

## 방향성 결합기 입사도파로의 최적 접근각도와 광모드 과잉쏠림 현상의 조절

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

인하대학교 정보통신공학부 집적형 광자기술연구센터  
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253 번지

(2005년 9월 21일 받음, 2005년 9월 21일 수정본 받음)

방향성 결합기의 소멸비 특성 개선을 위해 입사도파로의 접근각도를 조절하는 방안의 가능성과 오차한계를 살펴보았다. 입사도파로의 접근각도가 크면 단순한 모드분석 이론의 틀에 오차를 유발하게 되지만 적절하게 조절하면 오차를 극소화하면서도 입사되는 광모드의 결합계수를 미세 조절함으로써 소멸비를 개선하는 효과가 있었다. 급격한 접근각도의 설정 시에는 비록 그 각도가 작아서 유출 모드(leak mode)에 의한 손실이 있기 전이라도 광모드의 과잉쏠림(field-profile overshooting)에 의해 각종 특성의 열화가 생기기 시작하는 것을 발견하고 그 영향을 분석하였다. 진행 광모드의 변화는 BPM(Beam Propagation Method)으로 전산 모사하였으며, 직선형 및 곡선형의 두 가지 입사도파로 구조에 대해 특성변화를 비교하여 소멸비 특성을 최적화하는 조건을 얻어내었다.

주제어 : Direction coupler, Field-profile overshooting, Coupling coefficient, Extinction ratio, BPM(Beam Propagation Method).

### I 서 론

방향성 결합기는 입사된 광신호를 선택적으로 전이출력시키는 소자으로써 광통신 시스템을 구성하는 핵심적 역할을 하는 소자이며, 광스위치, 광분배기, 필터, 변조기 등의 광기능 구현에 널리 이용되고 있다.<sup>[1-5]</sup> 특히, 광집적회로의 구성요소로서의 방향성 결합기는 저손실, 편광 무의존성, 소멸비 등의 특성이 더욱 개선되어야 하므로 이중도파로의 효율적 구성과 연결부 구조의 최적변형을 통한 성능개선 노력이 활발하게 진행되어 왔다.

이상적인 방향성 결합기의 경우, 입사되는 광모드가 결합영역(coupled region)의 모드에 완전하게 전이되어 진행되는 것을 가정하여 소멸비를 산출하게 된다. 하지만, 어떤 구조의 방향성 결합기도 그렇게 이상적으로 설계될 수 없으므로, 광결합의 불완전성에 기인하는 소멸비 특성의 열화가 초래된다.<sup>[6-7]</sup> 그리고, 비록 광결합의 불완전성이 매우 적은 수준인 경우에도 이로 인한 잔여 광에너지의 존재는 소멸비의 열화를 유발하게 된다. 이러한 열화현상을 개선하는 간편한 방안은 입사 도파로에서 결합영역으로의 접근구조를 최적화함으로써 광모드를 변형하여 결합영역에 존재하는 두 진행모드들의 전이계수가 같게 되도록 조절하는 것이다.<sup>[6-7]</sup> 이 접근구조의 변형방식으로는 도파폭 변화나 도파로의 횡방향 이동(lateral shift) 결합구조(coupling structure)의 채택, 도파로 접근각도 조절방식 등이 가능한데, 접근각도를 적절하게 바꾸어 주는 방법은 소자의 결합구조 설계상 가장 자연스러운 구조조절 방식이 될 수 있으므로, 이를 택하여 각도 변화에 따른 각종 특성변화의 분석을 수행하여 최적화 조건을 살펴보았다. 접근각도가 커지면, 이미 일정한 곡률반경을 갖는

곡선도파로의 모드형태 분석을 통해 잘 알려진 바와 같이, 진행방향에 수직인 단면에서의 광모드가 좌우측으로 쏠리고, 좀더 심하면 단일모드 도파로를 진행함에 따라 좌우로 진동하기도 하는 듯한 양상도 보이며 직선도파로의 기본모드와 다소 다른 모드형태를 갖게 된다. 본 고에서는 이러한 과도현상을 광모드 과잉쏠림이라고 지칭하기로 하며, 이에 의한 각종 특성의 변화를 살펴봄으로써 소멸비 특성을 최적화하는 방향성 결합기의 설계방식을 제안한다.

### II. 방향성 결합기의 구조설정 및 특성변화 경향

분석의 편의상 폴리머 계열의 재료로 형성한 3차원 구조를 가정하여 도파로 영역의 유효굴절률을 구하고 그에 따른 2차원 평면 상의 방향성결합기 도파로 구조에 대한 전파특성을 분석하도록 한다. 그림 1은 방향성 결합기의 결합영역(coupling region)을 가장 간단하게 나타낸 2차원 모식도이다.

이 결합영역의 구조변수인 도파폭  $w$ 와 도파로 중심간격  $s$ 를 변화시키에 따라 완전결합길이  $L_{\pi}$ 가 조절될 수 있는데, 이는 아래와 같이 정의된다.

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} \tag{1}$$

여기서  $\beta_e$  와  $\beta_o$ 는 결합영역에 존재하는 기본 대칭모드(even mode)와 반대칭모드(odd mode)의 전파상수로서 일반적으로  $\beta_e$ 가  $\beta_o$  보다 약간 크다. 이제, 단일모드인 입사도파로가 왼쪽에 연결되고 이로부터 광신호가 이 결합영역으로 진입하면 광에너지는 결합영역의 두 기본모드에 나뉘어 전이되는데 각 모드로 전이되는 비율은 입사된 광신호 모드와 각 모드와의 중첩적분으로 아래와 같이 구할 수 있으며,

<sup>†</sup> E-mail: ehlee@inha.ac.kr

$$C_e = \frac{\int E_{in} \cdot E_{even} dx}{\sqrt{\int E_{in}^2 dx} \sqrt{\int E_{even}^2 dx}}, \quad C_o = \frac{\int E_{in} \cdot E_{odd} dx}{\sqrt{\int E_{in}^2 dx} \sqrt{\int E_{odd}^2 dx}} \quad (2)$$

이 두 계수는 모드진행과 분석(MPA, Mode Propagation Analysis)에서 진행과 모드의 초기조건으로 입력되어 단순히 평행한 결합영역을 진행하는 경우에는 광신호의 소멸비를 손쉽게 얻을 수 있게 한다. 그림 1에서와 같이 완전결합길이를 설정한 경우에 이상적이라면 모든 광에너지는 평행한 이웃도파로인 아래쪽 도파로로 모두 전이되어 P<sub>2</sub>로 출력되어야 하지만, 실제적으로는 불완전 전이되므로 입사된 도파로를 따라 그냥 진행하여 P<sub>1</sub>으로 표현되는 잔여 광에너지가 위쪽 도파로에서 출력되므로, 이 두 광세기의 비를 소멸비로 정의하였다.

$$Extinction Ratio = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3)$$

이제, 그림 2에 보인 바와 같이, 방향성 결합기의 입력부를 구현하는 전형적인 두 가지 대표적 결합기 구조를 대상으로

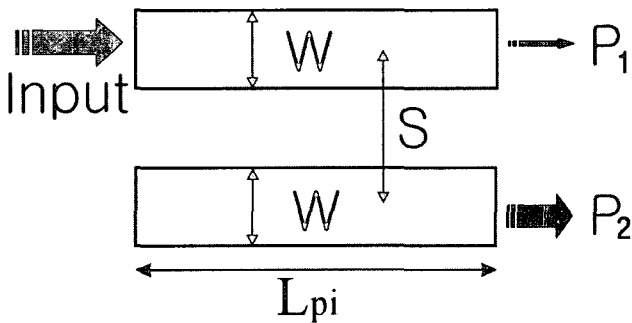


그림 1. 방향성 결합기의 결합영역 모식도.

비교 분석하고자 한다. 직선형 접근방식 도파로 구조는 접근각도가 일정하게 유지되는 구조이고, 곡선형 접근방식 도파로 구조는 연결부 도파로에 일정한 곡률반경을 주어 반을 진행하고 나머지 반은 곡률반경을 반대로 적용하여 연결함으로써 접근각도가 점진적으로 변화되도록 설계하고 중간위치에서의 접근각도의 절반이 전체평균 접근각도가 되도록 설정한 구조이다.

여기에서 코어와 클래딩의 굴절율은 각각 1.51와 1.4로 설정하였으며, 결합영역의 도파폭과 도파로 중심간 간격은 도파폭 안정화 조건으로 최적화하여 각각 w=1 μm, s=1 μm로 두고, 초기 도파로 중심간 간격은 s<sub>i</sub>=7.2 μm로 두었다.<sup>[7]</sup> 접근각도가 작을수록 이상적인 이론치와 결과가 같겠지만 소자의 길이가 너무 길어져 곤란하며, 접근각도가 크게 되면 소자는 작게 설계되지만 도파모드의 이론치와 상당히 어긋날 뿐더러 광손실이 심각하게 유발되는 단점이 있으므로, 일단 접근각도가 5°인 경우를 선정하여 두 구조에 대해 BPM(Beam Propagation Method) 프로그램<sup>[8]</sup>을 이용하여 전산모사한 광모드 형태의 결과를 비교하고 있다. 두 경우 모두 광결합은 설계된 대로 완전결합길이에 맞추어져 있어 적절한 전이가 되고 있으나, 접근부 초반에서는 도파로 상단으로 모드가 치우치고 접근부 후반에서는 도파로 하단으로 모드가 치우치는 과잉스플림을 보이고, 결합영역에서는 광모드가 다소 불안정한 형태를 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

접근각도에 따라 광모드가 좌우로 치우치는 정도가 변화하는 경향을 확인하기 위하여 BPM으로 전산모사하여 그림 3에 나타내었다. 접근각도가 변화되는 조건에서도 초기 도파로 중심간 간격은 항상 s<sub>i</sub>=7.2 μm로 고정하였다. 각 도파로 구조의 접근부 중간지점에서 광모드를 확인하였고, 그 모드

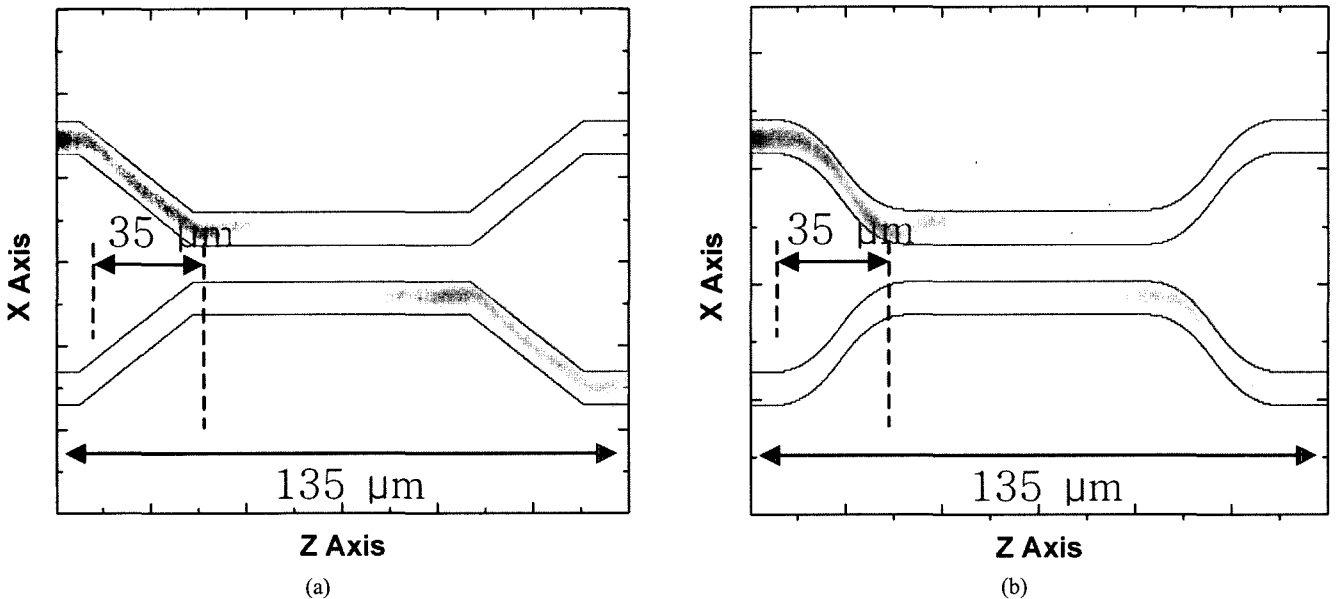


그림 2. 접근각도가 5°인 (a) 직선형 접근방식 도파로 구조와 (b) 곡선형 접근방식 도파로 구조의 방향성 결합기 설계 모식도와 그에 따른 진행광모드의 과잉스플림

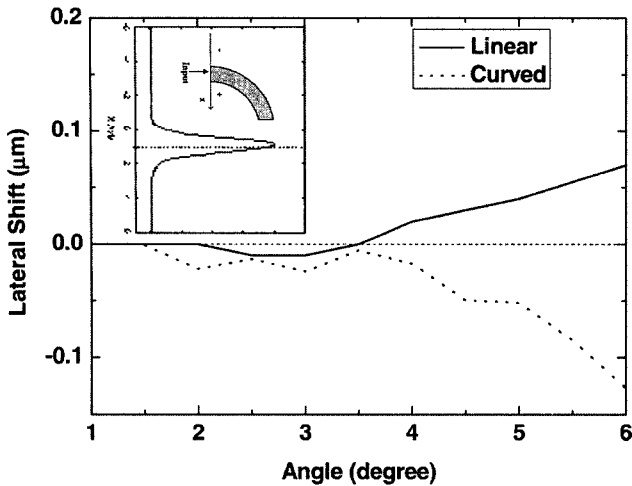


그림 3. 접근부 중간지점에서 확인한 접근각도 변화에 따른 광모드 횡방향 이동(lateral shift).

중심이 도파로 중앙에서 상하로 치우친 정도를 접근각도의 함수로 나타내었다. 이 때, 진행광이 진행상 좌측으로 치우친 것을 음의 부호로, 우측으로 치우친 것을 양의 부호로 표현하였다.

접근각도가 작은 경우에는 직선형과 곡선형 구조 모두 광모드 소멸이 거의 없지만, 접근각도가 증가하면 2°만 되어도 곡선형 구조는 광모드 소멸이 시작되는 것을 볼 수 있다. 이 때, 곡선형 구조의 중간지점에서의 접근각도는 그 두 배인 4°라는 것을 감안하면 직선형보다도 모드 소멸이 심해 보이지는 않는다. 흥미로운 것은 두 경우 모두 약 3.5° 정도에서 모드 소멸이 거의 사라지는 것이며, 접근각도가 그 이상인 경우에는 모드 소멸이 서로 반대방향이 된다는 것이다. 곡선형의 모드 소멸이 음이 되는 것은 곡률도파로의 근사이론에 비추어 곡률에 비례하는 모드 치우침으로 이해될 수 있으나, 직선형의 모드 소멸이 양이 되는 것은 그 반대이므로 원인이 다를 것으로 추측된다. 두 구조의 차이를 고려하면, 도파로 연결 시작부에서의 갑작스러운 도파방향 변화에 의한 경계조건 변경에 대한 과도응답인 것으로 보이며, 이제부터 논의될 소멸비 특성과 방사손실 분석 결과에 잘 나타나듯이 이는 배제되어야 할 설계조건이라는 것이 명백하다.

방향성 결합기 소자의 특성변화를 확인하기 위해서 광신호가 결합영역을 모두 지나서 최종출력이 될 때의 소멸비(Extinction Ratio)를 접근각도의 함수로 그림 4에 나타내었다.

두 구조 모두에 대해서 전반적으로 접근각도가 커질수록 소멸비 특성이 점점 열화되는 것을 볼 수 있으며, 이는 전이계수의 차이 심화경향과 기본모드의 불완전 상쇄를 감안하면 지극히 당연한 결과이다. 한데, 흥미롭게도 3°-3.5°의 영역에서 소멸비가 부분적으로 개선되고 있다. 이 각도 영역에서는 모드 소멸도 거의 없어지는 경향을 보였음을 상기해보면, 접근각도를 적절하게 조절하여 광모드의 과잉소멸을 상쇄할 수 있었고 이로써 전이계수의 차이에 의한 소멸비 열화를 개선하는 효과를 얻게 된다는 것이다. 즉, 소자의 길이를 줄이면

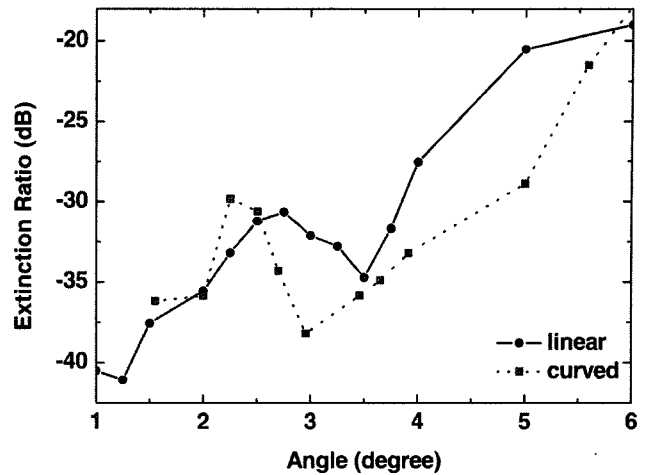


그림 4. 접근각도 변화에 따른 방향성 결합기의 출력 소멸비 변화 경향.

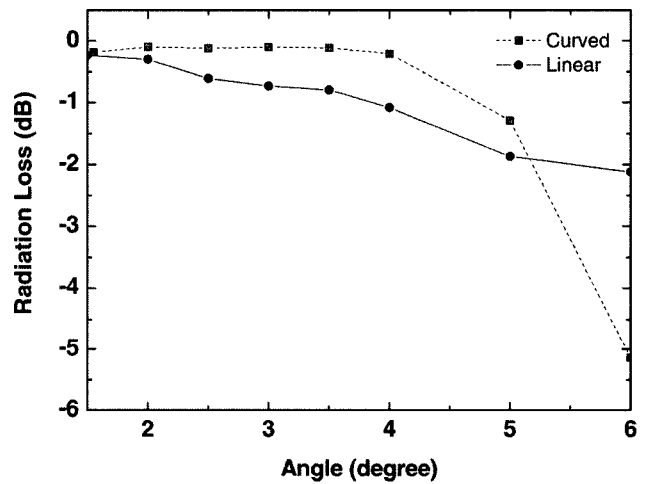


그림 5. 접근각도 변화에 따른 방사손실의 변화 경향 (■: curved, ●: linear).

서도 안정적인 소멸비 특성을 갖도록 최적설계하는 것이 가능하다는 것이다. 그리고, 이러한 개선효과가 곡선형 구조에 더욱 두드러지게 효과가 있음에 주목하자. 이제, 접근각도의 변화에 따른 방사손실의 변화경향을 그림 5에 나타내었다. 이 방사손실은 총 출력에너지( $P_1+P_2$ )와 입사된 광에너지의 비로 정의되었다. 예상되는 대로 직선형 구조의 경우에는 접근각도의 증가에 따라 방사손실이 계속 커지는 경향을 보여 갑작스러운 도파방향 변화에 의한 경계조건 변경에 대한 과도응답이 부정적인 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 곡선형 구조의 경우에는 약 4° 정도로 접근각도를 높여도 방사손실은 무시할 만한 수준에 머무르고 있어 소멸비 최적화 각도인 3°로 설정하는 것이 무난하여 최적화 설계를 가능케 하고 있으며, 접근적인 도파로 연결의 중요성을 잘 나타내고 있다.

이제 접근각도가 커짐에 따라 간단한 도파이론에 의해 유효결합길이를 근사하는 것이 어느 한도까지 유효한 지를 확인하고자 한다. 우선 각 접근각도로 설계된 두 가지 소자구

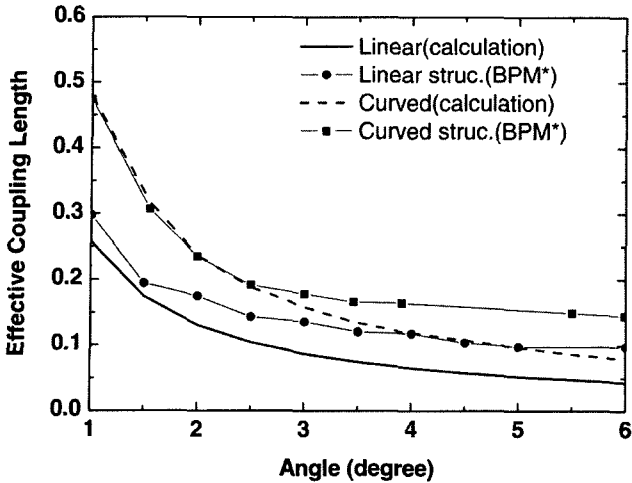


그림 6. 접근각도 변화에 따른 도파로 접근부의 유효결합길이 산출치 비교(BPM으로 산출한  $L_r$ 로 정규화).

조에 대해 모드진행과 분석법으로 근사적으로 산출한 유효결합길이와 BPM 전산 모사로 확인한 유효결합길이를 그림 6에 함께 비교하였다.

접근각도가 커질수록 접근부의 유효결합길이가 감소하는 것은 물리적으로 당연하며, 직선형 구조에 비해 곡선형 구조의 유효결합길이가 항상 다소 긴 것도 접근부 후반의 구조를 감안할 때 물리적으로 타당하다. 흥미로운 것은, 곡선형 구조의 경우에 이론치와 BPM 결과가 거의 일치하며 소멸비 최적화 각도인 3°부터 오차가 생기고 있다는 점이다. 직선형 구조의 경우는 아예 접근각도가 작을 때부터도 오차가 존재하고 있어 도파구조로 인한 경계조건 급작변경에 대한 과도응답의 부정적인 영향이 심각하다는 것을 보여주고 있으며, 특별한 오차수정의 대응방안이 마련되어 있지 못하다. 반면, 접근적인 접근각도를 갖는 곡선형 구조에 있어서도 3° 정도의 접근각도부터는 모드솔림에 의한 모드이론의 오차가 유발된다는 것을 보여주고 있으나, 이는 곡선형 도파로의 모드를 감안한 수정이론에 의하면 더욱 나은 보정효과를 얻을 수 있다.

### III. 토의 및 결론

입사도파로의 접근각도 변화에 따른 광모드솔림과 소멸비 특성의 변화를 확인하고, 방사손실의 유발 정도와 유효결합길이의 산출치를 이용한 도파이론의 오차 정도의 분석결과를 연계하여 방향성결합기 소자의 최적설계를 가능하게 하는 방안을 도출하였다. 또한, 결합영역 내 기본모드로의 광에너지 전이계수의 차이를 줄이기 위한 접근각도의 설정이 소멸비 특성을 개선하는 효과가 있으며, 구조분석의 이론적 틀의 오차한계 안에 들어 있어 최적설계가 가능하다는 점을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] T. Wongcharoen, et al., "Electro-Optic Directional Coupler Switch Characterization," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 377-382, 1997.
- [2] N. Anwar, et al., "Design Considerations for an Electrooptic Directional Coupler Modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 598-605, 1999.
- [3] M. Kohtoku, et al., "High-Speed InGaAlAs-InAlAs MQW Directional Coupler Waveguide Switch Modules Integrated with s Spotsizer Converter Having a Lateral Taper, Thin-Film Core, and Ridge," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 360-369, 2000.
- [4] S. T. Chou, et al., "ARROW-Tape Vertical Coupler Filter: Design and Fabrication," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 652-658, 1999.
- [5] Bin Liu, et al., "Fused InP-GaAs Vertical Coupler Filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1 pp. 93-95, 1999.
- [6] 최철현, 오범환, 이승걸, 박세근, 이일항, "방향성 결합기의 최적 입사각 특성," 한국광학회 2003년도 하계학술발표회 논문집, pp. 218-219, 2003
- [7] 최철현, 박순룡, 오범환, "방향성 결합기의 성능 및 허용오차 개선을 위한 신제안," 한국광학회지, 제11권 6호, pp. 405-409, 2000
- [8] 김창민, "도파 및 집적광학: 광통신 소자," ohm사, 2000.

## Investigation of Optimal input Angle for Directional Coupler and Field-profile Overshooting

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

*Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA)*

*School of Information and Communication Engineering, College of Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, South Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: ehlee@inha.ac.kr*

(Received September 21, 2005, Revised manuscript September 21, 2005)

We investigate a method to improve the extinction ratio of directional couplers by controlling the angle of approach to their input ports and controlling the error limit for improving the extinction ratio of the directional coupler. Although relatively large angle of approach to the input port usually causes an error in calculations made by mode propagation analysis(MPA), optimally designed angle of approach not only minimizes errors in MPA calculations but also can improve extinction ratio by precision control of coupling coefficients of optical modes. We show that abrupt changes in approaching angle, although not enough to cause modal leakage, give rise to field-profile overshooting, which degrades extinction ratio and other properties of the directional coupler. Using Beam Propagation Method (BPM) we calculate two types of input structures, linear and curved, for optimization of extinction ratio.

OCIS Codes : 230.7370. 220.4830. 250.5300.