

3차원 구조 광도파로소자의 신속 정확한 광속전파 전산해석을 위한 유효굴절률법의 수정

김한수 · 이형종

전남대학교 물리학과

전영운

정보통신연구관리단

양순철

목포대학교 물리학과

김진승

전북대학교 물리기술학부 기초과학연구소

정영철

광운대학교 전자통신공학과

(1998년 5월 14일 받음, 1999년 1월 22일 수정본 받음)

2차원 광속전파법을 써서 3차원 구조를 갖는 광도파로 소자를 보다 빠르고 정확하게 해석할 수 있게 하는 새로운 수정된 유효굴절률법을 제시한다. 이 방법은 계산시간이 너무 많이 요구되어 현실적으로는 사용하기가 어려운 3차원 광속전파법 대신에 직사각형, 둔덕, 또는 이와 유사한 형태의 광회로소자를 짧은 시간안에 정확히 해석할 수 있다. 실제로 직사각형 단면의 도파로로 이루어진 방향성 결합기에 이 방법을 적용하여 3차원 광도파로를 2차원으로 근사하는데 따른 계산 오차를 기존의 유효굴절률법보다 크게 줄일 수 있음을 보였다.

I. 서 론

광도파로에서 완전한 전자기장의 해를 구할 수 있는 경우는 평판도파로나 광섬유와 같은 도파로 매질간 경계면이 특정 좌표계의 좌표축과 일치하는 극히 제한된 경우들이다. 따라서 주어진 도파로 소자에서 전자기장의 거동을 신속하고 정확하게 계산하는 문제가 매우 중요하게 되었으며, 광도파로에서의 전자기장의 거동을 해석하기 위하여 지금까지 컴퓨터를 사용하는 근사해를 구하는 많은 방법들이 제안되었다.^[1-6]

광도파로의 해석은 다음 두가지로 크게 구별할 수 있다. i) 광의 진행방향으로 도파로의 굴절률 분포가 일정한 경우와 ii) 광의 진행방향으로 도파로의 굴절률 분포가 변하는 경우이다. i)의 경우는 도파로의 전자기장을 광의 진행축(z축)에 수직인 단면(x-y면)에서의 전자기장의 분포함수와 z축을 따라 변하는 전자기장의 위상함수로 변수분리를 할 수 있으며, 전자기장의 경계조건에 의해 x-y면에서 전자기장의 고유모우드를 구하고 그 특성을 연구하는 문제로 귀착된다.^[1-3] 그러나 ii)의 경우에는 z축의 변수분리는 불가능하므로 산란행렬법이나^[4] 광속전파법(Beam Propagating Method : BPM)[5,6] 등을 사용하여 x-y면에서 전자기장의 분포를 z의 증가에 따라 연속적으로

계산해나가며 도파로소자의 특성을 계산하게 된다. 이 방법들은 광의 진행에 따라 전자기장의 거동을 쉽게 시각화하여 볼 수 있는 장점이 있지만, 3차원적으로 계산할 경우에는 계산량이 많아서 시간이 오래 걸리고 개인용 컴퓨터로는 계산이 불가능한 경우가 많아서 주로 대형 컴퓨터를 쓰게 된다.

일반적으로 BPM 계산에서는 이같은 계산시간상의 단점을 보완하기 위하여 도파로의 2차원 단면을 1차원으로 근사하는 유효굴절률법(EIM; Effective Index Method)^[7]을 쓰며 이같이 근사된 1차원 도파로 단면에 BPM을 적용하게 된다. 유효굴절률법은 먼저 도파로 단면에서 매질의 변화가 비교적 적은 방향으로 한 축을 택한 다음 (이 축을 y축이라 하고 여기서는 기판과 평행한 축을 택하였음), 각 구간에서 y축을 따라 도파로 매질의 변화가 없도록 도파로 매질을 여러 구간으로 근사하여 나누고, 또한 나눈 각 구간을 x축 방향으로 적층된 평판(Slab) 도파로로 근사한다. 다음에 각 구간의 평판계가 y축 방향으로 무한히 넓은 평판계라고 가정하여 각 구간에서의 박막계의 모우드굴절률을 구한 다음, 최종적으로 y축상 각 구간을 이들 모우드굴절률로 이루어진 x축 방향으로 무한평판의 균일매질로 근사하여 3차원 도파로 문제를 y축 방향으로 적층된 2차원 평판도파로 문제로 만든다.

이같은 방법은 도파로 단면의 기하학적 구조 또는 모우드 함수가 어느 한 축방향으로 납작한 경우에 비교적 정확히 해석할 수 있다. 그러나 그 해석이 간단한 반면에 차단 주파수 근처에서는 오차가 커서 정확도를 신뢰하기가 어렵다. 따라서 평판 코어에 돌출 클래딩(막대 인가형; strip-loaded) 또는 둔덕(ridge) 코어를 갖는 주로 InGaAsP 등의 반도체 도파로에 잘 적용되는 방법이다. 그러나 돌출형 광도파로에서도 에칭 깊이가 깊을 경우나, 직사각형 모양의 채널도파로의 경우는 이 방법이 잘 맞지 않게 되며, EIM 근사에 의한 BPM 결과를 신뢰하기 어렵다.

본 연구에서는 광의 진행방향으로 굴절률분포가 변하는 3차원 채널 광도파로를 BPM 방법으로 해석하기 위하여 3차원 도파로를 2차원으로 근사할 때, 본 논문에서 제안된 수정된 유효굴절률법 (Modified Effective Index Method : MEIM)을 사용하면, 기존의 유효굴절률 방법보다 훨씬 정확한 2차원 근사가 가능함을 보인다. 또한 예로서 코어 단면이 직사각형인 3차원 방향성 결합기를 해석하는데 MEIM을 사용한 2차원 BPM을 적용하고 이를 여러 가지 다른 해석방법들과 비교하였다.

II. 수정된 유효굴절률법

그림 1은 집적광학에서 가장 기본적인면서도 많이 쓰이는 직사각형 단면의 코어와 그 외부의 클래드만으로 구성된 3차원 채널 광도파로이다. 여기서 클래드는 코어를 둘러싸고 있으며 광도파로 클래딩의 두께가 충분히 두꺼워서 실제 계산에서는 무한히 뻗어있다고 가정한다. 코어와 클래드간의 굴절률차가 적을 경우에 전자기장의 벡터 파동방정식은 다음의 스칼라 파동방정식으로 근사하여 해를 구할 수 있다.^[8]

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

여기서 $n(x, y)$ 와 n_m 은 도파로 단면의 굴절률 분포 및 모우드 굴절률이고 k_0 는 진공에서 빛의 전파상수 그리고 $E(x, y)$ 는 스칼라로 근사한 전기장이다.

파동방정식 (1)의 해를 먼저 조화함수 전개법(Harmonic-function Expansion Method; HEM)을 사용하여 구하였다.^[11,10] 그림 1의 도파로에 대하여 도파로 코어의 높이가 $5 \mu\text{m}$ 일때 모우드굴절률 n_m 을 계산하였으며, 그림 3에 최저차 모우드의 모우드굴절률을 코어 폭의 변화에 대하여 실선으로 나타냈다. 이 계산에서 광파장은 $1.55 \mu\text{m}$ 이고, 코어 굴절률 n_c 은 1.455, 클래드 굴절률 n_{cl} 은 1.444로 하였다. HEM에서는 조

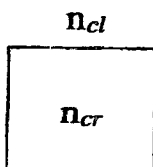


그림 1. 직사각형 단면의 채널 광도파로. n_{cr} 및 n_{cl} 은 코어 및 클래드 굴절률임.

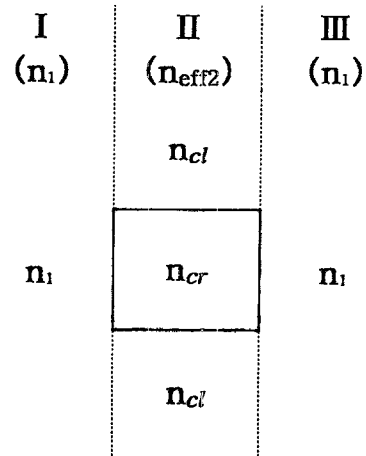


그림 2. 직사각형 단면의 광도파로를 1차원으로 해석하기 위하여 나눈 영역. 여기서 영역 I과 III의 굴절률은 n_1 이고 영역 II의 등가굴절률은 n_{eff2} 임.

화함수의 전개영역 크기가 충분히 크고 또한 충분한 갯수의 바탕함수를 사용하면 광도파로의 해를 매우 정확히 구할 수 있다. 여기서도 x축과 y축의 바탕함수 갯수를 각각 25개씩 사용하고 전개영역의 크기를 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 로 하여 계산된 모우드굴절률값이 소수점 이하 최소 5자리까지 수렴되도록 하였다. 따라서 이 결과를 다른 방법들로부터 얻은 결과와 비교하는 기준으로 삼기로 하자.

그림 1의 도파로를 EIM^[7]으로 2차원 근사를 하여도 그 계산 결과를 신뢰할 수 있는지 살펴보기 위하여, 위의 HEM 계산에서 사용된 동일한 도파로에 대하여 EIM 방법으로 모우드굴절률 n_m 을 계산한 다음, 그 결과를 HEM에 의한 계산 결과와 비교하였다. 먼저 유효굴절률법 근사를 위해 그림 2처럼 도파로 코어를 중심으로 y축을 따라 세 영역으로 분할한다. 이때 영역 I과 III의 유효굴절률은 영역을 분할하기 전의 원래 클래드 굴절률 n_{cl} 과 동일하지만 편의상 n_{cl} 과 구분하여 n_1 이라고 한다. 영역 II는 유한 폭의 3개 평판으로 이루어져 있지

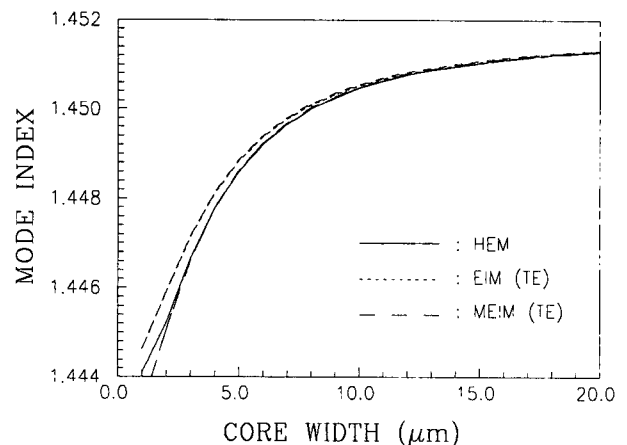


그림 3. 조화함수 전개법(HEM), 유효굴절률법(EIM) 및 수정된 유효굴절률법(MEIM)으로 구한 모우드굴절률들. 각 TE 및 TM 모우드는 거의 일치하고 있음(코어 굴절률은 1.455, 클래드 굴절률은 1.444, 코어 높이는 $5 \mu\text{m}$ 임).

만 무한 폭으로 가정하여 이때의 평판계의 모우드굴절을 즉 유효굴절을 구하고 (EIM의 1단계) 이를 n_{eff} 라 한다. 그림 1의 광도파로는 그림 2의 점선과 같이 1단계에서의 평판과는 수직인 n_1 과 n_{eff} 의 등가굴절을 갖는 x방향으로 적층된 평판도파로로 볼 수 있으며, 따라서 광도파로의 모우드굴절을 n_1 과 n_{eff} 의 굴절률로 이루어진 평판도파로로부터 계산한다.(EIM의 2단계) EIM 방법으로 구한 모우드굴절률 n_m 은 n_1 과 n_{eff} 사이 존재하며 그림 3의 긴 파선과 같다.

그림 3을 살펴보면 도파로 코어의 폭이 클 경우에는 EIM으로 계산한 모우드굴절률 n_m 은 HEM으로 계산한 n_m 과 잘 일치하나, 도파로 코어의 폭이 작아질 경우, EIM에 의한 계산값은 HEM에 의한 계산값보다 커지며 특히 차단주파수 근처에서는 EIM 계산의 정확도를 신뢰할 수 없게 된다. 이같은 이유는 EIM 계산에서 유한한 폭을 갖는 영역 II를 무한한 폭의 평판계로 가정하여 영역 II의 모우드굴절률을 n_{eff} 라고 대체한 데 있다. 차단주파수 근처의 EIM 계산에 의한 모우드굴절률 n_m 의 정확도를 개선시키는 것은 도파로의 모우드굴절률 값 n_m 이 n_1 과 n_{eff} 사이 존재하므로 EIM의 2단계에서 n_1 을 작게 조정하여 그림 3에서 도파로 폭이 큰 경우의 EIM 모우드굴절률을 변화시키지 않고 차단주파수 근처의 EIM 모우드굴절률을 끌어내림으로서 가능하다. 여기서 n_1 의 감소는 y축 방향(그림 2의 수직방향)의 모우드 구속을 강화하고 이는 도파로 2차원 단면상에서 x축 방향(그림 2의 수평방향)의 모우드 구속을 줄여주는 효과에 해당한다. 결국 이같은 효과는 슬랩 폭이 무한하다고 가정하여 x축 방향의 모우드를 계산한 EIM 방법의 오차를 줄여주는 효과를 가져온다. 또한 그림 3에서 코어 폭이 커지면 HEM이나 EIM으로 구한 모우드굴절률은 모두 n_{eff} 로 접근하므로 차단주파수보다 충분히 큰 영역에서는 n_1 의 조정에 의한 모우드굴절률의 변화가 적어서 결국 모우드굴절을 분산곡선의 모든 영역에서 잘 맞는 근사가 되도록 할 수 있다. 이와같이 n_1 의 조정으로 EIM 계산의 오차를 줄이는 방법을 여기서는 수정된 유효굴절률법(Modified Effective Index Method; MEIM)으로 부르기로 한다.

MEIM의 최적굴절률 n_1 을 결정해 보기로 하자. 여기서 최적굴절률 n_1 은 사용되는 도파로 코어 폭의 변화 범위에 대하여 도파로 폭을 일정량씩 증가시켜가면서 다음과 같이 주어지는 MEIM 계산치의 HEM 계산치에 대한 표준편차가 최소가 되도록 결정하였다.

$$\text{STANDARD DEVIATION} \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_{mi}^M - n_{mi}^H)^2} \quad (2)$$

n_{mi}^M 와 n_{mi}^H 는 각각 도파로 코어 폭이 $i \mu\text{m}$ 일 때 MEIM과 HEM으로 계산한 모우드굴절률 n_m 이고 L과 U는 도파로 코어 폭의 최소 및 최대치로서 여기서는 $3 \mu\text{m}$ 과 $20 \mu\text{m}$ 으로 택하였고 N은 전체 변량의 갯수로서 18이다. 즉 코어 높이를 고정하고 수정된 클래드층 굴절률 n_1 에 대하여 코어 폭을 변화시키면서 모우드굴절률 n_{mi}^M 을 구한 다음에 그 결과를 HEM으로 구한 모우드굴절률 n_{mi}^H 과 비교하여 두 방법으로 구한 모우드굴절률들 간의 표준편차를 (2) 식을 사용하여 구하였다. 이상의 방법으로 구한 표준편차를 다시 n_1 을 변화시켜가면서 같

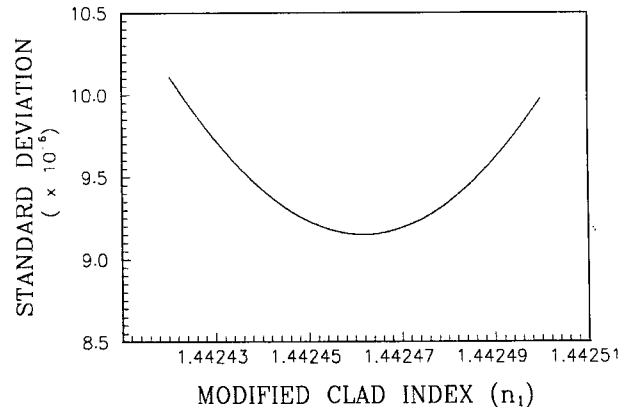


그림 4. 영역 I, III의 굴절률 n_1 을 변화시키면서 EIM으로 구한 모우드굴절률의 HEM으로 구한 모우드굴절률에 대한 표준편차.

은 방법으로 계산할 수 있으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 코어 폭 i 를 $3 \mu\text{m}$ 부터 시작한 이유는 실제 사용되는 대부분 도파로의 경우 코어의 폭이 $3 \mu\text{m}$ 이상이기 때문이며 실제로 BPM을 적용할 때 사용되는 도파로 폭의 범위에 따라서 편차합의 범위가 달라질 수도 있다.

EIM에서 n_1 은 1.444이며 이때 구한 모우드굴절률과 HEM으로 구한 모우드굴절률간의 표준편차는 1.72×10^{-4} 이었다. 반면에 그림 4로부터 n_1 이 감소함에 따라서 모우드굴절률의 표준편차는 줄며, 1.4424618 정도일 때 가장 적음을 알 수 있다. 그러므로 n_1 을 1.4424618으로 택한 것이 MEIM의 방법이며, 이 n_1 을 그림 1의 광도파로에 적용하여 구한 모우드굴절률을 그림 3에 짧은 파선으로 나타내었다. 이 결과를 기존의 유효굴절률법(EIM)의 결과와 비교해보면 여기서 제안한 MEIM이 비록 차단주파수 근처에서는 약간의 차이가 있다고 하여도 훨씬 HEM과 잘 일치함을 알 수 있다. 표 1에 그림

표 1. 각 방법으로 구한 코어 폭에 대한 모우드 굴절률들(코어 높이는 $5 \mu\text{m}$, 코어 굴절률은 1.455, 클래드 굴절률은 1.444임)

코어 폭 (μm)	조화합수 전개법	수정된 유효굴절률법		유효굴절률법	
		TM	TE	TM	TE
1	1.444093	1.443348	1.443332	1.444628	1.444621
2	1.445215	1.445075	1.445051	1.445924	1.445912
3	1.446648	1.446625	1.446608	1.447162	1.447155
4	1.447775	1.447782	1.447775	1.448131	1.448131
5	1.448595	1.448616	1.448617	1.448852	1.448858
6	1.449205	1.449221	1.449229	1.449387	1.449398
7	1.449660	1.449669	1.449682	1.449790	1.449805
8	1.450000	1.450007	1.450023	1.450098	1.450116
9	1.450261	1.450268	1.450287	1.450338	1.450358
10	1.450469	1.450473	1.450494	1.450528	1.450549
11	1.450635	1.450637	1.450659	1.450681	1.450704
12	1.450768	1.450770	1.450793	1.450806	1.450829
13	1.450878	1.450879	1.450903	1.450908	1.450933
14	1.450970	1.450970	1.450995	1.450994	1.451019
15	1.451047	1.451046	1.451072	1.451067	1.451092
16	1.451111	1.451111	1.451137	1.451128	1.451154
17	1.451167	1.451166	1.451192	1.451181	1.451207
18	1.451215	1.451214	1.451240	1.451227	1.451253
19	1.451257	1.451255	1.451282	1.451266	1.451293
20	1.451293	1.451291	1.451318	1.451301	1.451328

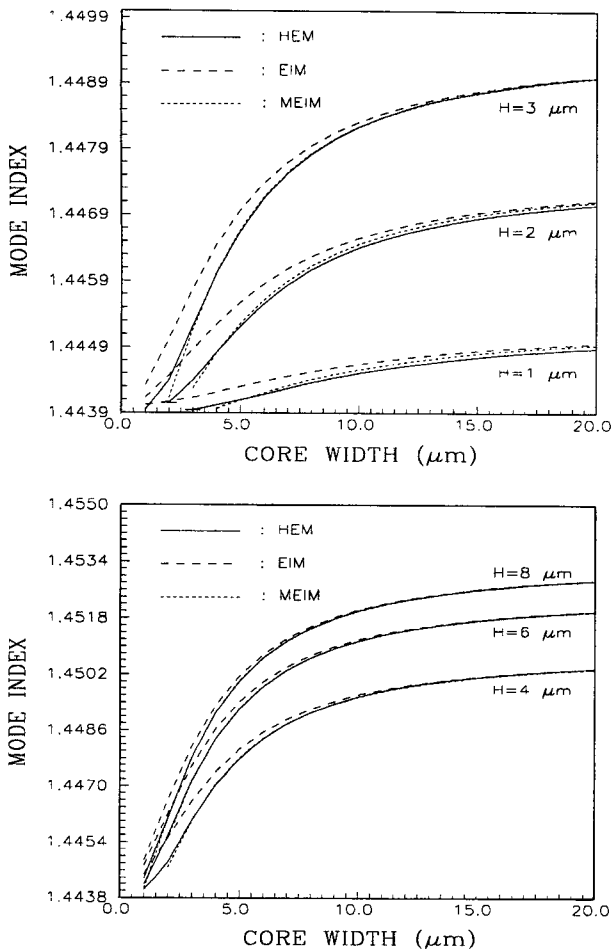


그림 5. 조화함수 전개법(HEM), 유효굴절률법(EIM) 및 수정된 유효굴절률법(MEIM)으로 구한 모우드굴절률들(H는 코어 높이이고, 코어 굴절률은 1.455, 클래드 굴절률은 1.444임).

3의 모우드굴절률 값들을 각 방법에 대하여 적어놓았다. 표 1을 보면 주로 사용되는 도파로 폭의 범위에서(대략 3 μm 이상에서 7 μm 이하 정도) MEIM이 HEM과 소수점 이하 네 자리 정도가 일치하는데 반하여 기존의 EIM은 두 자리 내지 세 자리 정도가 일치함을 알 수 있다.

지금까지는 코어 높이가 5 μm 인 경우에 코어 폭에 대하여 모우드굴절률을 계산하고 비교하였다. 코어 높이가 달라질 경우에 MEIM과 기존의 EIM 및 HEM으로 구한 모우드굴절률이 그림 5a, 5b이다. 그림 5를 보면 MEIM이 기존의 EIM에 비하여 HEM으로 구한 모우드굴절률 곡선들과 훨씬 더 잘 일치하고 있으며, 차단주파수 이상 즉 코어 폭 또는 높이가 약 3 μm 이상이면 MEIM과 HEM으로 구한 모우드굴절률들은 거의 분간할 수 없음을 알 수 있다. 그림 6은 코어 두께가 달라질 경우 각각의 코어 두께에서 최적굴절률(표준편차가 최소인 n_1)을 식 (2)에 의하여 결정해 후, 그때의 표준편차를 코어 두께에 대하여 나타낸 결과로서 코어 높이가 약 3 μm 이상이면 표준편차가 크게 줄어듦을 알 수 있다. EIM이나 MEIM 방법은 2차원 도파로 문제를 두 개의 1차원 슬랩 도파로의 문제로 환원시킨 방법으로서 도파모우드의 편광상태를 고려할 수 있다. 그림 6에 이같은 편광차이에 의한 표준편차를 계산하였

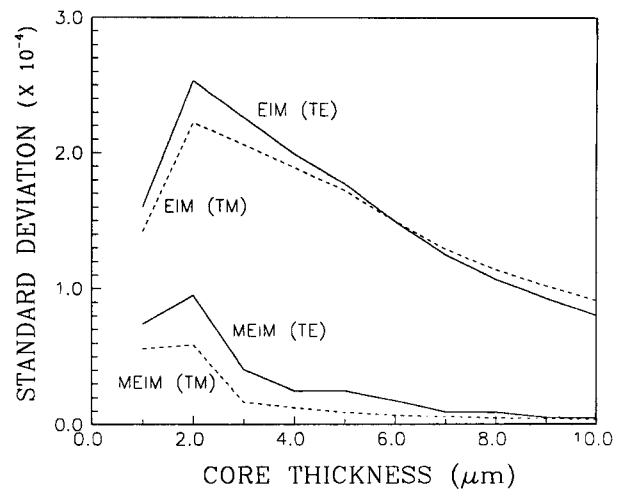


그림 6. 코어 두께에 대한 각 방법들로 구한 모우드굴절률들의 표준편차. 표준편차는 HEM으로 구한 모우드굴절률을 기준으로 하였고 코어 및 클래드 굴절률은 1.455 및 1.444임.

으며 우리가 고려하는 영역에서는 HEM에 대하여 TM 모우드가 TE 모우드보다 오차가 다소 적음을 알 수 있다.

III. 방향성 결합기의 BPM 계산

도파로를 따라 도파로 구조가 변하는 3차원 채널 광도파로를 BPM으로 해석하기 위하여 도파로의 2차원 단면을 1차원으로 근사할 때, 수정된 유효굴절률법(MEIM)을 사용하면 기존의 유효굴절률법(EIM)보다 더 정확한 도파모우드의 근사가 가능하고 BPM 계산의 정확도를 높일 수 있다. 여기서는 동일한 두 직사각형 코어 단면을 갖는 방향성결합기(directional coupler)의 어느 한쪽 도파로에 입사광을 여기시켜 두 도파로간에 광 세기의 변화를 BPM 방법으로 계산하여 방향성결합기의 결합길이를 구하고 그 결과를 다른 방법으로 구한 결과들과 비교하여 각 방법의 정확성과 신속성을 검토한다.

여기서 다루는 방향성 결합기는 도파로를 따라 균일한, 즉 도파로의 구조가 변하지 않는 경우이다. BPM 계산은 도파로를 따라 전자기장의 거동을 살피는 것이고 따라서 도파로를 따라 그 구조가 변하는 경우에도 전자기장의 거동을 살피는 BPM 방법의 적용성이 손상되지 않는다. 반면, 도파로를 따라 도파로의 구조가 변하지 않는 경우는 모우드결합 이론(Coupled Mode Theory)으로부터 정확한 결합길이를 구하여 이를 BPM 계산결과와 비교할 수 있는 잇점도 있다. 따라서 여기서는 두 도파로가 서로 근접하기 시작하는 부위가 없는, 즉 처음부터 근접해 있는 도파로를 따라서 균일한 방향성결합기에 대하여 계산하기로 한다.

EIM과 MEIM으로 1차원 근사한 방향성 결합기에 대하여 2차원 FD-BPM(Finite Difference Beam Propagation Method)^[5] 계산을 하였다. 또한 근사없이 대형 컴퓨터(Cray)를 사용하여 계산한 3차원 SSFD-BPM(Split-Step Finite Difference Beam Propagation Method)^[6]의 결과와도 계산시간 및 정확도 면에

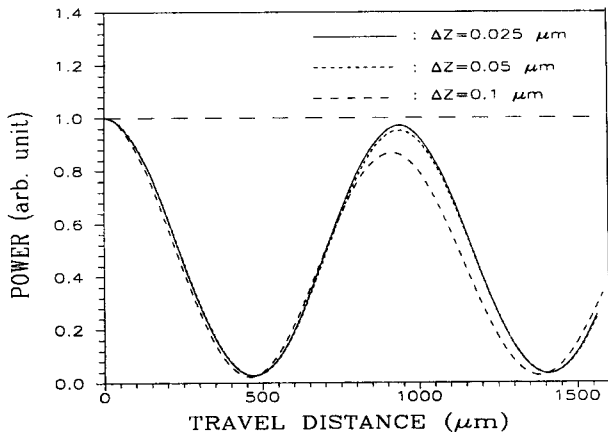


그림 7. 계산간격 Δz 에 대하여 3차원 BPM으로 계산한 방향성 결합기의 한쪽 도파로 코어에 남아있는 광의 세기.

서 서로 비교하였다. 계산시간을 비교할 때는 2차원 BPM을 사용하여 걸린 CPU 시간을 1로 기준하였다. 사용된 도파로는 코어 중심간 거리가 $8 \mu\text{m}$ 이고 굴절률 분포는 파장 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 코어가 1.455, 클래드가 1.444, 코어 단면이 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 이다.

먼저 BPM을 수행할 때 각 방향으로의(광의 진행축은 z축, 도파로의 단면은 x-y면) 전자기장의 계산 격자점(grid point) 간격을 Δx , Δy 및 Δz 라 하자. Δx 와 Δy 를 변화시켜 BPM으로 전자기장의 수렴성을 조사한 결과, Δx 와 Δy 를 각각 $0.1 \mu\text{m}$ 로 하면 그 계산결과를 신뢰할 수 있었다. 그러나 계산간격 Δz 는 2차원 BPM의 경우 $1 \mu\text{m}$ 정도면 충분하였으나,^[5] 투명경계조건 (Transparent Boundary Condition; TBC)^[9]의 사용이 가능한 3차원 BPM의 경우 대략 $0.025 \mu\text{m}$ 미만이 필요함을 그림 7을 통하여 알 수 있었다. 그림 7은 방향성결합기의 어느 한쪽 도파로에 광을 여기시킨 후 여기된 도파로에 남아있는 광의 세기를 진행거리 z에 따라 계산한 것이다. 입력 도파로에 고유모우드를 여기할 경우 광 세기가 진행거리에 대하여 감쇠없이 주기적으로 교차되어야 하므로 광 세기의 감쇄 정도가 계산 정확도의 척도로 이용될 수 있으며, 이로부터 Δz 가 적어도 $0.025 \mu\text{m}$ 미만이어야 함을 알 수 있다. 이때 사용한 입력 고유모우드는 HEM으로 계산하였다.

3차원 BPM을 수행할 때 x방향으로의 계산 격자점 갯수를 N_x , y 방향으로의 계산 격자점 갯수를 N_y 라 하면, z방향으로 $1 \mu\text{m}$ 의 진행거리를 계산하는데 걸리는 시간은 $\Delta z = 0.02 \mu\text{m}$ 로 할 때 2차원 BPM보다 $(N_x + N_y) \times 50$ 배가 더 소요된다. 실제로 계산영역이 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 일 때 N_x 와 N_y 는 각각 500이 되므로 동일한 진행거리를 계산하는데 3차원 BPM은 2차원 BPM보다 약 50000배가 더 소요되며 개인용 컴퓨터를 사용하여 3차원 BPM을 사용하기는 거의 불가능하고 대형 컴퓨터가 사용되어야 함을 알 수 있다.

도파로 단면을 1차원으로 근사하여 2차원 BPM 방법으로 구한 결과와 3차원 BPM 결과를 그림 8에 비교하였다. 2차원 BPM에 사용된 경계조건은 투명경계조건이며 $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ 로 계산하였다. 3차원 BPM을 사용하여 구한 완전 결합길이는 $1154 \mu\text{m}$, MEIM을 사용하여 2차원 BPM으로 구한 결과는

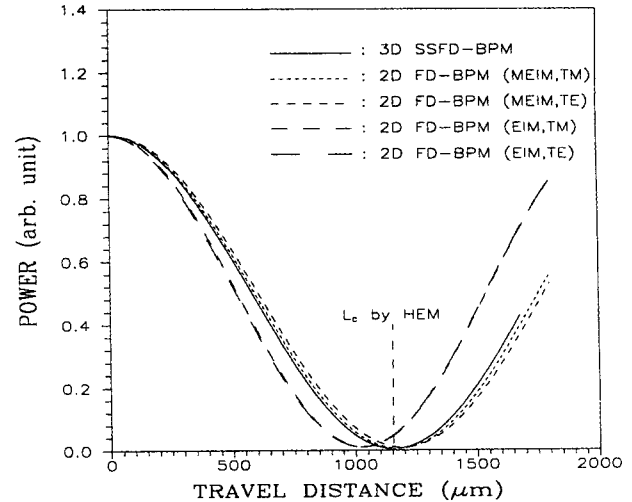


그림 8. 방향성 결합기에서 진행거리에 대한 도파로 내 광 세기 변화의 BPM 계산.

TM모우드가 $1170 \mu\text{m}$ 이고 TE모우드가 $1190 \mu\text{m}$ 인데 반해, 기존의 EIM을 사용하여 2차원 BPM으로 구한 결과는 TM모우드가 $1028 \mu\text{m}$ 이고 TE 모우드가 $1025 \mu\text{m}$ 로써, MEIM 근사가 EIM 근사보다 훨씬 3차원 BPM 결과에 근접함을 알 수 있다.

다음으로 방향성 결합기의 단면에서 대칭 및 반대칭 모우드의 모우드굴절률 n_e 와 n_o 를 HEM으로 구하고, 또한 MEIM 및 EIM으로 1차원 근사된 방향성 결합기에 대해서도 n_e 와 n_o 를 구한 다음, 대칭모우드의 위상 $e^{in_e k_0 z}$ 와 반대칭모우드의 위상 $e^{in_o k_0 z}$ 의 간섭 위상차가 π 가 되는 조건으로부터 다음과 같이 주어지는 완전 결합길이를 구하였다.

$$L_c = \frac{\lambda_0}{2(n_e - n_o)} \tag{3}$$

여기서 λ_0 는 진공중 파장이다. HEM으로 구한 완전 결합길이 L_c 는 $1154 \mu\text{m}$ 로서 3차원 BPM의 계산결과와 정확히 일치함을 알 수 있다. EIM과 MEIM으로 근사된 방향성 결합기에 대하여 마찬가지로 n_e 와 n_o 를 구하고 식(3)에 의해 결합길이를 구하였다. 방향성 결합기 내의 n_e 와 n_o 의 두 모우드의 계산에 의한 결과는 BPM 결과와 유사한 오차를 주었으며 이 경우 역시 MEIM 근사의 경우가 훨씬 더 정확한 결과를 주었다.

마지막으로, 한개의 코어만을 갖는 도파로로부터 모우드 함수를 구한 다음 모우드결합 이론을^[11] 써서 두 도파로로 이루어진 방향성 결합기의 완전 결합길이를 구하였다. 단일 도파로에 대해 2차원 모우드 함수를 HEM으로 구하고, 또한 EIM 및 MEIM으로 1차원 근사된 한개의 도파로의 모우드 함수들을 각각 구한 다음, 각 경우에 대하여 모우드결합 이론으로부터 서로 근접한 두 도파로로 이루어진 방향성 결합기의 모우드 커플링 세기를 구하고 다시 이로부터 완전 결합길이를 구하여 서로 비교하였다. 모우드결합 이론에서 방향성결합기의 결합길이는 다음과 같다.

$$L_c = \frac{\pi}{2\kappa} \tag{4}$$

여기서

$$\kappa = \sqrt{\kappa_{12}\kappa_{21}} \quad (5a)$$

$$\kappa_{ij} = \frac{k_o}{2n_{mi}} \frac{\int \phi_i^* \Delta n_j^2 \phi_j dx dy}{\int \phi_i^* \phi_i dx dy} \quad (5b)$$

$$\Delta n_i^2 = n^2(x, y) - n_i^2(x, y) \quad (5c)$$

이며, k_o 는 진공중의 광의 전파상수, n_{mi} 는 두 도파로중 i 번 도파로의 모우드굴절률, ϕ_i 와 $n_i(x, y)$ 는 각각 방향성결합기에서 어느 한쪽 도파로가 없을때 나머지 한쪽 도파로의 도파모우드 분포 및 굴절률 분포이고, $n(x, y)$ 는 양쪽 두 개의 도파로가 모두 있을 때의 굴절률 분포이다.

HEM으로 구한 단일 도파로의 모우드 함수와 모우드결합 이론으로부터 계산한 방향성결합기의 완전 결합길이는 3차원 BPM 계산이나 근접한 두 도파로의 HEM 모우드 계산에 의한 결과와 17 μm 의 오차가 생겼다. 모드결합이론은 그 유도과정에서 다소의 근사과정을 포함하고 있고 오차는 이같은 근사에 의한 것으로 보인다. 지금까지 여러 가지 방법으로 계산된 방향성결합기의 완전 결합길이들을 표 2에 나타내었다.

그림 9는 1차원 근사된 단일 도파로의 모우드 전기장 분포이다. HEM으로 구한 2차원 모우드 함수를 EIM이나 MEIM과 같은 1차원으로 근사된 도파모우드와 비교하기 위하여 HEM으로 구한 모우드 함수를 도파로의 세로축(x축) 중심을 따라서 전기장의 세기의 제곱에 대하여 증가평균하여 이를 y에 대한 1차원함수로 나타내었다. 그림에서도 명백히 알 수 있듯이 전기장의 분포는 MEIM의 경우가 HEM 경우보다 더 구속되어 보이며, 이는 식 (4) 및 (5)에 의해 방향성결합기의 완전 결합길이를 증가시키게 된다. 또한 EIM 경우는 MEIM의 경우와 반대로 HEM 경우보다 덜 구속되어 보이며 이는 방향성결합기의 완전 결합길이를 감소시키게 된다. 이같은 전기장의 비교에 의한 결과는 표 2의 결과와도 완전히 일치하고 있으며 MEIM에 의한 전자기장의 1차원 근사가 EIM에 의한 전자기장의 1차원 근사보다 훨씬 더 HEM 전기장에 근접하고 있음을 알 수 있다. 그림 9에서 EIM의 TE와 TM 그리고 MEIM의 TE와 TM 모우드는 거의 일치하고 있으며 이는 본 계산에서 도파로가 스칼라 파동방정식으로 근사가 가능한 코어-클래드 굴절률 차가 적은 도파로이기 때문이다. 마지막으로 표 1에 제시된 1차원 근사된 도파로의 모우드굴절률에서 HEM으로 구한 모우드굴절률을 빼어 편차를 구하고

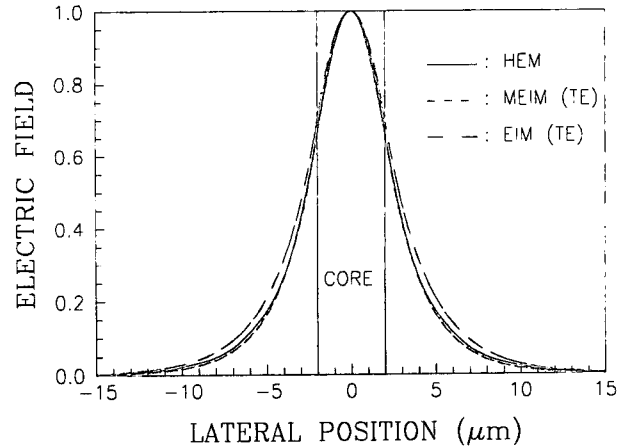


그림 9. 1차원 근사된 도파로의 모우드 전기장 분포.

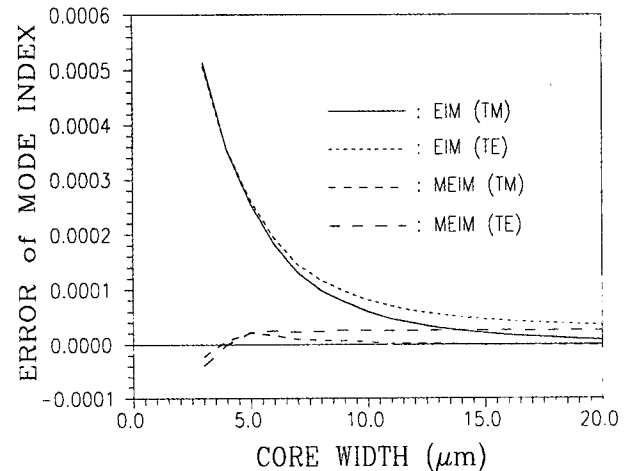


그림 10. 1차원 근사된 도파로의 모우드굴절률 편차. 여기서 편차의 기준은 HEM으로 구한 모우드굴절률임.

이를 그림 10에 나타내었다. 이 그림을 보면 집적광학에서 흔히 쓰이는 코어층의 폭(대략 3~7 μm)영역에서는 MEIM의 근사가 더 정확함을 나타내고 있고 가장 HEM과 잘 일치함을 알 수 있다.

IV 결 론

기존의 유효굴절률법(EIM)을 사용하면 모우드굴절률의

표 2. 방향성 결합기의 계산방법 및 근사방법에 따른 완전 결합길이의 비교(*표시 결과는 조화함수 전개법에 의한 모우드 계산임)

계산법 / 근사	3d BPM 또는 2d mode 계산	완전 결합길이 / 오차 (μm)			
		2d BPM 또는 1d mode 근사 계산			
		수정된 유효굴절률법		유효굴절률법	
		TM	TE	TM	TE
BPM 계산	1154 / 0	1170 / +16	1190 / +36	1028 / -126	1025 / -129
대칭-반대칭 모우드 계산	1154 / 0*	1171 / +17	1172 / +18	1024 / -130	1022 / -132
모드결합이론	1171 / +17*	1182 / +28	1186 / +32	1044 / -110	1043 / -111

계산 오차가 커서 그 결과를 신뢰할 수 없었던 직사각형, 둔덕(ridge), 막대 인가형(strip-loaded), 또는 이와 유사한 모양의 코어를 갖는 채널 광도파로에 대하여 수정된 유효굴절률법(MEIM)을 사용하면 보다 정확한 근사가 가능하여 정확한 모우드굴절률을 구할 수 있음을 보였다. 이 방법은 채널 도파로를 일차원으로 근사시킬때 클래드 영역의 굴절률을 적절한 값으로 약간 낮추어 주면 모우드굴절률이 3차원 채널 도파로의 계산 결과와 크게 차이가 없음을 이용한 것으로서 광속전파법의 도파로 단면 계산과정에 적용할 수 있다. 실례로서 3차원 방향성 결합기의 완전 결합길이를 구하는 문제에 적용하여 보았으며 그 결과 기존의 유효굴절률 방법보다 계산결과가 더 잘 일치하였으며 일반적인 BPM 계산에서 일어날 수 있는 계산오차를 줄일 수 있는 유용한 방법임을 보였다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI-97-2432)의 연구비를 지원받아 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] C. H. Henry and B. H. Verbeek, *J. Lightwave Technol.* **7**, 308 (1989).
- [2] J. E. Goell, *Bell. Syst. Tech. J.* **48**, 2133 (1969).
- [3] Nadir Dagli, *IEEE J. Quant. Electron.* **26**, 98 (1990).
- [4] George V. Eleftheriades, Abbas S. Omar, and Linda P. B. Katehi, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques* **42**, 1896 (1994).
- [5] Y. C. Chung and Nadir Dagli, *IEEE J. Quant. Electron.* **26**, 1335 (1990).
- [6] David Yevick and Bjorn Hermansson, *IEEE J. Quant. Electron.* **26**, 109 (1990).
- [7] Clifford R. Pollock, *Fundamentals of Optoelectronics* (Irwin, Chicago, 1995).
- [8] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory* (Chapman & Hall, London, 1983).
- [9] G. Ronald Hadley, *Opt. Lett.* **16**, 624 (1991).
- [10] 김진승, 이형중, 임기건, 정창섭, 정환재, *한국광학회지* **4**, 90 (1993).
- [11] Ajoy Ghatak and K. thyagrajan, *Optical Electronics* (Cambridge University Press, 1989).

Modification of effective index method for a fast and accurate beam propagating computational analysis of optical waveguide devices in 3-dimensional structure

Han Soo Kim and Hyung Jong Lee

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Young Yun Chun

Institute of Information and Technology Assesment, Taejon 305-600, Korea

Sun Chul Yang

Department of Physics, MokPo National University, Chonnam 534-729, Korea

Jin Seung Kim

School of Physics and Technol., Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

Young Chul Chung

Department of Electronic Communication, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received May 14, 1998, Revised manuscript received January 22, 1999)

We present a new modified effective index method which can be used to analyze lightwave circuit devices in 3-dimensional structure fast and accurately using 2-dimensional BPM (beam propagating method). This method can analyze the devices with the cross-section of rectangular, ridge, or similar shapes accurately but more quickly than the 3-dimensional BPM, which is impractical to use on account of long calculating time. As an example, we showed that the calculation error of coupling length in a directional coupler by this method is significantly less than the 2-dimensional BPM using the effective index method.