

## 방향성 결합기 소멸비 특성의 일반화 경향과 파장분리기의 소형화 설계

최철현 · 오범환<sup>†</sup> · 이승걸 · 박세근 · 이일항

인하대학교 정보통신공학부

Ⓣ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2005년 6월 21일 받음, 2005년 10월 6일 수정본 받음)

방향성 결합기의 각종 설계 구조변경에 대해 소멸비 특성의 변화를 직관적으로 예측하기 쉽지 않으므로 각 구조마다 매번 번거로운 특성 계산의 반복 작업이 수행되었다. 본 논문에서는 방향성 결합기의 설계구조 변수의 조절에 따른 소멸비 특성 변화를 체계적으로 계산하였고, 이 특성변화의 일반적인 경향을 파악하였다. 즉, 도파로 간격을 입력 도파로의 폭으로 규격화하면 이 변화 경향을 일반화하는 특성곡선을 얻을 수 있는 것으로 파악되었다. 이때, 정규화주파수  $v$ 와 도파로간격비율  $d$ 가 큰 구조일수록 소멸비를 높일 수 있었고,  $d$ 를 동일하게 유지한 여러 경우의 구조에 대해서는  $v$ 의 변화에 따른 소멸비 특성곡선이 일치하는 것을 보였다. 이러한 소멸비 특성의 일반화 경향은 높은 소멸비 특성을 유지하면서도 소자를 작게 설계하거나 파장분리기의 설계에 유용하게 활용될 수 있으므로 1310/1550 nm 파장 분리기의 설계와 제작에 적용하여 그 효용성을 확인하였다.

주제어 : Directional coupler, Extinction ratio, Demultiplexer, Embossing process.

### I. 서 론

광집적회로는 하나의 기판위에 광스위치, 광변조기, 광필터 및 광결합/분배기 등 여러 기능성 소자를 집적하여 구성하는데, 이에 따른 개별소자의 성능 요구조건은 점점 더 높아지고 있다. 이러한 여러 기능성 소자 중에서도 방향성 결합기(directional coupler)는 널리 연구되고 있는 기본적인 소자로서 근접한 두 도파로 사이의 광전이 현상을 이용하여 동작한다.<sup>[1-6]</sup> 이때 두 도파로간 광에너지의 전이비율은 진행거리 따라 변하며, 최대 전이점에서의 전이비율을 소멸비(extinction ratio)라고 하며 방향성 결합기 설계의 중요한 성능 지표가 되므로 각종 성능 요구조건을 만족시키기 위한 고소멸비의 방향성 결합기 설계와 제작이 활발히 연구되어 왔다.<sup>[4-6]</sup> 방향성 결합기를 다중으로 연결하여 소멸비를 개선시키는 방안이 제안되었고,<sup>[4,5]</sup> 단순히 광모드간 중첩을 줄이고 결합길이를 증가시키는 설계로 소멸비를 개선하는 방안도 있으나, 길이증가로 인하여 전파손실이 유발되고 소자크기가 커져 광집적 회로를 구성하는데 치명적인 단점을 지니고 있다.

방향성 결합기의 소멸비는 파장, 굴절률, 도파로폭, 도파로 사이간격 등 여러 구조변수에 따라 다양하게 변화하기 때문에 설계된 소자의 특성예측이 다소 번거로운 작업이었으나, 본 논문에서는 방향성 결합기 소멸비 특성을 체계적으로 살펴보고, 그 일반화된 변화 경향을 파악하여 소개한다. 또한, 이를 활용한 고소멸비 구조설계의 간편한 방안을 소개하고, 실제적인 1310/1550 nm 파장분리기 설계에 있어서 소자길이를 줄이면서도 고소멸비를 유지하는 효율적인 설계가 수월

하다는 것을 보인다.

### II. 소멸비 특성변화의 일반화

단일 도파로의 경우, 잘 알려진 바와 같이, 정규화주파수  $v$ 와 정규화전파상수  $b$ 를 사용하면 도파로특성은  $v$ - $b$  곡선으로 일반화되지만, 그림 1에 나타난 방향성 결합기 기본구조인 이중도파로의 경우에는 두 도파로 사이간격 변수의 등장으로 인하여  $v$  변수만으로는 그 특성변화를 충분히 기술할 수 없다.

이제 여기서 두 도파로 사이의 간격  $s$ 를 도파로폭으로 규격화하여 정규화간격  $d$ 로 정의한다.

$$d = s / w_1 \quad (1)$$

여기서,  $w_1$ 은 입력 도파로폭,  $s$ 는 두 도파로 사이 간격이다. 기존 정규화주파수  $v$ 는

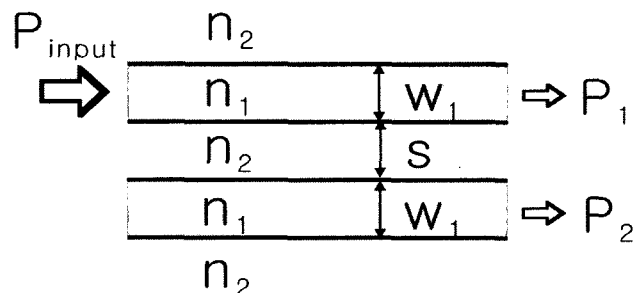


Fig. 1. 2 차원적 모델 방향성 결합기의 구조 개요도 및 구조 변수.

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{w_1}{2} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

로 주어지며,  $\lambda$ 는 빛의 파장,  $n_1$ 과  $n_2$ 는 각각 코어와 클래딩의 굴절률이다.

이상의 변수가 설정되면, 방향성 결합기의 유효굴절률과 전파모드 특성이 계산될 수 있고,<sup>[7]</sup> 입력 도파로로 입사된 광에너지는 결합영역을 진행함에 따라 두 도파로 간을 서서히 오가게 되는 전이현상을 볼 수 있는데, 이 광에너지 전이비율을 소멸비(extinction ratio)라 하며 아래 식 (3)으로 나타낸다.

$$\text{Extinction Ratio (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_1 + P_2} \right) \quad (3)$$

여기서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 주어진 진행거리에서 두 도파로에 존재하는 광에너지이며, 전이가 최대인 일어나서  $P_1$ 이 최소가 되는 결합거리를 완전전이 결합길이( $L_c$ )라고 한다. 이 길이  $L_c$ 는 정상모드 이론을 활용하면 아래의 식 (4)로 간단히 얻을 수도 있다.

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} \quad (4)$$

여기서  $\beta_e$ 와  $\beta_o$ 는 각각 우함수모드와 기함수모드의 전파상수이다. 진행거리가  $L_c$ 인 경우에 소멸비의 절대치가 최대가 되는데 이 최대소멸비는 설계된 구조에 해당되는  $b$ 와  $v$ 의 조건에 따라 변화되므로, 이 수치가 극대화되도록 안정되게 소자를 설계하는 것이 중요하다. 그림 2에는 특정한 두 설계 조건의 경우에 대해 진행거리에 따른 광에너지의 전이비율 변화특성을 비교하였다.

그림 2-(a) 구조는  $n_1=1.5$ ,  $n_2=1.4536$ ,  $w_1=s=2 \mu\text{m}$  ( $d=1$ ) 이고, 2-(b) 구조는  $n_1=1.5$ ,  $n_2=1.4795$ ,  $w_1=s=3 \mu\text{m}$  ( $d=1$ ) 이다. 빛의 파장은  $1.55 \mu\text{m}$ 로 두고, 두 구조의  $v$  수치가 같도록 굴절률을 설정한 점에 유의하자. (a) 구조는  $425 \mu\text{m}$ 의 결합 길이에서  $-22 \text{ dB}$ 의 최대소멸비를 가지며 (b) 구조는  $960 \mu\text{m}$ 의 결합길이에서  $-22 \text{ dB}$ 의 최대소멸비를 가진다. 두 구조의 설계조건이 상당히 다르고 결합길이가 2배 정도나 차이가 나지만 최대소멸비가 같다는 점에 주목하자. 즉, 설계구조가 다르더라도  $v$ 와  $d$ 를 동일하게 설정하면 최대소멸비가 같아지는 것이다. 이러한 관찰을 확인하기 위하여 방향성 결합기의 설계변수를 주어진  $d$  수치에 대해  $v$ 가 변화할 때 최대소멸비의 변화를 구하여 그림 3에 나타내었다.

세 가지 경우의 정규화간격 수치 ( $d = 0.5, 1, 2$ )에 대해  $w_1$ 과  $s$ 를 조절하여 각각 세 가지의 다양한 방향성 결합기 설계 구조를 설정하여 최대소멸비 변화곡선을 계산하였다. 각각의 주어진  $d$ 에 대해 도파로폭이 다른 세 가지 경우의 변화곡선이 정확히 일치하고 있음에 유의하자. 그리고,  $v$ 가 커질수록 두 도파로간 섭동이 줄어들어 최대소멸비가 증가되는 것이 잘 나타나고 있으며,  $d$ 가 커질수록 두 도파로간 유효간격이 늘어

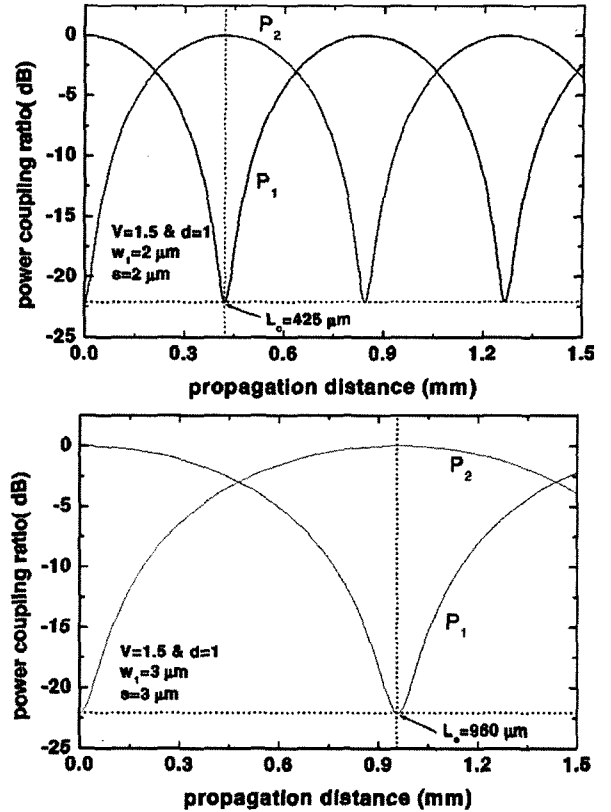


Fig. 2.  $V=1.5$ ,  $d=1$ 에서 진행거리에 따른 광에너지 전이 변화. (a)  $w_1=2 \mu\text{m}$  &  $s=2 \mu\text{m}$ 이며  $425 \mu\text{m}$ 의 결합길이에서  $-22 \text{ dB}$ 의 소멸비를 가짐. (b)  $w_1=3 \mu\text{m}$  &  $s=3 \mu\text{m}$ 이며  $960 \mu\text{m}$ 의 결합길이에서  $-22 \text{ dB}$ 의 소멸비를 가짐.

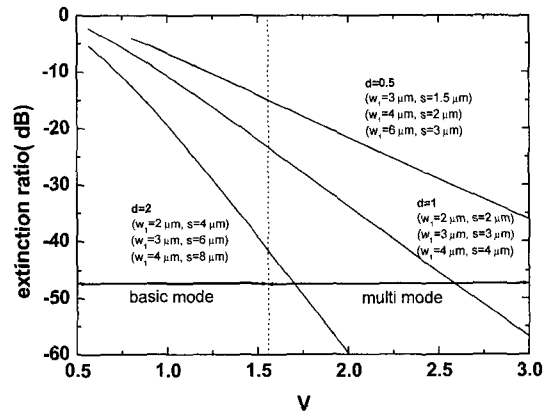


Fig. 3. 정규화 주파수( $v$ ) 변화에 따른 방향성 결합기의 결합변수별 소멸비 특성 곡선.

나는 것이므로 두 도파로간 섭동이 줄어들어 마찬가지로 최대소멸비가 증가하는 것이 잘 나타나고 있다<sup>[8]</sup>. 여기서,  $v$ 가  $\pi/2$ 보다 작은 경우는 우함수와 기함수 모드 하나씩만 존재하는 기본모드 조건이며,  $\pi/2$ 보다 큰 경우는 다중모드 조건으로서 고차모드의 영향으로 최대소멸비 특성은 이보다 열화되게 된다.

이상과 같은 방향성 결합기의 최대소멸비 특성을 일반화한 곡선을 활용하면 최대소멸비가 우수한 방향성 결합기를 수월하게 설계할 수 있다. 우선, 소자설계시 요구되는 최대소멸비를 설정한다. 각종 광시스템이나 응용분야마다 요구되는 성능이 다르기 때문에 최대소멸비 요구조건이 다를 수 있다. 다음으로, 최대소멸비 일반화 곡선을 이용하여 해당되는  $v$ 와  $d$ 를 선정하면, 나머지 구조변수는 간단한 관계식으로 주어진다. 또한, 기본모드 조건( $v < \pi/2$ )에서  $d=0.5$ 인 구조는 15 dB에도 이르지 못하는 최대소멸비를 가지는 것을 알 수 있으므로, 20 dB 이상의 소멸비가 요구되는 방향성 결합기나 응용 소자(광스위치, 필터 등)에 활용되기는 어려울 것이나,  $d=1$  이상인 구조를 채택하면 20 dB 이상의 소멸비를 갖는 설계가 가능하다는 것을 쉽게 파악할 수 있게 해준다.

### III. 방향성 결합기 기반의 파장분리기 소형화 설계 및 제작

방향성 결합기 기반의 1310/1550 nm 파장 분리기를 설계하기 위해 이 최대소멸비 일반화 곡선을 활용하였다. 소자 제작을 위해 코어와 클래딩으로 사용된 물질은 캠옵틱스사의 열경화성 폴리머 ZP-51과 ZP-49이며, 도파로 구조는 매립형(buried)으로 코어높이는 2.5  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 유효굴절률법을 이용하여 2 차원 구조로 대치한 후 소멸비 일반화 곡선을 활용하였다. 가급적 높은 최대소멸비를 얻기 위해서는  $v$  값을 높여야 하는데, 광파장과 물질의 굴절률은 주어지기 때문에 단일모드 조건하에 최대한 도파폭을 넓혀 3.0  $\mu\text{m}$ 로 선정하였다. 파장분리기로 입사된 서로 다른 파장의 두 빛은 그 결합길이가 다른 점을 이용하여 분리할 수 있으며, 그 결합길이는 두 도파로 사이간격으로 조절할 수 있다. 앞서 언급된 것처럼 결합길이가 길어지면 소멸비는 증가하지만 소자 길이가 길어지는 단점이 발생한다. 본 논문에서는 앞서 제안된 소멸비 일반화 곡선을 사용하여 소멸비를 대략적으로 미리 설정함으로써 결합영역의 길이를 최적화할 수 있었다. 이때 도파로 간격이 4.0  $\mu\text{m}$ 이면  $L_c \sim 1948 \mu\text{m}$  정도인 1310 nm 파장광에 비해 1550 nm 파장광의 결합길이는 약 반 정도로 짧게 되므로, 1310 nm 파장의 빛은 건너편 도파로로 전이되고, 1550 nm 파장의 빛은 입사된 도파로로 재전이되어 출력된다. 이때 계산된 최대소멸비는 1310과 1550 nm 두 파장광에 대해 각각 -24.14, -16.17 dB이다. 결합영역에서 우함수와 기함수의 전이계수 차이를 감소시켜 최대소멸비를 개선시킬 수 있으므로<sup>[9]</sup> 입력 도파로를 방향성 결합기 외측으로 0.8  $\mu\text{m}$  수평이동하여 접속시키면, 일반적인 경우와 비교하여 1310과 1550 nm 파장광에 대해 최대소멸비는 각각 -4.49, -3.04 dB 개선되어 -28.63, -19.21 dB의 계산 결과를 얻는다.

파장분리기는 기존의 반도체 제작공정에 바탕을 둔 제작방법과는 달리 PDMS(polydimethylsiloxane) mold를 이용한

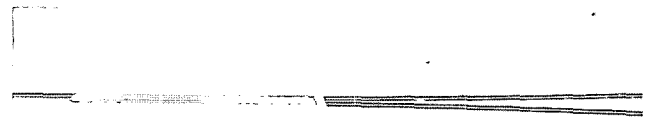


Fig. 4. 제작된 파장 분리기의 현미경 사진.

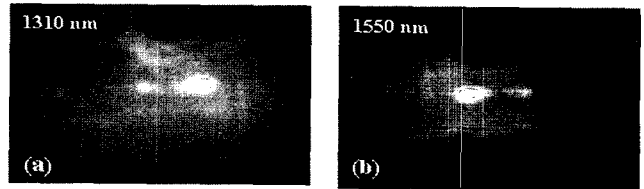


Fig. 5. 출력광의 근접장 사진 (a) 1310 nm (b) 1550 nm.

microtransfer molding 방법으로 제작되었다.<sup>[10]</sup> 마스터는 포토레지스트(AZ 1518)를 이용한 노광공정으로 제작하였고, 제작된 마스터위에 PDMS를 붓고 경화시켜 몰드를 제작하였다. 용착된 실리카 기판위에 ZP-49 막을 형성하고 제작된 몰드를 이용하여 ZP-51 코어부의 복제를 수행하였다. 복제 후 그 위에 다시 ZP-49 막을 형성하면 파장분리기의 제작은 완료된다. 그림 5는 PDMS 몰드를 제거한 후 복제된 파장분리기의 현미경 사진이다.

제작된 파장분리기에 1310 nm와 1550 nm 파장광을 각각 입사시켜 CCD 카메라로 근접장 패턴(near field pattern)을 확인한 결과를 그림 5 (a), (b)에 나타내었다.

비록 공정조건이 최적화가 아직 미비하지만, 1310 nm와 1550 nm 파장의 빛이 각각 건너편 도파로와 입사된 도파로로 잘 분리되고 있으며, 누화된 광신호에 의해 소멸비는 약 10 dB 정도를 얻고 있다. 이는 엠보싱 공정시 잔여막(residual thickness)이 남은 이유로 도파로 구조가 바뀌며 이로 인해 설계된 도파로와 제작된 도파로 간의 모드 특성 오차가 유발되어 이러한 차이가 발생한 것으로 사료된다. 본 엠보싱 공정으로 파장분리기를 제작하여 그 설계된 성능에 의 도달을 위해서는 잔여막을 제거하거나 감소시키는 것이 매우 중요하다.

### IV. 결 론

방향성 결합기의 최대소멸비는 파장분리기 설계의 성능을 가능하는 중요한 지표이다. 다양한 설계 변수의 조건에 따라 최대소멸비 특성이 바뀌므로 방향성 결합기의 설계는 다소 복잡하고 번거롭다. 본 논문에서는 이러한 설계상의 어려움을 해결하는 직관적인 일반화 특성곡선을 제시하였고, 정규화파수  $v$ 와 정규화간격  $d$ 가 클수록 최대소멸비가 증가하는 경향을 파악하였으며,  $d$ 를 동일하게 유지한 여러 경우의 구조에 대해서는  $v$ 의 변화에 따른 소멸비 특성곡선이 일치하는 것을 보였다. 이러한 소멸비 특성의 일반화 경향은 높

은 소멸비 특성을 유지하면서도 소자를 작게 설계하거나 파장분리기의 설계에 유용하게 활용될 수 있으므로 1310/1550 nm 파장 분리기의 설계와 제작에 적용하였다. 엠보싱 방법으로 제작하여 두 파장이 서로 잘 분리되는 것을 보임으로써 그 효용성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022-03002-0)를 통하여 과학재단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] Ronald V. Schmidt, and Rod C. Alferness, "Directional Coupler Switches, Modulators, and Filters Using Alternating  $\Delta\beta$  Techniques", *IEEE Trans. Circuits and Systems*, vol. CAS-26, pp. 1099-1108, 1979.
- [2] N. Anwar, C. Themistos, B. M. Azizur Rahman, and Kenneth T. V. Grattan., "Design considerations for an electrooptic directional coupler modulator", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 598-605, 1999.
- [3] Isa Kiyat, Atilla Aydinli, and Nadir Dagli, "A Compact Silicon-on-Insulator Polarization Splitter", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 100-102, 2005.
- [4] Y. Chen and W. T. Joines, "Enhanced WDM performance using curved waveguide couplers," *Opt. Commun.*, 288, pp. 319 -330, 2003.
- [5] S. Han, T. Park, S. Park, and K. Jeong, "Effect of Wavelength Shift on PLC-Type WDM Directional Coupler by UV Irradiation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 1189-1191, 2000.
- [6] Chinni, V.R., Huang, T.C., Wai, P.-K.A., Menyuk, C.R., Simonis, G.J., "Crosstalk in a lossy directional coupler switch", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 1530-1535, 1995.
- [7] William K. Burns, "Normal Mode Analysis of Waveguide Devices. Part I: Theory", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 1051-1057, 1988.
- [8] Chul Hyun Choi, Soon Ryong Park, Beom-Hoan O, Seung Gol Lee, and El-Hang Lee, "Optimized Waveguide Width Design of a Directional Coupler for Improved Extinction Ratios and Fabrication Tolerance", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 40, pp. 456-460, 2002.
- [9] 최철현, 박순룡, 오범환, "방향성 결합기의 성능 및 허용오차 개선을 위한 신제안", *한국광학회지*, vol. 11, pp. 405-410, 2000
- [10] Zhao X-M, Xia Y, Whitesides GM, "Fabrication of Three-Dimensional Micro-Structures: Microtransfer Molding," *Adv. Mater.*, pp. 837 ~ 840, 1996.

## The Generalized Characteristics of Extinction Ratio for a Directional Coupler and Design of Compact 1310/1550 nm Demultiplexer

Chul Hyun Choi, Beom-Hoan O<sup>†</sup>, Seung Gol Lee, Se-Geun Park and El-Hang Lee

*School of Information and Communication Engineering, INHA University, Incheon 402-751, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

(Received June 21, 2005, Revised manuscript October 6, 2005)

In a directional coupler, the design process requires repeated calculation of the characteristics of every changed structure, because it is generally difficult to expect the extinction ratio to be optimized over the entire variation of design parameters. In this paper, we systematically simulated the extinction ratio as a function of the design parameters, and analyzed the general tendency of that characteristic. In other words, we could find the generalized extinction ratio curve if the separation distance is normalized by the waveguide width. Here, the extinction ratio is shown to be increased as the normalized frequency ( $v$ ) and the ratio ( $d$ ) of the separation distance over the waveguide width were increased. For various structures with same ratio  $d$ , all corresponding extinction ratio curves as a function of  $v$  coincide with each other. We showed the usefulness of the generalized extinction ratio curve by applying it to the design and the fabrication of 1310/1550 nm demultiplexer, as it was convenient to design a shorter directional coupler with targeted extinction ratio from this curve.

OCIS Codes : 130.3120, 060.1810, 230.7370.