광을 입력하였을 경우, 출력단에서는 단일 도파로에 이들 두 파장의 광이 다중화되어 출력된다. 소자의 전체 길이는 16 mm이었으며 광결합이 발생하는 부분의 길이는 12.6 mm이었다. 또한 마스크 폭 W_M 은 4 μm 이었고 도파로 사이의 간격 S 는 8 μm 이었다. 출력되는 모드의 소멸비는 모델링 과정에서 각각 20.02 dB를 가졌지만 측정 결과에서는 최소 18 dB 이상으로 측정되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 1.31/1.55 μm 방향성 광 결합기를 위한 차분법을 이용해 모델링 하였으며 유리집적광학을 이용해 제작하였다. 이 때 굴절율의 모델링은 평판형과 채널형의 제작으로부터 폭 방향은 가우시안 분포를 하는 것으로 깊이 방향으로는 에러 함수 분포를 하는 것으로 함수화 하였다. 제작된 소자는 결합길이에 따라 3 dB 분리기 및 방향성 광 결합기의 특성을 가질 수 있으며 cut-back method에 의해 적당한 길이를 갖도록 연마하여 이를 조절할 수 있었다. 방향성 광 결합

기의 경우, 소자의 전체 길이가 16 mm이고 광 결합길이가 12.6 mm 일 때 마스크 폭 W_M 이 4 μm 이고 도파로 사이의 간격 S 가 8 μm 에 대해 출력되는 모드의 소멸비는 18 dB 이상으로 측정되었다.

참고문헌

- [1] T. Izawa and H. Nakagome, Appl. Phys. Lett. **21**, 584 (1972).
- [2] R. V. Ramaswamy and R. Srivastava, J. Lightwave Tech. **6**, 984 (1988).
- [3] J. Johansson, G. Djanta, and J.-L. Coutaz, Appl. Opt. **31**, 2796 (1992).
- [4] G. L. Yip and J. Albert, Opt. Lett. **10**, 151 (1985).
- [5] 전금수, 반제경, 대한전자공학회 논문지 **35-D**, 84 (1998).
- [6] A. Miliou, H. Zhenguang, H. C. Cheng, R. Srivastava, and R. V. Ramaswamy, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 1889 (1989).
- [7] C. P. Hussell, R. V. Ramaswamy, R. Srivastava, and J. L. Jackel, Appl. Phys. Lett. **56**, 2381 (1990).

Modeling and fabrication of 1.31/1.55 μm coarse WDM optical directional coupler using Ag^+Na^+ ion-exchanged glass

Dong-Sung Kang[†], Hee-Ju Kim, and Jae-Kyung Pan

Division of Electronic and Information Engineering Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

[†]*E-mail: dskang@shinbiro.com*

(Received June 5, 2000. Revised manuscript received September 15, 2000)

A 1.31/1.55 μm coarse WDM optical directional coupler that consists of two identical straight channel waveguides in BK7 glass has been fabricated. The separation between two channel waveguides is 8 μm and the waveguide width is 4 μm . Especially, we assumed that the index profile is Gaussian function and complementary error function in the width direction and depth direction, respectively. This directional coupler operating at 1.31/1.55 μm with crosstalk of 18dB is demonstrated and has the 16 mm long length with 12.6 mm coupling region.

OCIS codes : 230.7390, 130.3120.