

## 광도파로간 거리 변화에 따른 광결합 정량화

# Variation of optical coupling between coupled waveguides according to the curvature

이현식, 오범환, 이승걸, 박세근, 이일항

Micro Photonics Advanced Research Center

인하대학교 정보통신공학부

ehlee@inha.ac.kr

광집적회로의 등장으로 그 설계에 있어서 다양한 구조의 광배선은 필수적 요소가 되었다. 일반적으로 전기적 배선 및 소자간에 전자기파의 간섭으로 인해 신호의 왜곡이 야기될 뿐 아니라 기생 정전효과 등에 의해 소자 시간지연이 유발되듯이, 광 집적회로에서도 광배선간 감쇄필드의 겹침으로 인해 원하지 않는 광결합이 발생하게 된다. 이러한 광집적회로내에서의 이러한 불필요한 광결합을 줄이기 위해서 곡선형 구조의 광배선들이 이용되며 대부분의 경우 이러한 곡선형 도파로 부분의 광결합은 무시된다. 하지만 곡선형 도파로의 광결합을 고려하지 않고는 개별 광소자들의 설계뿐만 아니라 총체적인 광집적회로의 설계도 불가능하다. 이에 본 논문은 평행한 두 도파로 간의 간격에 따른 완전결합길이 변화특성을 바탕으로 다양한 곡선형 도파로를 해석할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한 유한 차분 시간영역 해석법으로 이와 같은 방법론을 검증하였다.

같은 두께의 도파로폭을 갖는 두 도파로가 있고 두 도파로 간은 일정 간격 분리되어 평행하게 놓여져 있다. 이때 일정 거리로 유지되어 있던 두 도파로 간의 간격을 변화시키면서 입력 도파로에서 출력 도파로 쪽으로 광신호가 모두 전이 되는 길이 즉, 완전결합길이 변화를 관찰하면 그림 1과 같다. 그림 1에서 볼 수 있

듯이 완전결합길이는 도파로간의 간격 변화에 지수적으로 변화한다. 이는 두 도파로 간의 광결합을 통해 설명할 수 있는데 입력 도파로의 광신호는 지수적인 분포를 보이는 evanescent wave의 전이에 의해 출력 도파로로 쪽으로 광결합이 이루어지기 때문이다. 부연하면 완전 결합길이는 도파로에서 형성되는 지수적인 evanescent wave 분포에 영향을 받아 지수적으로 변화하는 것이다. 그림 1의 결과를 수식적으로 정량화하면 다음과 같다.[1]

$$L_{\pi} = Ae^{s/\tau} \tag{1}$$

여기서  $s$ 는 도파로 간의 간격이고  $A$ ,  $\tau$ 는 상수이다. 이제 도파로간 간격과 완전결합길이의 정량화된 수식을 바탕으로 곡률 반경  $r$ 을 가진 곡선형 도파로의 광결합을 분석할 수 있다. 다음은 직선형 입력 도파로와 곡선형 도파로를 나타낸 그래프이다. 광결합이 일어나는 두 도파로를 미소 영역으로 분해할 수 있고 이 경우 분할된 각각의 미소 영역은 근사적으로 앞서 언급한 식(1)을 적용할 수 있다. 그림 2에서 나

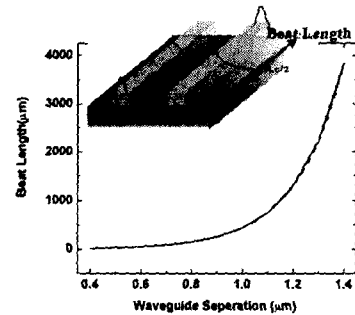


그림 1. 평행한 두 도파로 간의 간격에 따른 완전결합길이 변화

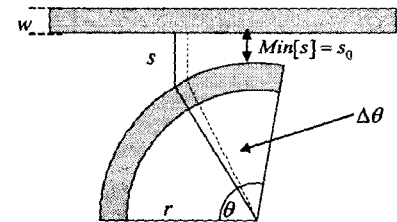


그림 2. 직선형과 곡선형 도파로에서의 광결합의 모식도

타나 있는 것처럼 곡선형 도파로의 미소 영역 분할은 미세 변화각  $\Delta\theta$  을 기준으로 분할되고 식 (1)을 적용하여 곡률부에 의한 광결합을 분석하였다. 우선 도파로간의 간격  $s$ 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$s = s_0 + R(1 - \sin\theta) \quad (2)$$

곡선형 도파로가 시작되는 각 을 기준으로 미세 변화각  $\Delta\theta$  만큼 변화할 때 결합길이  $L_{coupling}$ 의 변화를 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta L_{coupling} = R[\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \quad (3)$$

또한 미세 변화각  $\Delta\theta$  만큼 변화하였을 때의 곡률부에 의한 유효 결합길이  $L_{eff,c}$ 를 구하면 다음과 같다. 여기서 유효 결합길이  $L_{eff,c}$ 란 결합길이를 완전 결합길이를 정규화한 값으로 정의되며 곡률부에 광결합에 의한 유효 결합길이임으로  $c$ 라는 첨자가 붙어 있다.

$$L_{eff,c} = \frac{\Delta L_{coupling}}{L_\pi} = \frac{R[\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)]}{A \exp\{R[s_0 + R(1 - \sin\theta)]/\tau\}} \quad (4)$$

이를 결합영역 전체에 걸쳐 합을 구하면 다음과 같은 최종식을 얻을 수 있다.

$$L_{eff,c} = \frac{L_{coupling}}{L_\pi} = \sum \frac{\Delta L_{coupling}}{L_\pi} = \sum_{i=k}^n \frac{R[\cos\theta_i - \cos(\theta_i + \Delta\theta)]}{A \exp\{R[s_0 + R(1 - \sin\theta)]/\tau\}} \quad (5)$$

또한 수식 (5)을 도출하는 과정을 다양한 곡률 구조를 갖는 광소자에 대해 적용한다면 광소자의 특성 분석을 유용할 것이다. 평행한 두 도파로 간의 간격과 완전 결합길이의 관계로부터 정립한 식 (5)은 다사단 FDTD를 이용하여 검증하였다. 비교 검증의 결과를 얻기 위해서 그림 2와 같은 구조를 대상으로 반경  $R$ 이 각각 10, 50 그리고 100 $\mu\text{m}$ 인 경우에 대해서 광결합 시작 각도  $\theta$  을 달리 하여 전산 모사 되었다. 그림 3에서 FDTD의 결과와 방향성 결합기의 도파로 간의 간격과 완전 결합길이의 관계로부터 정립한 수식의 결과는 아래 표시된 그래프와 같다. 그림 3에서 산란점(■)으로 표시된 FDTD의 결과와 도파로간의

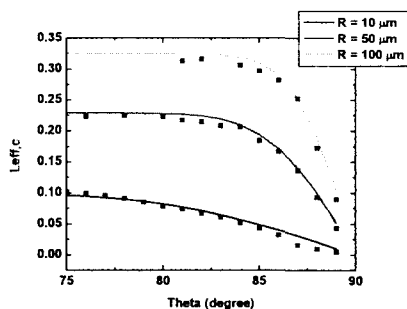


그림 3. 각 곡률 반경  $R$ 에서의  $\theta$ 변화에 따른 곡률부의 유효결합길이 변화비교

의 간격과 완전 결합길이의 관계로부터 정립한 수식의 결과와 상당히 일치하고 있다. 광결합은 도파로간을 전이하는 광신호의 지수적인 분포를 보이는 evanescent wave에 의해 결정되는데 본 논문은 평행한 두 도파로간의 간격에 따른 완전결합길이 변화분석을 통해 보다 다양한 구조를 갖는 광도파로간의 광결합을 정량화하는 방법론에 대해 연구를 하였다. 이와 같은 방법론의 정확성과 유용성을 뒷받침하기 위해서 FDTD를 도입하여 다양한 곡률의 곡선형 도파로에 대해 검증한 결과 정확히 일치하는 결과를 얻었다. 본 논문은 다양한 곡률 구조에 대해서도 확장이 가능하며 다른 여러 개별 광소자 설계에도 응용이 가능할 뿐 아니라 이는 광집적회로에서의 광배선 설계시도 이용될 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

1. Caristi K. Madsen and Jian H. Zhao, Optical Filter Design and Analysis A Signal Processing Approach, John Wiley and Sons, 1999, pp. 131-136.

[감사의 글]

본 연구는 2002학년도 인하대학교의 지원(INHA-22504)과 한국과학재단 특정기초연구사업(01-1999-000-00225-0) 연구 지원으로 수행되었습니다.