《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 13, Number 1, February 2002

자아결상원리의 오차 해석을 통한 다중모드간섭기의 최적화

홍정무 · 오범환† · 이승걸 · 이일항

인하대학교 정보통신공학부

㉾ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

우덕하 · 김선호

한국과학기술연구원 광기술연구센터

㉾ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

(2001년 9월 28일 받음, 2001년 12월 6일 수정본 받음)

다중모드간섭기의 자아결상(Self-Imaging)원리는 다중모드의 전파상수를 근사한 식에서 출발한다. 이러한 근사로 인해 발생하는 위상오차를 최소화하기 위해 기존 방식의 문제와 한계를 고찰하고, 위상오차의 근본적인 해석을 통하여 위상오차의 한계범위 내에 포함되는 모드수를 극대화한 최적 구조를 결정할 수 있었으며, 대표모드를 설정하여 기준으로 삼으면 이에 근접한 결과를 보다 쉽게 얻을 수 있었다. 다중모드간의 위상오차를 효율적으로 줄이는 최적구조를 원리적으로 제대로 구현함으로써, 다중모드간섭을 이용한 소자들 전반에 걸쳐 더욱 향상된 특성을 갖는 소자제작이 가능할 것으로 기대된다.

주제어 : integrated optics/waveguide.

I. 서 론

광 집적회로에서 광 분배 및 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기능 소자로서의 다중모드간섭기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 다중모드간섭을 이용한 소자는 기본적으로 자아결상(SI, Self-Imaging) 원리를 따르며, 이 원리로부터 광 파워 분배 및 기타 다른 응용이 가능하다. 그러나, 자아결상 원리는 전파상수의 근사를 통해서 정립된 원리로서 필연적으로 다중모드 영역에서의 전파모드는 상호간 규칙에 어긋나는 위상오차를 가지게 되고, 이로부터 소자의 성능 개선에 한계를 가지게 된다. 이 위상오차는 모드마다 다르며 다중모드간섭기의 폭이나 굴절률비 등에 의해 그 분포 양상이 변화하므로 이들을 적절히 조정하면 사용될 모드의 위상오차가 최소화될 수 있다. 이러한 위상오차 조절에 있어 간단한 방식의 예로 index contrast를 최적화 하고자 하는 연구가 앞서 Huang *et al.*[2](1998), Rui Yin *et al.*[3](2000) 등에 의해 보고되었다. 통상적으로는 소자의 크기를 줄이거나, 입출력 도파로간의 광 결합을 최소화하기 위해 고굴절률비 구조에 대한 연구가 많이 보고되어 왔으며, 또 고굴절률비 구조에서의 특성이 자아결상 원리에 잘 따를 것으로 기대되어 왔다.[4] 본 논문에서는 자아결상 원리에서 출발하여 위상오차의 근본 특성을 파악하고, 이를 최소화 하기 위해 고려해야 할 변수로서 굴절률비를 선택하여 최적화하였으며, 결과적으로는 다중모드 간섭을 이용한 소자들 전반에 걸쳐 일반적인 성능개선의 가능성을 제시하고자 한다.

†E-mail: obh@inha.ac.kr

II. 자아결상원리에서의 전파상수 근사

다중모드간섭을 이용한 소자에서 그 길이가 길어지면 여러 전파모드간의 단순규칙을 벗어난 위상오차로 인하여 모드간의 위상정합이 잘 이루어지지 못하게 되며, 이로 인해 출력광의 균일도가 나빠지고, 손실도 커지게 된다. 이러한 전파모드간의 위상오차를 최소화하기 위해서는 먼저 모드차수에 따른 위상오차의 명확한 이해가 요구되므로, 간단한 2-D 구조에 대하여 해석적 분석을 시도하였다. 자아결상원리에 대한 식의 전개는 Soldano *et al.*[1]의 논문에 자세히 기술되어 있으며, 여기서는 자아결상 원리의 출발점인 전파상수의 근사식에서 비롯되는 문제점에 대하여 고찰하자.

단순한 평판 구조의 모드전파상수는 전개 기준에 따라 아래와 같이 달리 표현할 수 있다.

$$\beta_v^{exact} = k_0 n_r \sqrt{1 - \frac{\kappa_v^2}{k_0^2 n_r^2}} = k_0 n_c \sqrt{1 + \frac{\gamma_v^2}{k_0^2 n_c^2}} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \kappa_v = \sqrt{k_0^2 n_r^2 - \beta_v^2} \\ \gamma_v = \sqrt{\beta_v^2 - k_0^2 n_c^2} \end{cases}$$

여기서 n_r와 n_c는 각각 코어와 클래딩의 굴절률을 나타내며, 밑첨자 v는 모드의 차수를 의미한다. 또한 κ와 γ는 다중모드 간섭기의 횡 방향에 대한 파수벡터 및 감쇠상수이다. 자아결상을 위해서는 각 전파모드의 규칙성을 알아야 하며, 통상적으로 코어를 기준으로 다음과 같은 두 번의 근사를 통해 규칙성을 갖는 전파상수의 기본식을 이끌어 낸다.

$$\beta_v^{exact}=k_0 n_r-\frac{\kappa_v^2}{2k_0 n_r}-\frac{\kappa_v^4}{(2k_0 n_r)^3}-\cdots \quad (2)$$

근사 1 $\rightarrow$ $$\beta_v^{Tr1}\equiv k_0 n_r-\frac{\kappa_v^2}{2k_0 n_r} \quad (3)$$

근사 2 : $$\kappa_v^2\frac{(v+1)^2\pi^2}{W_{ev}^2}=\frac{(v+1)^2\pi^2}{W_{e0}^2}=(v+1)^2\kappa_0^0$$

$\rightarrow$ $$\beta_v^{SI}\equiv k_0 n_r-\frac{(v+1)^2\kappa_0^2}{2k_0 n_r} \quad (4)$$

코어의 굴절률을 기준으로 식 (2)와 같이 전파상수를 Taylor 전개하여 1차 항까지 고려하면 식 (3)의 근사표현을 얻게 되고, 고차모드의 유효폭이 기본모드의 유효폭과 같다는 근사를 사용하면 식 (4)를 얻으며, 자아결상 규칙이 간단히 설명된다. 이 때, 두 번의 근사과정 1과 2에서 굴절률 차이가 작을수록, 모드 차수가 높을수록 오차가 커지게 되므로, 단순하게는 고굴절률비에서 근사오차가 작아질 것으로 생각할 수 있으나, 모든 도파모드에 대해 오차정도가 다르며 그 경향이 단순하지 않다. 식 (2)에서 Taylor 전개식의 2차항 이상의 합은 음의 값을 가지므로 근사 1을 통한 전파상수는 커지게 된다. 한편 유효폭은 모드차수가 클수록 커지므로 근사과정 2에서 유효폭과 관련된 항은 커지며, 따라서 전파상수는 작아진다. 이로부터 두 근사로 인한 오차가 서로 다른 부호를 가짐을 알 수 있으며, 이들을 상쇄시킴으로써 위상오차를 최소화할 수 있다. 여기서, 잘 알려져 있지 않으나 이러한 상반되는 부호를 가지는 오차성분의 크기를 굴절률이나 간섭기폭을 조정하여 같게 할 수 있다는 점이 이용될 수 있다. 두 오차성분의 크기 자체를 줄이는 데에는 한계가 있으므로, 이들을 적절히 상쇄시키는 것이 보다 효과적이라 할 수 있다.

이때 굴절률차이가 커지면 W_{ev}와 W_{e0}의 차이는 감소하므로 근사 2에 의한 오차가 근사 1에 의한 오차성분에 비해 작아지고, 서로 상쇄되지 못하므로 위상오차가 커진다. 반대로 굴절률차이가 매우 작아지면 W_{ev}와 W_{e0}의 차이가 매우 커져 근사 2에 의한 오차가 근사 1에 의한 오차보다 커지고, 굴절률 차이가 큰 경우와는 반대 부호로 위상오차가 커지게 된다. 따라서 위상오차를 최소화하는 최적굴절률의 선택이 중요하게 되는데, 이를 위해 위상오차의 해석과 더불어 최적굴절률의 결정방법에 대해 살펴보기로 하자.

다중모드간섭기 내에 (M+1) 개의 모드가 존재할 때 모드분포 함수는 아래와 같다.

$$\Psi(x,z)\equiv\sum_{v=0}^{M}c_v\psi_v(x)e^{i(\beta_0-\beta_v)z} \quad (5)$$

c는 입력광에서 각 전파모드로의 여기계수를 나타내며, Ψ는 전파모드의 합수를 나타낸다. 이때, 각 전파모드의 위상은 진행거리 z에 따라 전파상수에 맞게 규칙적으로 변하게 된다. MMI 구현은 SI 근사가 기반이 되므로 전술된 근사 방식의 위상오차를 아래와 같이 나타내자.

$$\Delta\phi_v^{exact}\equiv-[(\beta_v^{exact}-\beta_0^{exact})-(\beta_v^{SI}-\beta_0^{SI})]\cdot L_\pi \quad (6)$$

여기서 위상차는 맥동길이 (L_π)만큼 진행한 경우로 한정하였고,

$$L_\pi\equiv\pi/(\beta_0^{exact}-\beta_1^{exact})\equiv\pi/(\beta_0^{SI}-\beta_1^{SI}) \quad (7)$$

로 정의하였다. 식 (6)으로 표현되는 모든 다중모드의 위상오차가 0이 되는 것이 이상적일 것이나, 실제로는 그렇지 않다. 따라서 이를 가장 효과적으로 줄이는 원칙과 변수조건을 얻고자 다음과 같이 분석하였다.

III. 자아결상원리에서의 위상오차 해석과 최적화

3.1. 최고차 모드에 대한 위상오차 최적화

다중모드간섭기에서 모드간 위상오차를 구하기 위한 기존의 접근방식에서, Huang *et al*[2]은 식 (2)와 같은 전파상수의 Taylor 전개식에서 2차 전개항까지 고려한 아래의 근사 표현 방식(Tr2)을 사용하였다.

$$\beta_v^{Tr2}\equiv k_0 n_r-\frac{\kappa_v^2}{2k_0 n_r}-\frac{\kappa_v^4}{(2k_0 n_r)^3} \quad (8)$$

이 때 얻어지는 Tr2 방식의 위상오차는 아래와 같다.

$$\Delta\phi_v^{Tr2}\equiv[(\beta_0^{Tr2}-\beta_v^{Tr2})-(\beta_0^{SI}-\beta_v^{SI})]\cdot L_\pi \quad (9)$$

한편, Rui Yin *et al*.[3]은 최고차 모드만의 위상오차를 최소화하는 index contrast를 찾고자 하였다. 이는 일반적으로 저차모드 영역보다 고차모드 영역에서 위상오차가 큰 경향을 갖기 때문이다. 고차 모드일수록 그 유효굴절률이 클래딩의 굴절률과 가까우므로, 식 (1)에서 Taylor 전개할 때 클래딩의 굴절률을 기준으로 전개하면 1차 항까지만 고려해도 상당히 정확한 전파상수를 얻으며, 이 Tc1 방식의 최고차 모드(M)에 대한 전파상수는 아래와 같다.

$$\beta_M^{Tc1}\equiv k_0 n_c+\frac{\gamma_M^2}{2k_0 n_c} \quad (10)$$

이 때 얻어지는 Tc1 방식의 위상오차는 아래와 같다.

$$\Delta\phi_M^{Tc1}\equiv[(\beta_0^{Tc1}-\beta_M^{Tc1})-(\beta_0^{SI}-\beta_M^{SI})]\cdot L_\pi$$
$$=\left[\frac{(M+1)^2\pi^2}{2k_0}\left(\frac{1}{n_c W_{eM}^2}-\frac{1}{n_r W_{e0}^2}\right)-\frac{(n_r-n_c)^2 k_0}{2n_c}\right]\cdot L_\pi \quad (11)$$

이러한 두 근사 방식에 의해 얻은 최고차 모드의 위상오차를 클래딩 굴절률의 함수로 나타내어 해석적으로 구한 전파상수로 구한 위상오차와 함께 그림 1에 비교하였다. 광원의 파장은 1.55 μm, 코어의 굴절률은 3.5, 다중모드간섭기의 폭은 40 μm로 하였다.

여기서 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 클수록 위에서 언급된 바와 같이 해석적 위상오차 ($\Delta\phi_M^{exact}$)는 커지는 경향을 보이고 있음에 유의하자. 이러한 경향은 고굴절률비를 갖는 도파로 구조가 SI 근사 원리에 적합하지 않음을 보여준다. 다만,

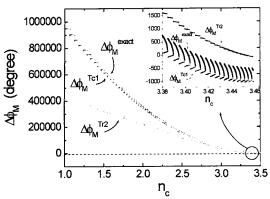

그림 1. 클래딩의 굴절률 변화에 따른 최고차 모드의 위상오차 (MMI width = 40 μm) (삽입그림: 위상오차 = 0 부근에서 위상오차 거동의 확대 비교).

$\Delta\phi_M^{Tr2}$에 비하여 $\Delta\phi_M^{Tc1}$이 대부분의 굴절률에서 해석적 위상오차와 아주 유사하므로, 고차모드의 전파상수 근사는 Tc1 방식이 해석적 수치와 잘 부합됨을 알 수 있다. 또, 최고차 모드만을 고려한다면, 위상오차를 0으로 만드는 클래딩 굴절률 조건도 Tr2 방식(3.45 부근)보다 Tc1 방식(3.39 부근)이 해석적 계산결과(3.4 부근)에 보다 근사한 값을 가지므로, Tc1 방식이 보다 나은 근사방식으로 여겨진다. 여기서 최고차 모드의 위상오차가 0이 되는 클래딩 굴절률이 여러 개 존재하는 것은 클래딩 굴절률이 변하면서 존재 가능한 모드수도 변하므로 최고차 모드의 차수가 변하기 때문이다.

모든 존재 가능한 모드에 대해 위상오차의 경향성을 보기 위해, 각 모드 별로 클래딩 굴절률에 따른 해석적 위상오차 ($\Delta\phi_v^{exact}$)의 변화를 그림 2에 나타내었다.

전술된 바와 같이 최고차 모드의 위상오차를 0으로 만드는 클래딩 굴절률은 3.3943과 3.4095 사이에 각기 다른 차수에 해당하는 5 수치가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이에 존재하는 모드의 개수와 각 모드에 해당하는 위상오차를 쉽게 파악하도록, 해당하는 굴절률을 세로 점선으로 표시하였다. 예로

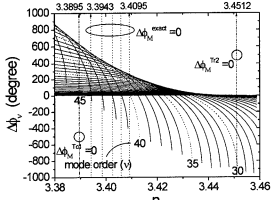

그림 2. 해석적인 전파상수의 해로부터 얻어진 최고차 모드의 위상오차 변화곡선(모드차수를 각 곡선의 생성점 근처에 기록하였고, 거동을 잘 보일 수 있도록 매 다섯째 모드는 점선으로 나타내었다).

써, 3.4095의 클래딩 굴절률에서는 최고차 모드의 차수가 40이고, 그 위상오차는 0이며, 그 외에 35차 모드의 쇄선곡선과의 교점으로부터 그 위상오차는 약 200 가 된다. 한편, 다른 근사방식으로 계산된 위상오차 $\Delta\phi_M^{Tc1}$ 또는 $\Delta\phi_M^{Tr2}$를 0이 되게 하는 조건의 클래딩 굴절률은 각각 일점쇄선과 이점쇄선으로 표시하였다. 이 두 경우 모두 각 모드의 위상오차가 제각기 크고 심지어 최고차 모드조차 그 해석적 위상오차가 0에서 벗어난다. 특히, $\Delta\phi_M^{Tr2}$를 0으로 하는 굴절률 수치 3.4512에서는 그 해석적 위상오차가 매우 커서 이러한 근사방식의 한계를 잘 알 수 있게 한다.

3.2. 위상오차 한계 설정을 통한 최적화

모드차수에 따른 위상오차의 변화경향이 단순하다면, 최고차 모드의 위상오차를 최소화하는 것이 가장 효율적일 수 있으나, 외부 조건의 변화에 따라 그 변화는 단순하지 않다. 여러 조건에 해당하는 클래딩 굴절률 수치에 대해 각 차수의 모드에 대한 위상오차 변화를 그림 3에 나타내었다.

모드차수에 따른 위상오차의 변화는 단순하지 않으므로, 최고차 모드의 위상오차를 최소화하는 것보다는 전체모드를 고려한 최적화 방법이 필요하다. 따라서 위상오차의 유효한 한계범위를 설정하고, 위상오차가 그 한계범위 내에 포함되는 모드(유효모드)가 많도록 최적의 클래딩 굴절률을 정하는 방식의 유효성을 살펴보았다. 그림 3과 같이 굴절률차이가 증가하면서 모드들의 위상오차는 전반적으로 음의 값에서 양의 값으로 변하게 된다. 이러한 변화영역 근처에서 클래딩 굴절률을 변화시키며 10^0의 한계오차범위 내에 포함되는 모드수를 구하였을 때, 3.44의 굴절률에서 유효모드수는 25개로 극대화 되었다. 또, 전술된 바와 같이, $\Delta\phi_M^{Tc1}=0$ 또는 $\Delta\phi_M^{Tr2}=0$인 조건의 클래딩 굴절률에서는 최고차 모드의 위상오차가 0이 아니며 모든 차수의 위상오차는 각기 많이 변화하고 있어 적합한 최적화가 아님을 알 수 있다. 또한, 앞에서 5개 수치를 낸 $\Delta\phi_v^{exact}=0$인 조건의 클래딩 굴절률 중에서 10^0의 위상오차 범위 내에 가장 많은 모드를 포함시키는 조건은 3.4095의 굴절률이므로 이를 택하여 비교하였으나, 13개의 저차모드와 1개의 최고차 모드만이 10^0의 유효범위 내에 포함되어 있어,

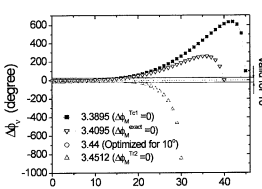

그림 3. 각 최적화 방식에 의한 위상오차의 거동 비교를 위해, 모드차수의 함수로 나타낸 위상오차 변화곡선.

표 1. 한계오차 10° 이내의 위상오차를 갖는 모드개수 비교

	Cladding index	Number of valid mode for 10°
$\Delta\phi_M^{Tc1}=0$	3.3905	12
$\Delta\phi_M^{exact}=0$	3.4095	14
$\Delta\phi_M^{Tc2}=0$	3.4512	17
Optimized index	3.44	25

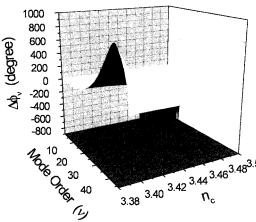

그림 4. 두 변수(모드차수와 클래딩 굴절률)의 함수로서 3차원적으로 나타낸 위상오차 변화거동.

3.44의 굴절률 조건에 비해 열악한 상황임을 보여준다. 이상네 경우의 조건에 대하여 클래딩 굴절률과 한계오차범위 10° 내 모드의 개수를 표 1에 비교하였다.

광분배기 등의 응용에 있어서 일반적으로 고차모드로 갈수록 여기계수가 작아지므로 저차모드의 위상오차를 줄이는 것이 중요한데, 굴절률이 3.44인 조건에서 대부분의 유효한 모드는 저차모드이며, 최고차모드를 고려한 방식의 세 경우에 비하여 저차모드의 위상오차를 매우 효율적으로 줄였음을 확인할 수 있다. 이상으로부터 최고차 모드의 위상오차=0인 조건보다는 한계오차범위 내의 모드수를 많게 하는 조건으로부터 최적 클래딩 굴절률을 정하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

모드차수와 클래딩 굴절률에 따른 위상오차의 변화특성을 종합적으로 그림 4에 나타내었다. 이는 그림 2와 그림 3에 보인 변화특성을 보기 쉽게 나타낸 것이다.

클래딩의 굴절률이 증가함에 따라 존재하는 모드의 수가 이차함수적으로 감소하고 있으며, 코어의 굴절률인 3.5에 근처에서는 당연하게도 0이 되고 있음을 확인할 수 있다. 클래딩 굴절률이 약 3.4 이하인 경우는 모드차수가 증가되면서 위상오차가 증가하다가 극값을 갖고 그 이상 차수의 모드에서 다시 감소하는 경향을 보인다. 한편 3.4 이상의 굴절률에서는 모드차수가 증가함에 따라 위상오차는 음의 값으로 단조 감소하는 경향을 보이는데, 이러한 경향 변화를 겪는 3.4 근처의 클래딩 굴절률을 택하면 모든 모드에 대한 위상오차가 가장 효율적으로 줄어들 것으로 기대되며, 이러한 방식을 "한계오차방식"이라고 정의하였다. 다만, 한계오차범위의 설정에 따라 최적굴절률이 변화할 수 있으므로 이를 알아보는 것이 필요하여, 한계오차범위 설정을 5°, 10°, 15°로 둔 경우에 대해 유효모드

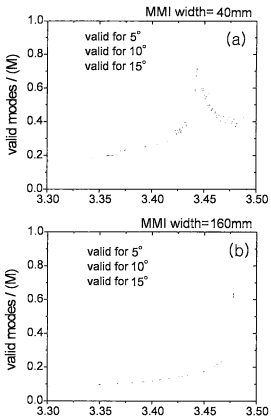

그림 5. 한계오차범위를 5°, 10°, 15°로 제한한 세 가지 경우에 대해 유효모드수 최적화를 위해 (a) MMI 폭이 40 μm일 때 (b) MMI 폭이 160 μm일 때 클래딩 굴절률의 함수로 나타낸 유효모드 개수비율의 변화거동 비교.

수의 비율 변화를 그림 5에 비교하여 나타내었다.

그림 5(a)는 간섭기폭이 40 μm인 경우이고, 그림 5(b)는 간섭기폭이 160 μm인 경우이다. 이 유효모드의 개수 비를 극대화시키는 클래딩 굴절률은 한계오차 범위를 크게 할수록 감소

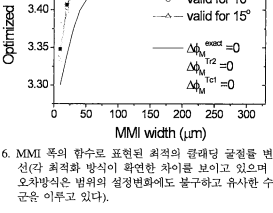

그림 6. MMI 폭의 함수로 표현된 최적의 클래딩 굴절률 변화곡선(각 최적화 방식이 확연한 차이를 보이고 있으며 한계오차방식은 범위의 설정변화에도 불구하고 유사한 수치의 근을 이루고 있다).

하는 경향을 보이며, 40 μm의 간섭기폭에서 5°와 15°에 대한 최적 클래딩 굴절률은 0.005 정도의 차이를 가진다. 이때 간섭기폭을 증가시키면 이러한 한계오차 범위에 따른 최적 클래딩 굴절률의 차이가 감소하며, 160 μm에서는 0.001 이내로 그 차이가 매우 작아짐을 확인할 수 있다. 또한, 간섭기폭이 증가함에 따라 최적 클래딩 굴절률도 다소 증가함을 알 수 있는데, 이러한 변화 경향을 그림 6에 나타내었다.

최고차 모드의 $\Delta\phi_M^{exact}=0$ 또는 $\Delta\phi_M^{Tc1}=0$인 조건으로 위상오차를 조절하는 기존 방식에 따른 클래딩 굴절률의 변화 경향을 함께 나타내어 비교하였는데, 전체모드에 대한 유효모드수로 최적화한 한계오차방식과는 완연히 구분되고 있다. 한계오차방식은 그 한계범위를 다소 바꾸어 최적화 하여도 시로간에는 큰 차이가 없다. 또한, $\Delta\phi_M^{Tc2}=0$인 방식은 한계오차방식과 변화 경향이 유사해 보이나, 간섭기폭이 작을 때 굴절률 차이가 크다.

3.3. 대표모드설정을 통한 최적화

최고차 모드에 의한 최적화는 문제가 있으며, 한계오차방식은 굴절률 최적화에 효과적이나 그 해석이나 적용에 있어 과정이 단순하지 못하다. 이러한 번거로움을 피하기 위해 대표모드 차수를 설정하면 효과적이다. 즉, 대표모드의 차수를 최고 모드차수(M)의 약 3/4으로 두고, 대표모드의 위상오차를 0으로 조절하면 한계오차방식의 최적화와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다. 표 2에는 한계를 5~15°으로 두고 한계오차방식으로 얻은 최적 클래딩 굴절률과 (3/4)*M 차수를 가지는 대표모드에 대해 위상오차를 최소화하는 (대표모드방식) 클래딩 굴절률을 비교하였다. 이때 (3/4)*M의 모드차수에 대한 위상오차가 0이 되는 클래딩 굴절률은 한계오차방식에 의한 결과 범위에 거의 포함되고 있음을 확인할 수 있다. 부수적으로, 코어의 굴절률이 1.5인 경우에 대하여도 표 3에 이들을 정리하여 비교하였으며, 이때에도 마찬가지임을 알 수 있다. 이로부터 일반적으로 대표모드방식은 한계오차방식을 잘 대치할 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 한계오차방식과 대표모드방식의 최적화된 클래딩 굴절률 비교표(n_r = 3.5인 경우)

MMI width (μm)	valid mode for 15°~5°	optimized for order of 3/4*M (M)
10	3.332~3.348	3.346 (12)
20	3.389~3.407	3.403 (20)
40	3.438~3.443	3.439 (33)
80	3.462~3.465	3.462 (53)
160	3.477~3.478	3.476 (84)
320	3.486~3.487	3.485 (133)

표 3. 한계오차방식과 대표모드방식의 최적화된 클래딩 굴절률 비교표(n_r = 1.5인 경우)

MMI width (μm)	valid mode for 15°~5°	optimized for order of 3/4*M (M)
10	1.368~1.383	1.38 (8)
20	1.418~1.428	1.427 (11)
40	1.451~1.455	1.453 (19)
80	1.471~1.473	1.471 (30)
160	1.482~1.483	1.482 (47)
320	1.489~1.49	1.489 (74)

IV. 결 론

다중모드간섭기의 자아결상 원리는 전파상수를 근사하면 그 규칙이 간단히 기술된다. 그러나 전파상수를 근사한 결과로 해석적 전파상수와 차이가 있어 필연적으로 원리상의 단순규칙에서 다소 벗어나는 위상오차를 가지므로 모드간 위상정합이 정확히 이루어지지 못하고 소자특성에 한계를 주게 된다. 이의 개선을 위한 위상정합의 최적화 방법이 연구되었으며, 기존 방식의 최적화에 내포된 한계를 분석하고 위상오차를 재분석하였다. 근사를 통한 위상오차의 해석에 있어서 Tr2 방식의 경우는 고차모드에 대하여 신뢰성이 없으며, Tc1 방식의 경우도 저차모드에 대하여는 급격하게 오차가 증가하였다. 모드차수에 따르는 위상오차의 변화 경향이 단순하지 않으므로, 최고차 모드를 기준으로 위상정합을 이루려는 방식보다는 전체모드를 고려한 위상오차의 최적화가 중요하다는 것을 보였다. 이에, 한계오차범위 내의 유효모드수의 극대화로 변수 최적화를 이루는 한계오차방식을 제안하여 효율적인 최적화 방식임을 보였고, 편의를 위해 대표모드방식을 사용하여도 이를 잘 대치할 수 있음을 보였다. 다중모드간섭을 이용한 파장 다중화 및 편광분리 소자에서는 이러한 위상오차의 정확 설계에 의해 손실 및 균일도가 월등히 개선되므로 더욱 안정적이고 고성능인 소자를 제작하게 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 2001년도 교내 특성화 연구비의 지원으로 수행되었으며, 교육부 두뇌한국 21 사업과 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-302-012-5) 사업의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615-627, 1995.

[2] J. Z. Huang, R. Scarmozzino, and R. M. Osgood, "A New design approach to large input/output-number multimode interference couplers and its application to low-crosstalk WDM routers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1292-1294, 1998.

[3] R. Yin, J. Yang, X. Jiang, J. Li, and M. Wang, "Improved approach to low-loss and high-uniformity MMI devices," *Opt. Comm.*, vol. 181, pp. 317-321, 2000.

[4] J. Z. Huang, M. H. Hu, J. Fujita, R. Scarmozzino, and R. M. Osgood, "High-performance metal-clad multimode interference devices for low-index-contrast material systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 561-563, 1998.

[5] Y. Ma, S. Park, L. Wang, and S. T. Ho, "Ultracompact multimode interference 3-db coupler with strong lateral confinement by deep dry etching," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 492-494, 2000.
[6] P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, and M. K. Smit, "Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 6, pp. 1004-1009, 1995.
[7] M. A. Fardad and M. Fallahi, "Sol-gel multimode interference power splitters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 697-699, 1999.
[8] B. Li, G. Li, E. Liu, Z. Jiang, J. Qin, and X. Wang, "Low-loss 1x2 multimode interference wavelength demultiplexer in silicon-germanium alloy," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 575-577, 1999.
[9] L. Lierstuen and A. Sudbo, "8-channel wavelength division demultiplexer based on multimode interference couplers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 9, pp. 1034-1036, 1995.

The analysis of error characteristics in self-imaging and improved optimization of waveguide structure for multi-mode interference devices

Jung Moo Hong, Beom-hoan O†, Seung Gol Lee, and El-Hang Lee
School of Information and Communication Engineering, INHA University, Incheon 402-751, KOREA
†E-mail: obh@inha.ac.kr

Deokha Woo and Sunho Kim
Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, KOREA

(Received September 28, 2001 ; revised manuscript received December 6, 2001)

Simple principles of self-imaging in Multi-Mode Interference (MMI) devices are based on the approximation of propagation constants. The analysis of the basic nature of the self-imaging principle reveals the problems of previous optimization methods, and provides a new scheme to optimize the external variables for the reconciliation of approximation problems by considering two different tendencies of approximation effects. Furthermore, the representative mode method is proposed to make the application easy. This optimization method provides an essential method for stable design and fabrication of MMI devices with improved characteristics.

Classification code : OE.010.