

테이퍼 결합구조를 갖는 4×4 성형 결합기에 관한 연구

윤현성^o, 김정근
광주대학교 전자공학과
광주광역시 남구 진월동 592-1번지, 503-703
e-mail : hsyoon@elec.kwangju.ac.kr^o

A Study on Silica based 4×4 Optical Star Coupler with Tapered Coupling Structure

Hyeon-Seong Yoon^o, Jeong-Geun Kim
Department of Electronic Engineering, Kwangju University
e-mail : hsyoon@elec.kwangju.ac.kr^o

Abstract : In this paper, we design 4×4 optical star coupler with tapered coupling structure. The 4×4 optical star coupler consists of four 3dB couplers and a 100% coupler with tapered structure. This star coupler is designed by the 2 dimension FD-BPM(finite difference beam propagation method) using TBC(transparent boundary condition). Consequently, the maximum power unbalance ratios of relative output power from each of the output waveguides for each of input guides are less than 0.1dB, and the transmission efficiency is more than 99%.

I. 서론

최근의 정보통신량의 급증추세에 따라 광섬유를 사용한 광통신에 관한 연구가 진행되고 있으며, 광통신망을 구성하기 위해서는 여러 가지 소자가 필요하다.

광통신망을 구성하는 중요소자중 하나인, 성형결합기(star coupler)는 여러개의 입력과 출력포트를 가지고 있으며, 각 입력 포트에서 들어오는 광입력을 여러 출력포트로 균등하게 보내는 기능을 갖는 소자이다.

본 논문에서는 광도파로(optical waveguide)를 이용한 3 dB 결합기[1]-[3]와 100% 결합기를 테이퍼(taper)를 갖는 결합영역(coupling region)을 제안하여 설계하였으며, 이를 이용하여, 4×4 성형 결합기를 설계하였고, 광

도파로 모델은 실리카 매립형 채널 도파로(Silica-based buried channel waveguide)로 가정하였으며, 해석의 용이함과 해석시간을 줄이기 위해 유효굴절률법(effective index method : EIM)을 사용하여 2차원 형태의 슬랩 도파로(slab waveguide) 형태로 근사시키고, TBC[4]을 적용한 2차원 FD-BPM[5]을 이용하여 설계하였다.

II. 제안한 성형결합기의 구조

1. 테이퍼 구조를 갖는 2×2 방향성 결합기

3 dB 결합기와 100% 결합기를 구현하기 위해 그림 1에서 보는 것처럼 방향성 결합기의 결합영역에 테이퍼를 사용하였다. 각각의 테이퍼 영역은 $L1=L2=L3=900$ [μm]로 하여 3 영역으로 구성되었으며, $R1, R2, R3$ 는 각 테이퍼의 기울기이고, 기대칭 구조를 이루고 있으며, $Tmax=Tmin=W$ 이면 기존의 방향성 결합기의 결합영역 구조가 된다. 그리고, 각 방향성 결합기의 분기도파로 영역은 cosine S 형태를 이용하였으며, 영역의 길이는 1500[μm]로 하여 손실을 거의 없게 하였다.

2. 4×4 성형결합기의 구조

본 논문에서 제안한 4×4 성형결합기 2차원 구조가 그림 2에, 그리고 매립형 채널 도파로의 단면도를 그림 3에 나타내었다. 그림 2에서 보면 알 수 있듯이 방향성

결합기를 5개 사용하여 구성하였고, 크게 3부분으로 이루어졌다. 그림 4에서 I 부분과 III 부분에는 3 dB 결합기 각각 2개로 4개의 입력과 출력단을 구성하였고, 3 dB 결합기의 기능은 광전력을 균등하게 분배하는데 있으며, I과 III 부분은 구조는 같고, 대칭 형태이다. II 부분은 직선 도파로와 100% 결합기 1개로 이루어져 있고, 100% 결합기의 기능은 다른쪽 도파로로 입력광을 100% 보내는데 있다. 도파로의 폭 $W=6[\mu\text{m}]$, 높이 $h=5[\mu\text{m}]$, 굴절률 $n_f=1.4551$ 이며, $n_s=n_c=1.444$ 로 하였고, 파장은 $\lambda=1.55[\mu\text{m}]$ 를 사용하였다. 그리고, $S=13[\mu\text{m}]$, $G=4[\mu\text{m}]$ 이다. BPM 해석에서는 도파로의 굴절률은 EIM에 의해서 구해진 1.4518로 하여 해석하였고, 굴절률 분포는 계단형 분포(step index distribution)이며, 그림 4에 나타내었다.

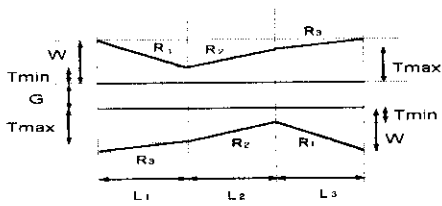


그림 1. 제안한 방향성 결합기의 결합영역

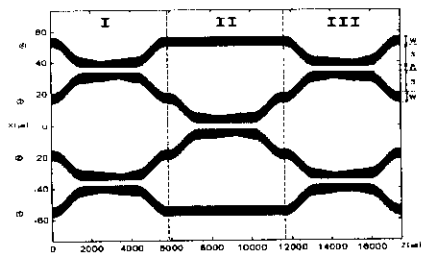


그림 2. 4×4 성형 결합기의 2차원 구조

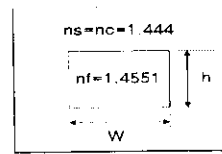


그림 3. 배립형 채널 도파로의 단면도

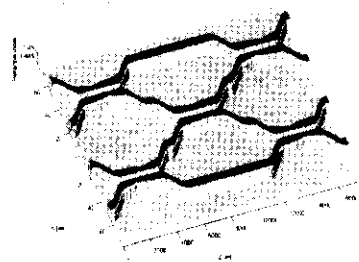


그림 4. 4×4 성형 결합기의 굴절률 분포

III. 해석방법(FD-BPM)

광도파로에서 파동은 굴절률 차가 충분히 작다면 다음과 같은 스칼라 파동 방정식(Scalar wave equation) 방정식으로 표현된다.

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x, y, z) \right\} E(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

여기서, $k_0 = \omega/c$ 는 자유공간의 파수이며, n 은 도파로의 굴절률이다. $E(x, y, z)$ 를 $+z$ 방향으로 전파하는 단일 파동으로 가정하며, 시간의존성이 $\exp(j\omega t)$ 이고, 기준 굴절률 n_0 을 이용하면 다음과 같다.

$$E(x, y, z) = E(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) \quad (2)$$

방정식(1)에 식(2)를 대입하고, $\frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$ 을 무시하면, 다음과 같은 근축 파동 방정식(paraxial wave equation)이 된다.

$$2jk_0 n_0 \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 + k_0^2 [n^2(x, y, z) - n_0^2] E \quad (3)$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3a)$$

방정식(3)을 변수분리하고 Taylor 급수전개하여, y 축에 대해 변화가 없다고 가정하고 ($\partial/\partial y=0$), FDM(Finite Difference Method)을 사용하여 근사화 하면, 다음과 같은 FD-BPM을 얻는다.

$$-a E_{i-1}(z+\Delta z) + b E_i(z+\Delta z) - a E_{i+1}(z+\Delta z) \\ = a E_{i-1}(z) + c E_i(z) + a E_{i+1}(z) \quad (4)$$

$$a = \frac{\Delta z}{2\Delta x^2} \quad (4a)$$

$$b = \frac{\Delta z}{\Delta x^2} - \frac{\Delta z}{2} k_0^2 [n_i^2(z+\Delta z) - n_i^2] + 2jk_0 n_0 \quad (4b)$$

$$c = -\frac{\Delta z}{\Delta x^2} + \frac{\Delta z}{2} k_0^2 [n_i^2(z) - n_i^2] + 2jk_0 n_0 \quad (4c)$$

IV. 결과 및 검토

먼저 그림 2의 I 부분만을 2차원 FD-BPM으로 해석하였다. 입력 전계는 기본모드(fundamental mode)를 입사하였고, 충분한 테이퍼의 작용을 위해 $\Delta x = 0.01$, $\Delta z = 0.1$ 로 해석하였으며, 프로그램 언어는 FORTRAN과 MATLAB을 이용하였다.

3 dB 결합기가 되도록 Tmax와 Tmin을 변화 시켜 가면서, 해석한 결과값들을 관찰한 결과 전송 효율이 거의 같아지는 Tmax와 Tmin의 값은 각각 5.2[μm], 3.6[μm]임을 알 수 있었다. 이 때의 전송효율을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 P1, P2, P3, P4는 출력 각각의 전송효율이고, Pt는 포트①,② 입력에서는 P1+P2 이고, 포트③,④ 입력에서는 P3+P4이다. Pt가 약 99.7% 정도로 손실이 0.3% 정도로 매우 적음을 알 수 있다. 그리고, 각 출력의 전송효율을 데시벨(decibel)로 나타내 보면, 입력이 각각 포트① 일 때는 3.02[dB], 3.03[dB], 포트② 일 때는 3.02[dB], 3.02[dB], 포트③ 일 때는 3.03[dB], 3.04[dB], 포트④ 일 때는 3.05[dB], 3.00[dB] 이었다.

다음 단계로 그림 2의 II 부분을 해석하였다. 100% 결합기능을 갖도록 Tmax와 Tmin의 값을 변화시켜 가면서 해석한 결과 Tmax와 Tmin의 값이 각각 5.6[μm], 4.4[μm]이었을 때, 99.7% 이상이 결합됨을 알 수 있었으며, 각각의 전송효율을 표 2에 나타내었다.

마지막 단계로 I 부분과 II 부분을 그림 7에서와 같이 조합하여 4×4 성형 결합기를 설계하였으며, 해석결과 전송효율은 표 2에, 정규화 전계 분포는 그림 5에 각각 나타내었으며, 출력단이 4단자일 때의 균등분배율 25%, 즉 6.02[dB]을 0으로 정규화하여 출력단 각각의 편차를 그림 6에 나타내었다.

해석결과를 보면 전체전송효율이 99% 이상이었으며, 각 출력편차 또한 0.1[dB]미만으로 매우 적음을 알 수 있었다.

표 1. Tmax=5.2, Tmin=3.6 일 때
I 부분의 전송효율

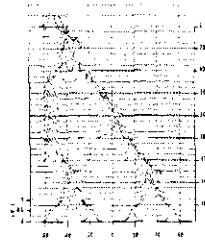
| 입력 포트 | 전송 효율 [%] | | | | |
|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | Pt |
| ① | 49.85 | 49.82 | 0.02 | 0.05 | 99.67 |
| ② | 49.88 | 49.86 | 0.01 | 0.01 | 99.74 |
| ③ | 0.01 | 0.01 | 50.09 | 49.64 | 99.73 |
| ④ | 0.05 | 0.02 | 49.57 | 50.10 | 99.67 |

표 2. Tmax=5.6[μm], Tmin=4.4[μm]일 때
II 부분의 전송효율일 때

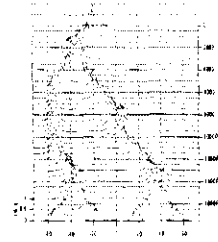
| 입력 포트 | 전송 효율 [%] | | | |
|-------|-----------|-------|-------|------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 |
| ② | 0.01 | 0.04 | 99.82 | 0.01 |
| ③ | 0.01 | 99.74 | 0.04 | 0.01 |

표 3. 4×4 성형 결합기의 전송효율

| 입력 포트 | 전송 효율 | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | P1 | | P2 | | P3 | | P4 | | Pt | |
| | [%] | [dB] | [%] | [dB] | [%] | [dB] | [%] | [dB] | [%] | [dB] |
| ① | 24.42 | 6.12 | 25.15 | 5.99 | 24.99 | 6.02 | 24.51 | 6.11 | 99.07 | 0.04 |
| ② | 25.14 | 6.00 | 24.57 | 6.10 | 24.94 | 6.03 | 24.63 | 6.09 | 99.27 | 0.03 |
| ③ | 24.89 | 6.04 | 24.84 | 6.05 | 24.44 | 6.12 | 25.06 | 6.01 | 99.23 | 0.03 |
| ④ | 24.65 | 6.08 | 24.57 | 6.10 | 25.09 | 6.01 | 24.74 | 6.07 | 99.04 | 0.04 |



(a)



(b)

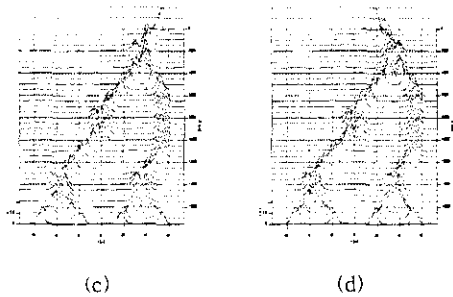
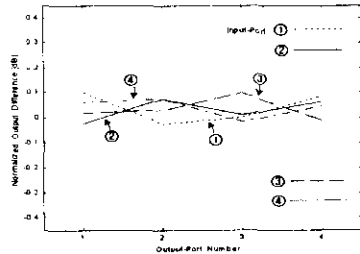


그림 5. 4×4 성형 결합기의 정규화 전계분포



〈그림 6〉 4×4 성형 결합기의 정규화
균등출력 편차

V. 결론

본 논문에서는 각각의 입력을 4개의 출력단으로 균등하게 보내는 기능을 갖고, 사용파장이 1.55[μm]인 4×4 성형 결합기를 3 dB 결합기 4개와 100% 결합기 1개로 구성하여 설계하였다.

3 dB 결합기와 100% 결합기의 설계는 기존의 방향성 결합기의 결합영역을 3 영역으로 나누어 여기에 테이퍼를 사용하여 구현 하였으며, 방향성 결합기의 분기도파로 영역은 손실을 최소화 하기 위해 cosine S 형태를 사용하였다. 그리고, 3 dB 결합기의 Tmax와 Tmin의 값은 각각 5.2[μm], 3.6[μm]이고, 100% 결합기는 5.6[μm], 4.4[μm] 임을 알 수 있었다.

3dB 결합기를 해석한 결과 균등출력 편차가 모두 0.04 [dB]이하로 모두 낮았으며, 손실 또한 0.33%이하로 매우 적었으며, 100% 결합기의 경우 99.7% 이상을 전송함을 알 수 있었다. 마지막으로 4×4 성형 결합기를

해석한 결과 각각의 입력에서 거의 균등하게 4분기되어 출력되었으며, 그 편차 또한 0.1[dB]미만으로 매우 적었으며, 전체전송효율 또한 99% 이상으로 만족할 만한 결과를 얻었다.

그리고 기존의 방향성 결합기의 결합영역은 사용목적에 따라 결합영역이 변화하나 본 논문에서 제안한 테이퍼를 갖는 결합구조를 이용하면 결합영역이 변하지 않는 이점이 있으며, Tmax와 Tmin을 적당히 조정하면, 방향성 결합기에 여러 가지 기능을 갖도록 할 수 있어, 방향성 결합기를 이용한 여러 가지 새로운 소자를 설계하는데 유용하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Akihiro Takagi, Kaname Jinguji, and Masao Kawachi, "Silica-Based Waveguide-Type Wavelength Insensitive Couplers (WINC's) with Series-Tapered Coupling Structure", Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 12, pp. 1814-1824, December 1992.
- [2] Charles Vassallo, "About Coupled-Mode Theories for Dielectric Waveguides", Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 2, pp. 294-303, February 1988.
- [3] R. Adar, Charles H. Henry, Rudolf F. Kazarinov, R.C Kistler, and Gray R. Weber, "Adiabatic 3-dB Couplers, Filters, and Multiplexers Made with Silica Waveguides on Silicon", Journal of Lightwave Technology, Vol.10, No. 1, pp. 46-50, February 1988.
- [4] G. Ronald Hadley, "Transparent Boundary Conditions for the Beam Propagation Method", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 28, No. 1, pp. 363-370, January 1992.
- [5] YoungChui Chung and Nadir Dagli, "An Assessment of Finite Difference Beam Propagation Method", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 26, No. 8, pp. 1335-1339, August 1990.
- [6] François Ladouceur and John D. Love, "Silica-based Buried Channel Waveguides and Devices", CHAPMAN&HALL, 1996.