

PLC형 WDM 방향성결합기와 UV 조사에 의한 파장 천이 효과

한상필 · 박태상 · 최영복 · 강민정 · 김상인 · 박수진 · 정기태

한국통신 기업자망연구소 광통신연구팀

(1999년 6월 21일 받음, 2000년 2월 2일 수정본 받음)

일반적으로 광섬유 격자에 사용되고 있는 KrF 액시머 레이저를 광출력 스펙트럼 파장천이용으로 이용하였다. 실험결과, FHD에 의해서 제작된 PLC형 WDM 방향성결합기에서는 UV에 의한 파장천이효과가 비교적 큼을 알 수 있었다. UV 노출량에 의한 파장천이량을 측정하여 UV 노출량에 따른 실리카 광도파로의 유효굴절률 변화량을 계산하였다.

I. 서 론

광통신망에서 WDM(wavelength division multiplexing) 광전송방식이 점차 일반화되면서 WDM용 광소자의 중요성이 점차 증대되고 있다. 이 중 WDM 다중화/역다중화기는 광 CATV, 광선로 감시, 광중계기용 등으로 사용될 수 있다. 특히, 현재 광중계기용으로 쓰이는 WDM 다중화/역다중화기는 전향 및 후향의 송수신용 광의 파장을 각각 분리하여 1.31 μm 및 1.55 μm 파장대로 이용되고 있다. 광중계기는 PCS, WLL, IMT-2000 등과 같은 무선통신의 기지국 대체용으로 활용되고 있으며, 다가오는 2002년도 IMT-2000 시범 서비스 이후 광중계기의 수요는 현재보다 더 증가할 것으로 보인다.

이러한 WDM 다중화/역다중화기는 다층박막형 간섭필터, 광섬유형 혹은 PLC(planar lightwave circuit)형 Mach-Zehnder 간섭기 및 방향성 결합기 등으로 구현이 가능하다. 다층박막형 간섭필터는 굴절률이 서로 다른 이종의 박막을 교변적으로 적층하여 원하는 파장대에서 투과 혹은 반사특성을 이용하는 것으로 정밀한 굴절률값과 박막두께의 제어가 요구된다. 광섬유형 Mach-Zehnder 간섭기 및 방향성 결합기는 출력되는 광스펙트럼을 관측하면서 제작하여, 원하는 광특성을 획득하기에는 유리하나 대량생산에서는 적합하지 않다. 마지막으로, PLC형 Mach-Zehnder 간섭기와 PLC형 방향성 결합기를 비교하여 볼 때 Mach-Zehnder 간섭기는 길이 차이에 의한 파장선택이 용이하여 광대역 WDM에 적합하기는 하나 설계변수가 비교적 많은 단점이 있다. 이에 반해 PLC형 방향성 결합기는 단지 두 도파로의 결합길이에 의해서 광출력 특성이 결정되기 때문에 1.31 μm 및 1.55 μm 파장대와 같은 두 파장대를 요구하는 협대역 WDM 소자에 알맞는 구조이다.

본 논문에서는 비교적 소형화, 대량생산 및 집적화에 적합한 PLC형 1.31/1.55 μm WDM 방향성결합기를 설계 및 제작하여 광출력특성을 측정하였다. 원하는 파장대에서 광특성을 얻기 위하여 KrF 액시머 레이저에 의한 UV(ultraviolet)를 PLC 소자 표면 전체에 균일하게 조사하여 광도파로 코아의 굴절률을 변화시키고 이로 말미암아 광출력 스펙트럼 파장대역 천이를 가능케 하였다.^[1,2] 그리고, 높은 UV 광민감성 효과를 유도

하기 위하여 PLC 소자를 일정시간동안 수소처리하였다.^[3]

II. PLC형 WDM 방향성결합기의 설계

$\Delta(n_{co}/n_{cl}-1) = 0.7\%(n_{co}: 코아의 굴절률, n_{cl}: 클래드의 굴절률)$ 인 사각형 실리카 광도파로 코아의 W_H (가로 폭) 및 W_V (세로 폭)이 모두 5.5 μm이고 두 도파로간 간격 S가 4.5 μm, 굽은 도파로의 곡률반경 $R = 10000 \mu m$ 인 경우에 대해서 WDM 방

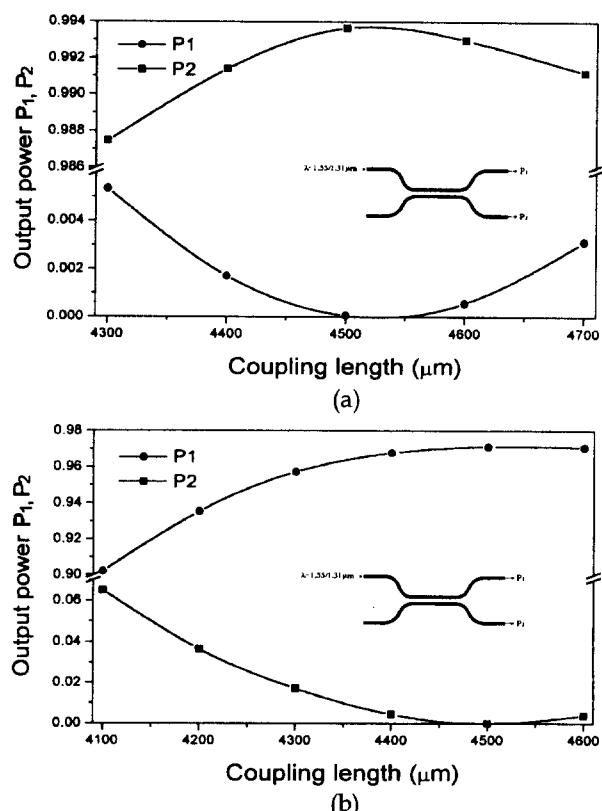


그림 1. BPM에 의해서 계산된 결합길이에 따른 출력 광 전력($\Delta = 0.7\%$, $W_H = W_V = 5.5 \mu m$, $S = 4.5 \mu m$, $R = 10000 \mu m$) (a) $\lambda = 1.31 \mu m$, (b) $\lambda = 1.55 \mu m$.

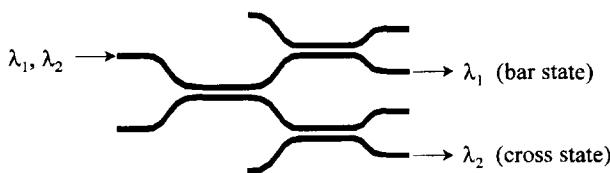
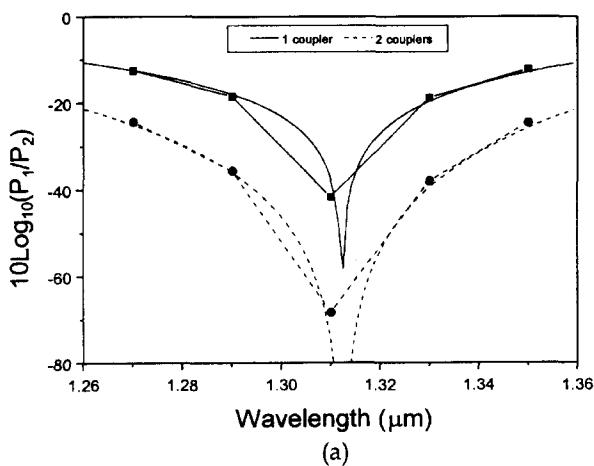


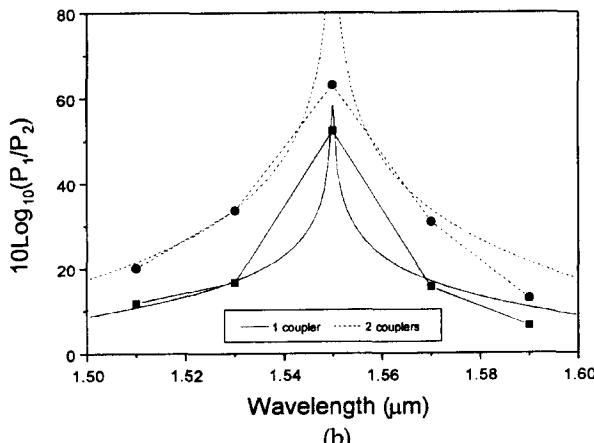
그림 2. 2단구조의 WDM 방향성결합기.

향성결합기의 결합길이에 따른 광출력특성을 BPM(beam propagation method)에 의해서 계산하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 결합길이 L_c 가 4500 μm에서 1.31 μm 및 1.55 μm 광파장에서 동시에 광전력이 최대가 됨을 알 수 있으며, 실제 제작할 때에도 L_c 를 4500 μm로 고정시켰다.

보다 넓은 대역폭 및 높은 아이솔레이션(isolation)의 광특성을 얻기 위해서 그림 2와 같이 방향성결합기를 직렬로 연속해서 연결하는 2단 구조를 채택하였다.^[4,5] BPM 수행 결과에 의하면, 이러한 2단구조의 WDM 방향성결합기에 대한 아이솔레이션($\equiv 10\log_{10}(P_1/P_2)$, P_1 : bar 상태에서의 광전력, P_2 : cross 상태에서의 광전력)이 30dB 이상을 유지하는 대역폭은 그림 3에서 보는 바와 같이 bar 상태에서 1.55 μm 파장을 중심으로 하여 40 nm, cross 상태에서 1.31 μm 파장을 중심으로 하여 45 nm로 계산되었다.



(a)



(b)

그림 3. 계산된 2단 WDM 방향성결합기의 파장에 따른 아이솔레이션(선: 결합모드이론, 점: BPM, $\Delta = 0.7\%$, $W_H = W_V = 5.5 \mu\text{m}$, $S = 4.5 \mu\text{m}$, $L_c = 4500 \mu\text{m}$, $R = 10000 \mu\text{m}$) (a) $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 파장대, (b) $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 파장대.

로 하여 45 nm로 계산되었다.

III. 실험 결과

본 실험에서 사용된 WDM 방향성결합기는 FHD(fire hydrolysis deposition)에 방법에 의해서 제작되었으며, 실리카 광도파로 코아내에 GeO₄가 11mol% 도핑되어 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 실제 제작된 광도파로 코아의 가로 폭은 5.9 μm 세로 폭은 5.2 μm, 언더-클래드층은 24.5 μm, 오버-클래드층은 25.5 μm로 측정되었다. 그림 4는 먼저, 제작된 소자의 양단면을 연마한 후 한 단면은 광학현미경으로 관찰하고 다른 한 단면은 백색광원을 입사시킴으로써 얻어진 것이다.

이렇게 제작된 WDM 방향성결합기의 광도파로와 광섬유를 양단면에 butt-coupling시켜 그 특성을 측정하였다. 이때 입사 광은 광대역 광원(HP8343A)을 사용하였으며, 출력광은 광스펙트럼 분석기(AQ-6315A)로 분석하였다.

그림 5(a)에서와 같이 입력단에 1200~1700 nm 대역의 광을 동시에 입사시켰을 때 WDM 방향성결합기를 통과한 후 출력 단 bar 상태에서는 1417 nm(설계치는 1550 nm), cross 상태에서는 1200 nm(설계치는 1310 nm)가 중심파장으로 측정되었다. 원하는 광출력 스펙트럼의 파장대역을 얻기 위해서 결합모드 이론에 의한 다음과 같은 2단구조의 WDM 방향성결합기에 대한 광출력 관계식을 살펴보면, 이미 제작되어있는 소자에 대해서 변화를 줄 수 있는 변수는 도파로의 굴절률 분포 즉, 코아의 굴절률이다.

$$P_{bar} = \cos^4 xL \quad (\text{bar 상태}) \quad (1)$$

$$P_{cross} = \sin^4 xL \quad (\text{cross 상태}) \quad (2)$$

여기서, L은 두 도파로간 결합길이($L_c = 4500 \mu\text{m}$)이고, κ는 두 도파로간 결합계수로써 도파로의 폭($W_H = 5.9 \mu\text{m}$, $W_V = 5.2 \mu\text{m}$), 두 도파로간 간격($S = 4.5 \mu\text{m}$), 입사광의 파장 및 도파로의 굴절률 분포의 함수이다.

먼저 UV에 높은 광민감성 효과를 얻기 위하여 제작된 소자

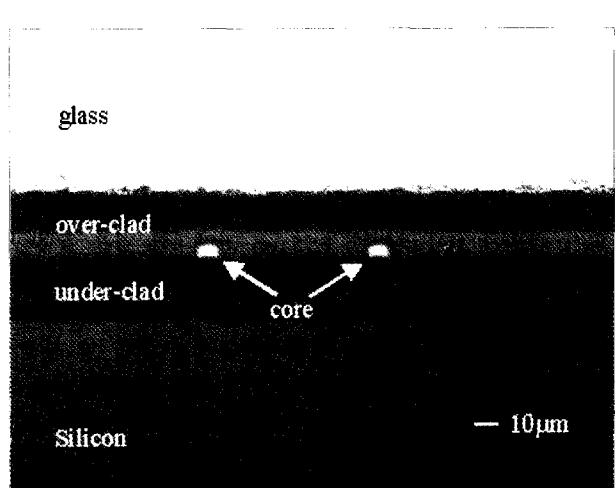


그림 4. 광학현미경에 의한 실리카 도파로의 단면모습.

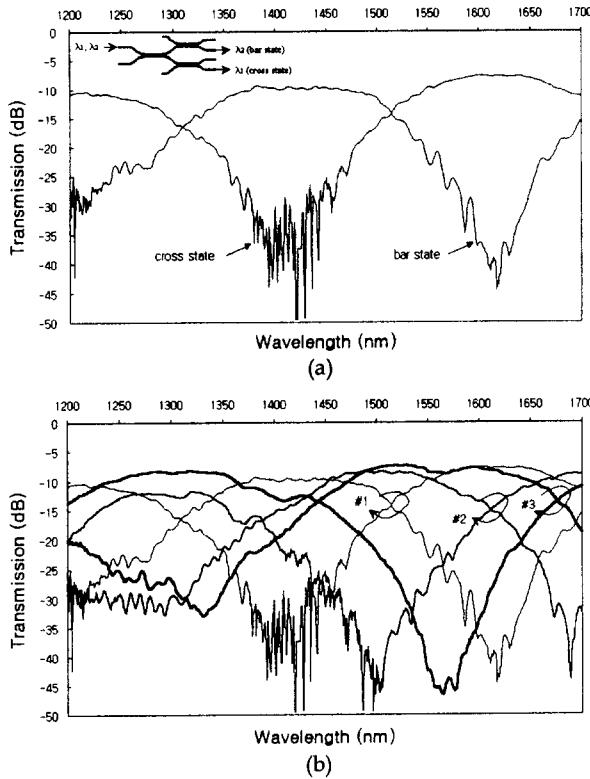


그림 5. UV 노출시간에 따른 출력 광스펙트럼 (a) bar 상태 및 cross 상태 정의, (b) #1: 0분, #2: 60분, #3: 90분 (100기압, 40°C에서 72시간동안 수소처리, 540 mJ/cm²/pulse, 3 Hz).

를 100기압, 40°C에서 72시간동안 수소처리하였다. 그리고 파장이 248 nm인 KrF 액시머 레이저에 의한 UV를 폴스당 540 mJ/cm², 3 Hz 조건에서 소자의 표면 전체에 균일하게 조사하여 도파로 코아의 굴절률을 변화시켜 보았다. 이것은 광스펙트럼상에 출력된 파장대역을 원하는 파장대역으로 천이킬 수 있는 효과가 있었다. 그림 5(b)에서의 #1은 UV를 조사하지 않은 경우, #2는 UV를 60분 동안을 조사한 경우, 마지막으로 #3은 UV를 90분 동안을 조사한 경우이다. UV에 의한 노출량이 많으면 많을수록 전체적인 출력 광스펙트럼의 파장대역은 장파장 방향으로 천이됨을 알 수 있다.

한편, 결합모드이론에 의하여 도출된 식 (1) 및 (2)를 그림 5(b) #1, #2 및 #3 경우의 출력파장에 맞도록 적용하여 계산하면 그림 6과 같은 손실없는 이상적인 WDM 방향성결합기의 유효굴절률에 따른 출력 광스펙트럼을 얻을 수 있다. 이 그래프는 유효굴절률법에 의해서 2차원의 사각도파로를 1차원의 평판도파로로 변환시킨 후 다음의 식 (3)~(7)을 식 (1) 및 (2)에 적용시키면 된다.^[6]

$$\kappa = \frac{2pq^2 \exp(-pS)}{\beta \left(w + \frac{2}{p} \right) (p^2 + q^2)} \quad (3)$$

$$p = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2} \quad (4)$$

$$q = \sqrt{k_0^2 N_{co}^2 - \beta^2} \quad (5)$$

$$\beta = k_0 N_{eff}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

이때의 파라미터값들은 $\Delta = 0.7\%$, $w = 5.5 \mu\text{m}$, $S = 4.5 \mu\text{m}$ 로 놓았으며, 결합길이 L 은 굽음 도파로에 의한 기생결합을 고려하여 그 길이를 조정하였다. 그리고, N_{co} 는 유효굴절률법에 의하여 계산된 평판도파로의 코아 굴절률을 의미한다. 파장에 따른 클래드 굴절률 n_{cl} 계산은 다음과 같은 SiO_2 벌크에 대한 Sellmeier 분산방정식을 이용하였다.^[7]

$$n_{cl}^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - L_i^2} \quad (7)$$

여기서, $a_1 = 0.6961663$, $a_2 = 0.4079426$, $a_3 = 0.8974794$
 $L_1 = 0.0684043$, $L_2 = 0.1162414$, $L_3 = 9.896161$

그림 5(b) 및 그림 6을 바탕으로 그림 7과 같은 UV 노출시간에 따른 파장천이량 및 유효굴절률의 변화량(파장이 1.55 μm에 대한 유효굴절률값)을 구할 수 있다. 결과적으로, UV를 상기의 조건으로 90분 동안 조사하였을 때 파장천이는 양의 방향으로 148 nm, 유효굴절률은 양의 방향으로 1.87 ×

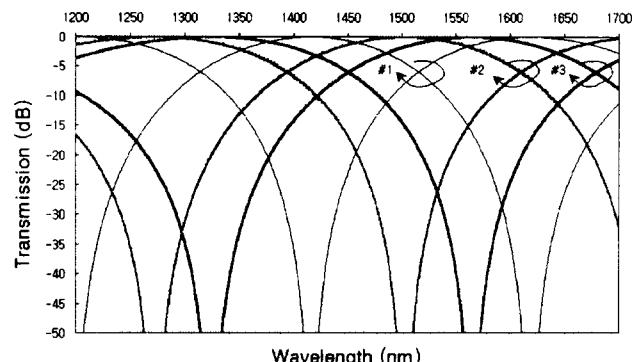


그림 6. 결합모드이론에 의해서 계산된 WDM 방향성결합기의 출력 광스펙트럼(#1: $N_{eff} = 1.447174$ @1.55 μm, #2: $N_{eff} = 1.448214$ @1.55 μm, #3: $N_{eff} = 1.449046$ @1.55 μm).

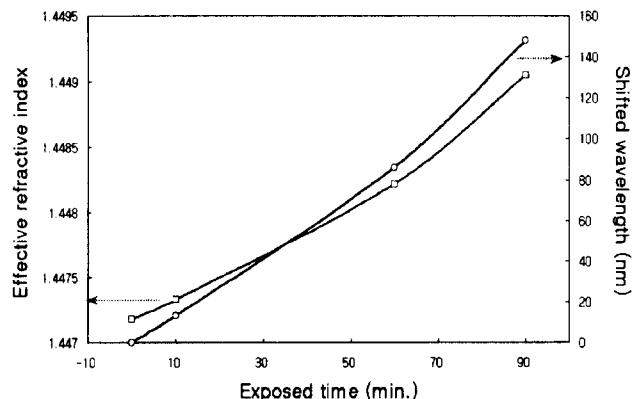


그림 7. UV 노출시간에 따른 파장 천이량 및 유효굴절률 변화량 (100기압, 40°C, 72시간 수소처리, 540 mJ/cm²/pulse, 3Hz).

10^{-3} 만큼 증가하였다.

그리고, 본 실험에 사용된 2단구조의 WDM 방향성결합기에 대한 아이솔레이션 및 대역폭을 측정한 결과, 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 bar 상태에서는 30 dB이상을 유지하는 대역폭이 1567 nm 파장을 중심으로 하여 44 nm, cross 상태에서는 20 dB이상을 유지하는 대역폭이 1327 nm 파장을 중심으로 하여 45 nm로 측정되었다. 이 것은 1310 nm 파장대에서는 설계치가 30 dB이상이 45 nm로 아이솔레이션이 전체적으로 10 dB 가 감소한 결과를 얻었지만, 1550 nm 파장대에서는 설계치가 30 dB이상이 40 nm로 비교적 유사한 결과를 가졌다.

IV. 결 론

본 논문에서는 FHD에 의한 2단 구조의 PLC형 WDM 방향성결합기를 구현하였으며, 일반적으로 광섬유 격자에 사용되고 있는 파장이 248 nm인 KrF 엑시머 레이저를 출력스펙트럼 파장천이용으로 이용하였다. 소자를 100기압, 40°C에서 72시간동안 수소처리하고, KrF 엑시머 레이저에 의한 UV를 펄스당 540 mJ/cm², 3 Hz 조건에서 소자의 표면 전체에 균일하게 90분 동안 조사하였을 때 파장천이는 양의 방향으로 148 nm, 유효굴절률은 양의 방향으로 1.87×10^{-3} 만큼 증가하였다. 이때의 2단 구조 PLC형 WDM 방향성결합기의 광출력 특성은 bar 상태에서는 30 dB이상을 유지하는 대역폭이 1567 nm 파장을 중심으로 하여 44 nm, cross 상태에서는 20 dB이상을 유지하는 대역폭이 1327 nm 파장을 중심으로 하여 45 nm로

측정되었다.

감사의글

본 연구는 부분적으로 정보통신부 선도기반기술개발사업의 지원 받아 이루어졌으며, 본 연구에 사용된 소자의 sample을 제작하여 주신 한국전자통신연구원에 성희경 박사, 심재기 연구원, 김태홍 연구원, 신장우 연구원 및 박상호 연구원께 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, Opt. Lett. **14**, 823 (1989).
- [2] G. E. Kohnke, C. H. Henry, E. J. Laskowski, M. A. Capuzzo, T. A. Strasser, and A. E. White, Electron. Lett. **32**, 1579 (1996).
- [3] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed, Electron. Lett. **29**, 1191 (1993).
- [4] K. Imoto, H. Sano, M. Miyazaki and Y. Takasaki, Electron. Lett. **23**, 472 (1987).
- [5] Y. P. Li, C. H. Henry, C. Y. Laskowski, H. H. Yaffe and R. L. Sweatt, Electron. Lett. **31**, 2100 (1995).
- [6] Amnon Yariv, *Optical Electronics* (Saunders College Publishing, 1991), Chapter 13.
- [7] M. J. Adams, *An introduction to optical waveguides* (John Wiley & Sons, N.Y., USA, 1981), Chapter 7.

PLC-Type WDM directional coupler and the effect of wavelength shift by UV irradiation

Sang-Pil Han, Taesang Park, Young-Bok Choi, Min-Jeong Kang,

Sang-In Kim, Soo-Jin Park and Ki-Tae Jeong

Optical Communication Research Team, Access Network Laboratory, Korea Telecom Taejeon, 305-348, Korea

(Received June 21, 1999, Revised manuscript received February 2, 2000)

KrF excimer laser, which is useful for fabrication of fiber gratings, was irradiated on the PLC-type WDM directional coupler and the transmission wavelength shift was observed as a function of UV exposure time. The effective refractive index change of rectangular silica waveguide was calculated from the wavelength shift measurement and the coupled mode theory.