

論文2000-37SD-10-6

두 개의 영역으로 구성된 매우 짧은 길이를 가지는 융합된 수직 방향성 결합 스위치 설계

(Design of Ultra-short Fused Vertical Coupler Switches Composed of Two Sections)

趙成贊*, 薛鍾哲*, 金富均*

(Sung-Chan Cho, Jong-Chol Seol, and Boo-Gyoun Kim)

요 약

100 μ m 이하의 길이를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 1% 이하의 안쪽 클래딩 (퓨전층)과 도파로 코어의 굴절율 변화에 의하여 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 모두 얻을 수 있음을 보였다. 향상된 결합모드 이론과 beam propagation method를 사용하여 도파로 코어의 굴절율과 안쪽 클래딩의 굴절율과 두께에 따른 cross state와 bar state의 소멸비 계산 결과의 분석을 통하여 융합된 수직 방향성 결합 스위치의 설계 지침을 제시하였다.

Abstract

We show that both cross and bar states with high extinction ratios larger than 30dB can be achieved at the same ends of ultra-short fused vertical directional coupler switches with two sections by changing the refractive indices of cores and inner cladding layers less than 1%. Based on the calculation of extinction ratios of cross state and bar state for various refractive index and thickness of inner cladding layer and core using the improved coupled mode theory and beam propagation method, the guidelines for design to achieve large tolerances in refractive indices of core and inner cladding layer in fused vertical directional coupler switches are presented.

I. 서 론

고속의 광통신망을 구축하기 위해서는 대용량의 광 스위치가 요구된다. 이러한 집적된 대용량의 광 스위치 시스템을 구성하는 단위 스위치는 작은 크기, 작은 손실, 높은 소멸비 등과 같은 특징을 가지고 있어야 한다. 또한 편광에 따른 성능의 변화가 작아야하고 광

집적회로에서 발생하는 손실 보상을 위해 광 증폭기를 집적시킬 수 있어야 한다.

기존의 수평 방향으로 결합되는 도파관(laterally arranged waveguide) 구조를 가지는 방향성 결합기 형태의 스위치는 결합길이가 길며 매우 작은 제작 공차를 가지기 때문에 실제 소자를 제작하는데 매우 어렵다는 단점이 있다^[1]. 웨이퍼 융합(wafer fusion)을 이용한 융합된 수직 방향성 결합기(fused vertical coupler, FVC)는 입력포트와 출력포트를 서로 다른 기판에 만들 수 있어 입력포트와 출력포트를 쉽게 분리할 수 있고, 결합길이가 짧고 제작 공차가 비교적 크기 때문에 많은 연구가 수행되어 왔다. 또한 퓨전층의 조성비와 두께를 임의로 바꾸어 줄 수 있기 때문에 설계시 많은 자유도가 주어진다^[2-4].

* 正會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 본 연구는 정보통신부에서 지원하는 99년도 대학기 초연구지원사업으로 수행되었습니다.

接受日字:2000年3月29日, 수정완료일:2000年8月4日

최근 100 μm 이하의 길이를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 영역 1의 출력단과 영역 2의 출력단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 각각 얻을 수 있음이 보고되었다^[5]. 영역 1과 영역 2의 끝단에서 cross state와 bar state를 각각 독립적으로 얻을 수 있는 소자를 구현하는 것은 매우 어렵다. 따라서 FVC가 스위칭 소자로 쓰이기 위해서는 bar state와 cross state를 소자의 끝단(영역 2의 끝단)에서 얻을 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 두개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 퓨전층과 도파로 코어의 굴절율 변화를 유도하여 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 모두 얻을 수 있음을 보였다. 전달 행렬 방법과 향상된 결합모드 이론을 사용하여 계산을 수행하였으며 그 결과를 beam propagation method(BPM)을 사용하여 계산한 결과와 비교하여 두 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다. 여러 설계 예를 통하여 30dB 이상의 소멸비를 가지며 매우 작은 길이를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치의 설계 지침을 제시하였다.

캐리어 주입에 의하여 변화가능한 굴절율의 값은 1% 이하로 가정하여 계산하였다. Bar state에서 cross state로의 스위치 작용을 유도하기 위하여 안쪽 클래딩 층의 굴절율을 변화시켰으며 30dB 이상의 소멸비를 얻기 위해서 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭을 조절하였다. 안쪽 클래딩 층의 굴절율을 변화시키며 계산한 결과 안쪽 클래딩의 굴절율 값이 클수록 bar state에서 cross state로 전환하는데 필요한 굴절율의 변화가 작아짐을 볼 수 있었다. 스위치 작용 유도를 위한 안쪽 클래딩의 굴절율 변화 값은 안쪽 클래딩의 두께에 관계없이 항상 구현 가능한 굴절율 값 이하의 영역이 존재하는 것을 볼 수 있었다. 안쪽 클래딩의 두께가 작아지면 30dB 이상의 소멸비를 얻기 위한 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭이 증가하고 소자의 길이는 작아진다. 또한 안쪽 클래딩의 두께가 작을수록 30dB 이상의 소멸비를 보이는 코어와 안쪽 클래딩의 굴절율의 공차가 증가한다. 안쪽 클래딩의 두께가 작아 질수록 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭이 실제 구현 가능한 값보다 커지기 시작하는 두께가 존재한다. 이 지점이 30dB 이상의 소멸비를 보

이는 안쪽 클래딩과 코어의 굴절율의 공차가 가장 큰 지점이므로 이 부근에서 소자를 설계하여야 함을 알았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 향상된 결합모드 이론과 BPM을 이용하여 두 영역으로 구성된 FVC에서 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 동시에 얻을 수 있음을 보였다. 또한 여러 설계 예를 통하여 스위치의 최적화 설계 지침을 제시하였다. 마지막으로 3장에서는 결론을 맺었다.

II. 계산 결과 및 스위치 설계지침

그림 1은 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 개념도이다. 계산에 사용된 구조 변수와 물질 변수들은 다음과 같다. 도파로 A와 B의 바깥쪽 클래딩층의 굴절율, n_{ca} , 와 n_{cb} 는 3.17, 두 도파로의 두께는 0.5 μm 그리고 계산은 155 μm 파장에서 수행하였다. TM 모드의 경우는 도파로에 강굴되는 파위의 크기가 TE 모드에 비하여 작기 때문에 결합길이가 더 작다는 특성을 제외하고는 수직결합기의 각 파라메타의 변화에 대한 특성변화가 TE 모드와 비슷하다. 따라서 본 논문에서는 TE 모드에 대하여 결합길이와 소멸비 및 굴절율의 공차에 대한 계산을 수행하였다.

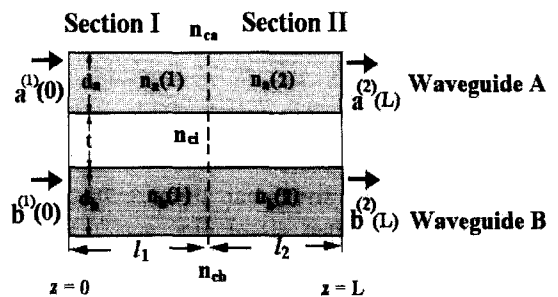


그림 1. 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of fused vertical couplers with two sections.

실제 소자 제작에 사용되는 ridge 도파로와 같은 2차원의 채널 광도파로는 유효굴절율 방법을 사용하여 슬랩 형태의 1차원 광도파로로 단순화 할 수 있으므로 본 논문에서는 1차원 광도파로에 대하여 계산을 수행

하였다^[6]. 그림 1에서와 같이 2개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에 대한 계산을 참고문헌 5에서 제시한 전달행렬 방법과 향상된 결합모드 이론을 사용하여 cross state와 bar state의 소멸비를 계산하였으며 2차원 BPM의 계산 결과와 비교하였다.

도파로 코어와 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화는 모드 분포를 변화시키어 결합길이를 변화시킨다. 참고문헌 5에서 알 수 있듯이 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭 정도를 조절하면 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 얻을 수 있다. 결합길이는 두 도파로 코어의 굴절율 변화보다는 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화 영향을 더 크게 받는다. 따라서 소자의 끝단에서 cross state에서 bar state로 스위칭 작용을 유도하기 위하여 안쪽 클래딩 층의 굴절율에 변화를 주어 결합길이를 변화시키었다.

소자의 길이(=L)를 2배의 결합길이($2l_{c,bar}=L$)가 되게 하여 bar state를 얻고 안쪽 클래딩의 굴절율을 변화시켜 3배의 결합길이($3l_{c,cross}=L$)가 소자의 길이와 같게하여 cross state를 소자의 끝단에서 얻었다. Cross state는 단일 영역 즉, 그림 1에서 $n_a(1) = n_a(2)$ 와 $n_b(1) = n_b(2)$ 로 하고 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭 정도를 조절하여 30dB 이상의 소멸비를 얻었다. Bar state는 $n_a(2) = n_b(2) = n_b(1)$ 가 되게하고 영역 1의 두 도파로 코어 굴절율의 비대칭 정도를 조절하여 30dB 이상의 높은 소멸비를 가지도록 하였다^[5].

위에서 설명한 것과 같은 방법으로 스위칭 소자의 설계를 위하여 다음과 같은 순서로 계산을 수행하였다.

(1) $n_b(1) = n_a(2) = n_b(2) = 3.37$ 인 두 개의 영역으로 구성된 FVC에서 최대의 bar state 소멸비를 가지도록 하는 $n_a(1)$ 의 값에 대하여 안쪽 클래딩 층의 함수로 각 영역의 결합길이를 계산하여 bar state의 소자길이($L = l_{c,1} + l_{c,2}$)를 결정한다.

(2) $n_b = 3.37$ 인 단일 영역으로 구성된 FVC에서 최대의 cross state 소멸비를 가지도록 하는 n_a 의 값에 대하여 안쪽 클래딩 층의 함수로 결합길이를 계산하여 cross state의 소자의 길이($L = 3l_{c,cross}$)를 결정한다.

(3) Bar state일 때와 cross state일 때의 안쪽 클래딩의 굴절율의 차이가 캐리어 주입에 의하여 변화 가능한 굴절율 값(1%) 이하인 영역을 찾는다.

(4) 3에서 찾은 범위 내에서 30dB 이상의 bar

state와 cross state 소멸비를 가지기 위하여 요구되는 두 도파로 사이의 굴절율의 비대칭의 크기가 캐리어 주입에 의하여 가능한 범위를 찾는다.

(5) 과정 1과 2에서의 계산 결과를 바탕으로 bar state일 때와 cross state일 때 소자의 길이를 정확하게 일치시킨다. 이때 안쪽 클래딩의 굴절율과 함께 30dB 이상의 소멸비를 가지도록 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭을 조절한다.

그림 2는 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 일 때 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 함수로 계산한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 bar state의 소자길이($\approx 2lc$)와 cross state의 소자길이($=3lc'$)이다. 그림 2에서 안쪽 클래딩의 굴절율 값이 클수록 bar state에서 cross state로 전환하는데 필요한 굴절율의 변화가 작아짐을 볼 수 있다. 안쪽 클래딩의 굴절율이 커지면 이곳에 존재하는 파위의 크기가 커진다. 따라서 안쪽 클래딩 층의 굴절율이 큰 경우가 작은 경우보다 같은 굴절율의 값 변화에 대하여 모드의 전파상수 크기의 변화가 크기 때문에 안쪽 클래딩 층의 굴절율이 클수록 스위칭 작용을 유도하기 위한 굴절율의 변화가 작다.

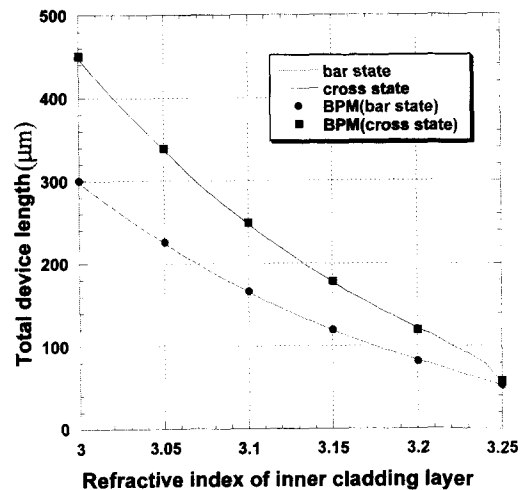


그림 2. 안쪽 클래딩층의 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 일 때 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 함수로 계산한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 bar state일 때의 소자길이($\approx 2lc$)와 cross state일 때의 소자길이($=3lc'$)

Fig. 2. Device length for bar state and cross state with high extinction ratios larger than 30dB calculated as a function of the refractive index of inner cladding layer when the thickness of inner cladding layer is $0.6\mu\text{m}$.

그림 3은 그림 2에서 스위치 작용을 유도하기 위한 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화 범위가 1%이내에 있는 영역을 자세하게 도시한 그림이다. 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 값이 3.21 이상이면 100 μm 이하의 소자길이를 스위치를 설계할 수 있음을 볼 수 있다.

30dB 이상의 소멸비를 얻기 위해서는 두 도파로 코어 사이의 굴절율 값의 비대칭을 조절하여야 하므로 이러한 값도 실제구현 가능한 범위에 있는지도 고려되어야 한다. 따라서 안쪽 클래딩의 굴절율 값이 3.25 이상이 되면 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위하여 도파로 코어의 굴절율을 0.03 이상 변화시켜야 하므로 실제 구현이 불가능하다. 따라서 30dB 이상의 높은 소멸비를 가지는 스위치를 구현하기 위하여 두 state 간의 이동시 필요한 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화와 코어 굴절율의 변화를 1% 이하로 제한하는 경우 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 값은 3.21과 3.25 사이의 값으로 설정하여야 하는 것을 알았다.

스위치 소자의 설계 지침을 얻기 위하여 그림 3에서 표시된 세 경우에 대하여 소멸비와 결합길이를 계산하였으며 세 경우에 대한 공차를 각각 비교하였다.

그림 3에서 표시한 것과 같이 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화

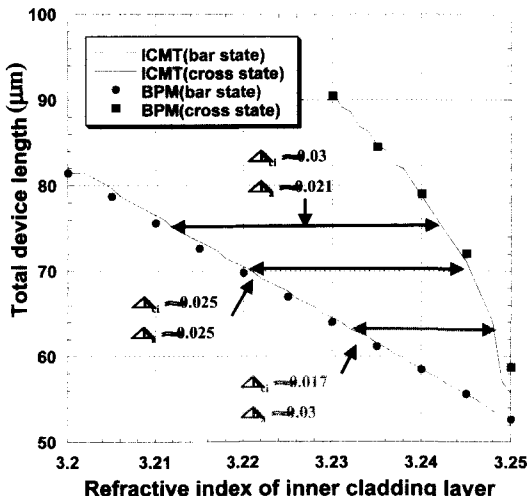


그림 3. 그림 2에서 스위치 작용을 유도하기 위한 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화 범위가 1%이내에 있는 영역에서 cross state와 bar state일 때의 소자 길이

Fig. 3. Details of Fig. 2 in which the change in refractive index of inner cladding layer required for switching operation is less than 1%.

가 실제 구현 가능한 범위내에서 가장 큰 값인 $\Delta n_{ci} \approx 0.03$ 일 때, Δn_{ci} 와 cross state 일 때 최대의 소멸비를 보이는 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭 Δn_a 이 0.025로 같은 값일 때, 그리고 Δn_a 가 캐리어 주입에 의하여 가능한 최대값인 0.03일 때에 대한 계산을 수행하였다.

그림 4의 (a)와 (b)는 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율 변화, $\Delta n_{ci} = n_{ci, cross} - n_{ci, bar}$, 가 0.03 일 때 각각 cross state와 bar state를 얻기 위한 각 층의 굴절율, 소자길이 그리고 소멸비에 대한 계산 결과이다. Cross state에서 최대의 소멸비를 보이는 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭 값은 $\Delta n_{asy, cross} = n_{b, cross} - n_{a, cross} = 0.021$ 이고, bar state의 경우 최대의 소멸비를 가지기 위한 영역 1에서의 두 도파로 코어의 굴절율의 차이는 $\Delta n_{bar} = n_{b, bar}(1) - n_{a, bar}(1) = 0.008$ 이다. 안쪽 클래딩의 굴절율이 클수록 도파로 코어에 강급되는 파워는

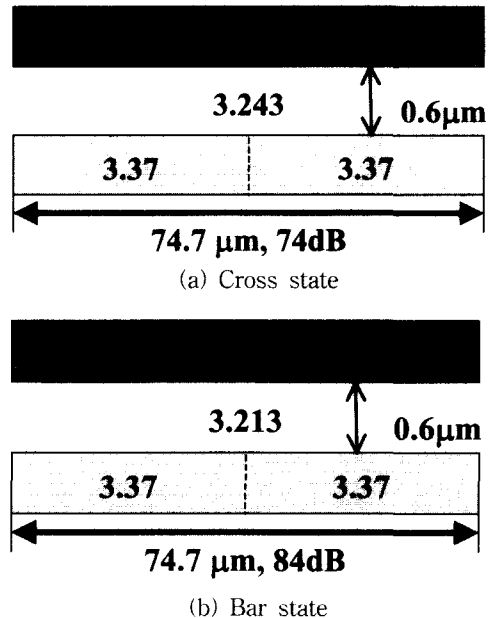


그림 4. 스위치 작용을 유도하기 위해 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율 변화가 0.03일 때 (a) cross state와 (b) bar state를 얻기 위한 각 층의 굴절율, 소자길이 그리고 소멸비

Fig. 4. Refractive indices of each layer, device lengths and extinction ratios for (a) cross state and (b) bar state when the change in refractive index of inner cladding layer required for switching operation is 0.03.

작아지고 안쪽 클래딩에 존재하는 파워는 증가한다. 그러므로 모드에 같은 perturbation을 주기위해서는 안쪽 클래딩의 굴절율이 클수록 도파로 코어의 굴절율에 큰 변화를 주어야 한다. 즉, 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭은 강하게 결합된 도파로 구조일수록 큰 값이 요구된다. 위의 경우 bar state인 경우보다 cross state 일때의 안쪽 클래딩의 굴절율 값이 크므로 도파로 코어 굴절율의 구현 가능한 비대칭에 대한 제약은 cross state의 것이 결정한다.

30dB 이상의 소멸비를 얻을수 있는 cross state와 bar state의 공차는 다음과 같다. Cross state의 경우 결합길이에서 30dB이상의 cross state 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩의 굴절율과 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭의 변화 범위는 최대 소멸비를 보이는 도파로의 굴절율을 중심으로 $\delta n_{ci} |_{>30dB} = 0.0049$ 이고, $\delta n_{cl} |_{>30dB} = 0.0046$ 이다. Bar state의 경우는 30dB이상의 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩의 굴절율과 영역 1에서의 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭은 최대 소멸비를 값을 중심으로 각각 $\delta n_a(2) |_{>30dB} \approx 0.002$ 이고, $\delta n_{cl} |_{>30dB} \approx 0.0106$ 이다.

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율 변화, $\Delta n_{ci} = n_{ci, cross} - n_{ci, bar}$, 와 코어의 굴절율의 변화가 0.025로 같을 때 cross state와 bar state에 대한 각 층의 굴절율, 소자길이 그리고 소멸비에 대한 계산 결과이다. 그림 4의 경우 보다 안쪽 클래딩의 굴절율이 커 두 도파로가 강하게 결합되어 있으므로 cross state에서 최대 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어 사이의 굴절율 차이 $\Delta n_{a, cross} = n_{b, cross} - n_{a, cross} = 0.025$ 로 굴절율의 비대칭이 크게 요구되는 것을 볼 수 있다. 같은 이유에서 bar state의 경우 최대 소멸비를 가지기 위한 영역 1에서의 두 도파로 코어의 굴절율의 차이는 $\Delta n_{bar} = n_{b, bar}(1) - n_{a, bar}(1) = 0.009$ 로 그림 4에 비하여 약간 증가하는 것을 볼 수 있다.

앞에서 설명하였듯이 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 cross state와 bar state의 두 도파로 코어의 굴절율의 공차는 두 도파로가 강하게 결합될수록 커진다. 그러나 두 도파로가 강하게 결합되면 안쪽 클래딩 층에 존재하는 파워가 커지기 때문에 안쪽 클래딩층의 굴절율의 변화에 모드의 전파상수의 변화가 더

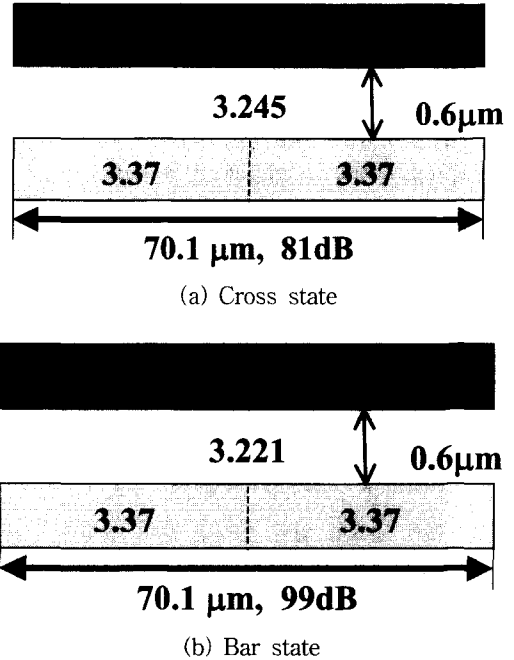


그림 5. 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율 변화와 코어의 굴절율 변화가 0.025로 같을 때 (a) cross state와 (b) bar state에 대한 각 층의 굴절율, 소자길이 그리고 소멸비

Fig. 5. Refractive indices of each layer, device lengths and extinction ratios for (a) cross state and (b) bar state when the change in refractive index of inner cladding layer and that of core required for switching operation is equal to as 0.025.

커지므로 안쪽 클래딩 층에 대한 공차는 작아진다. 따라서 그림 4의 경우와 비교 하면 cross state의 경우 결합길이에서 30dB이상의 소멸비를 보이는 두 도파로의 비대칭은 $\delta n_a(1) |_{>30dB} = 0.0065$ 로 커지고, 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 공차는 $\delta n_{ci} |_{>30dB} = 0.0041$ 로 작아지는 것을 볼 수 있다. Bar state의 경우도 같은 경향을 보이는 것을 볼 수 있으며 30dB이상의 소멸비를 가지는 두 도파로의 굴절율의 비대칭과 안쪽 클래딩의 공차는 최대 소멸비를 보이는 값을 중심으로 각각 $\delta n_a(2) |_{>30dB} \approx 0.0022$ 이고, $\delta n_{ci} |_{>30dB} \approx 0.0092$ 이다.

그림 6은 스위칭 작용을 유도하기 위하여 필요한 코어의 굴절율의 변화가 0.03일 때 cross state와 bar state에 대한 각 층의 굴절율, 소자길이 그리고 소멸비이다. 그림 6에서 cross state에서 bar state로 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩

층의 굴절율 변화는 $\Delta n_{ci} = n_{ci, cross} - n_{ci, bar} = 0.017$ 로 세 경우 중 가장 작다. 앞의 두 경우 보다 강하게 두 도파로가 결합된 구조이므로 cross state와 bar state의 최대 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭은 각각 $\Delta n_{asy, cross} = n_{b, cross} - n_{a, cross} = 0.03$ 과 $\Delta n_{bar} = n_{b, bar}(1) - n_{a, bar}(1) = 0.012$ 로 증가한 것을 볼 수 있다. 그러므로 cross state와 bar state의 도파로 A의 최대 굴절율 차이 $\Delta n_{a, max} = n_{a, bar}(2) - n_{a, cross} = 0.03$ 으로 증가하였다.

앞의 두 경우보다 강하게 결합된 구조이므로 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 cross state와 bar state의 코어의 굴절율의 공차는 각각 $\delta n_a(1)|_{>30dB} = 0.014$ 와 $\delta n_a(2)|_{>30dB} = 0.0025$ 로 증가한 것을 볼 수 있다. 반면 cross state와 bar state에 대한 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 공차, $\delta n_{cl}|_{>30dB}$,는 각각 0.0035와 0.0074로 가장 작은 것을 확인 할 수 있다.

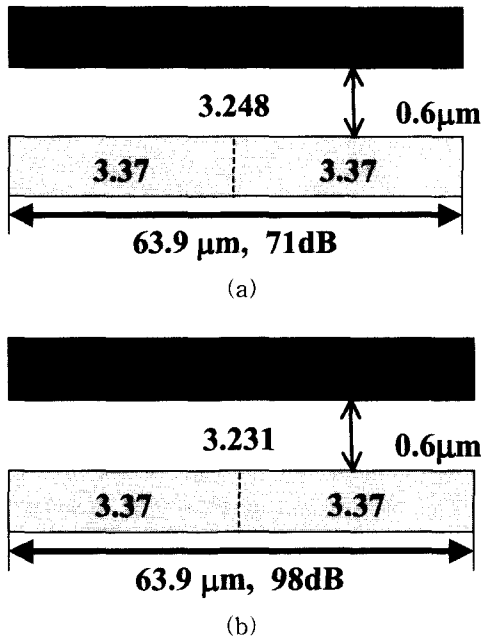


그림 6. 스위칭 작용을 유도하기 위하여 필요한 코어의 굴절율의 변화가 0.03일 때의 (a) cross state와 (b) bar state에 대한 각 층의 굴절율, 소자 길이 그리고 소멸비

Fig. 6. Refractive indices of each layer, device lengths and extinction ratios of (a) cross state and (b) bar state when the change in the refractive index of core required for switching operation is 0.03.

FVC의 경우 안쪽 클래딩층의 두께가 커지면 결합 길이가 길어지고, 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어사이의 굴절율의 비대칭이 작아진다. 그러나 30dB 이상의 소멸비를 보이는 도파로 코어의 굴절율의 공차가 작아진다^[2, 4]. 본 논문에서는 안쪽 클래딩 층의 굴절율 변화에 의하여 스위칭 작용을 유도하였다. 그러므로 안쪽 클래딩층의 두께는 스위치 특성에 큰 영향을 미치는 것을 예측할 수 있으므로 안쪽 클래딩층의 두께를 달리하여 계산을 수행하였다.

그림 7은 안쪽 클래딩의 두께가 0.7μm일 때 안쪽 클래딩 층의 굴절율 함수로 계산한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 bar state의 소자길이(=2lc)와 cross state의 소자길이(=3lc') 중에서 스위치 작용을 유도하기 위한 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화 범위가 1%이내에 있는 영역을 자세하게 도시한 그림이다. 안쪽 클래딩 층의 두께가 0.6μm인 경우와 비교하면, 같은 안쪽 클래딩 층의 굴절율 값에서 안쪽 클래딩의 두께가 증가하여 약하게 결합된 도파로 구조이므로 결합길이가 길어졌으며 30dB 이상의 소멸비를 가지는 두 state 사이의 스위칭시 필요한 코어의 굴절율의 변화가 크게 감소한 것을 볼 수 있다.

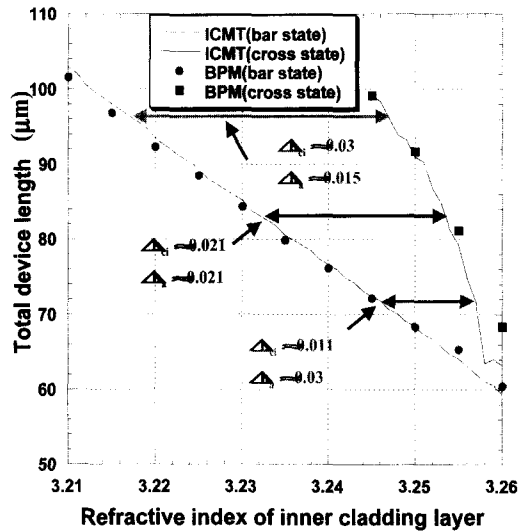


그림 7. 안쪽 클래딩의 두께가 0.7μm일 때 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 함수로 계산한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 bar state일 때의 소자길이(=2lc)와 cross state일 때의 소자길이(=3lc')

Fig. 7. Device length for bar state and cross state with high extinction ratios larger than 30dB calculated as a function of the refractive index of inner cladding layer when the thickness of inner cladding layer is 0.7μm.

안쪽 클래딩 층의 굴절율을 변화시키지 않고 두 도파로 코어의 굴절율의 변화에 의하여 결합 길이를 변화시켜 스위칭 작용을 유도하는 경우 두 코어 사이의 간격을 넓게하여 두 도파로 모드간의 결합계수를 작게하면 소자의 길이(결합길이)가 길어지며 스위치 작용을 유도하기 위한 두 도파로 코어의 굴절율 변화의 값이 작아진다. 또한 본 논문에서 고려한 방법과 같이 두 도파로 코어의 굴절율의 변화는 높은 소멸비를 얻는데 이용하고 안쪽 클래딩 층의 굴절율을 변화시켜 스위칭 작용을 유도하는 경우 그림 3과 그림 7의 비교를 통하여 볼 수 있듯이 스위칭 작용을 유도하기 위하여 필요한 같은 Δn_{ci} 의 값에 대하여 안쪽 클래딩의 두께가 큰 경우 소자의 길이가 더 길어지는 것을 볼 수 있다. 즉 Δn_{ci} 가 0.03 일 때 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 인 경우 소자의 길이가 $75\mu\text{m}$ 이었으나 $0.7\mu\text{m}$ 인 경우는 $96\mu\text{m}$ 로 증가한다. 그러나 안쪽 클래딩의 굴절율이 3.22일 때 스위칭 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화값은 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6\mu\text{m}$ 인 경우는 0.025였으나 $0.7\mu\text{m}$ 인 경우는 0.028로 커졌다. 이러한 현상은 스위치 소자의 길이는 길어졌지만 두 도파로 코어의 간격이 커지면서 두 도파로 모드간의 결합계수가 작아져 스위칭 작용을 유도하기 위하여 필요한 안쪽 클래딩의 굴절율 변화값이 증가하는 것에 기인한다.

안쪽 클래딩의 두께가 스위치 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화 Δn_{ci} 와 높은 소멸비를 보이는 두 코어의 굴절율의 비대칭 값 Δn_a 에 영향을 준다. 그러나 Δn_{ci} 는 안쪽 클래딩의 두께에 관계없이 구현 가능한 값이 항상 존재한다. 또한 안쪽 클래딩의 두께가 $0.5\mu\text{m}$ 이하가 되면 Δn_a 는 실제 구현 가능한 값인 0.03 보다 커지므로 설계시 주의하여야 한다. 표 1은 스위치 작용을 유도하기 위하여 필요한 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화 값, Δn_{ci} , 이 0.03일 때, Δn_{ci} 와 스위칭 작용을 유도하기 위하여 필요한 코어의 굴절율 변화 Δn_a 가 같은 값을 가질 때, 그리고 Δn_a 가 캐리어 주입에 의하여 가능한 최대값인 0.03인 세 가지 경우에 대하여 안쪽 클래딩의 두께를 다르게 하여 계산한 30dB 이상의 cross state와 bar state 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩의 굴절율과 도파로 코어 굴절율의 공차에 대한 계산 결과이다.

표 1 스위치 작용을 유도하기 위하여 필요한 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화 값, Δn_{ci} , 이 0.03일 때, Δn_{ci} 와 cross state 일 때 최대의 소멸비를 보이는 두 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭 Δn_a 이 0.025로 같은 값일 때, 그리고 Δn_a 가 캐리어 주입에 의하여 가능한 최대값인 0.03인 세 가지 경우에 대하여 안쪽 클래딩의 두께를 다르게 하여 계산한 30dB 이상의 cross state와 bar state 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩의 굴절율과 도파로 코어 굴절율의 공차.

Table 1. Tolerance in refractive indices of inner cladding and core for the cases in which $\Delta n_{ci} = 0.03$, $\Delta n_{ci} = \Delta n_a$, and $\Delta n_a = 0.03$ when the thickness of inner cladding are 0.5, 0.6, and $0.7\mu\text{m}$, respectively.

	$t[\mu\text{m}]$	$\Delta n_{ci} = 0.03$	$\Delta n_{ci} = \Delta n_a$	$\Delta n_a = 0.03$
$\delta n_{ci}(1) _{>30\text{dB}}$	0.5	0.0029		
	0.6	0.0019	0.0021	0.0026
	0.7	0.0015	0.0016	0.0026
$\delta n_{ci}(1) _{>30\text{dB}}$	0.5	0.0047		
	0.6	0.0046	0.004	0.0035
	0.7	0.0046	0.0037	0.003

Bar state인 경우가 cross state인 경우보다 안쪽 클래딩의 굴절율이 작으므로 안쪽 클래딩에 대한 공차는 후자가 더 작으나 두 도파로 코어에 대한 공차는 전자가 더 작다. 따라서 표 1에서 안쪽 클래딩에 대한 공차는 cross state에 대한 것이고 도파로 코어에 대한 공차는 bar state에 대한 것이다. 표 1에서 볼 수 있듯이 두 공차가 각각의 경우에 대하여 두께가 감소할수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 안쪽 클래딩의 두께가 $0.5\mu\text{m}$ 인 경우는 $\Delta n_{ci}=0.03$ 인 안쪽 클래딩의 굴절율의 값과 $\Delta n_a=0.03$ 인 안쪽 클래딩의 굴절율 값이 거의 일치하였다. 따라서 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 안쪽 클래딩과 코어의 굴절율의 공차를 크게 하기 위해서는 안쪽 클래딩의 두께를 $0.5\mu\text{m}$ 로 하여 설계하여야 함을 알 수 있었다.

안쪽 클래딩의 굴절율을 변화시켜 스위치 작용을 유도하고 도파로 코어 사이의 굴절율의 비대칭을 이용하여 30dB 이상의 높은 소멸비를 얻기 위한 지금까지 스위치 설계를 위한 계산 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 안쪽 클래딩의 굴절율이 클수록 소자의 길이는 작아지며 스위칭 작용을 유도하기 위하여 요구되는 안쪽 클래딩의 굴절율의 변화는 작다.

(2) 안쪽 클래딩의 굴절율이 클수록 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭이 증가한다.

(3) 안쪽 클래딩의 굴절율이 커질수록 $\delta n_{ca}(1)_{>30dB}$ 는 증가하고 $\delta n_{ca}(1)_{>30dB}$ 는 감소한다.

(4) 안쪽 클래딩의 두께(두 도파로 코어 사이의 간격)가 작아질수록 같은 안쪽 클래딩의 굴절율 값에 대하여 소자의 길이는 작아지며 또한 스위칭 작용을 유도하기 위한 안쪽 클래딩 층의 굴절율의 변화값은 감소한다.

(5) 안쪽 클래딩의 두께가 작아질수록 스위칭 작용을 유도하기 위한 코어의 굴절율의 변화가 증가하여 0.5 μm 이하가 되면 0.03 이상이 되어 소자 구현이 매우 어렵다.

(6) 안쪽 클래딩의 두께가 작아질수록 30dB 이상의 소멸비를 보이는 코어의 굴절율의 공차는 커진다.

(7) 안쪽 클래딩의 두께가 작아질수록 30dB 이상의 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩의 굴절율의 공차는 증가한다.

스위치 소자를 설계하기 위한 설계지침은 다음과 같다. 스위치 작용 유도를 위한 안쪽 클래딩의 굴절율 변화 값은 안쪽 클래딩의 두께에 관계없이 항상 변화 가능한 범위를 설정할 수 있다. 안쪽 클래딩의 두께가 작아 질수록 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭이 증가하여 실제 구현 가능한 값보다 커지기 시작하는 두께가 존재한다. 이 지점이 30dB 이상의 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩과 코어의 굴절율의 공차가 가장 큰 지점이므로 이 부근에서 소자를 설계하여야 함을 알았다.

IV. 결 론

100 μm 이하의 길이를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 안쪽 클래딩 (퓨전층)과

도파로 코어의 굴절율 변화를 유도하여 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 모두 얻을 수 있음을 보였다.

안쪽 클래딩의 굴절율 값이 클수록 bar state에서 cross state로 전환하는데 필요한 안쪽 클래딩의 굴절율 변화가 작아짐을 볼 수 있었다. 스위치 작용 유도를 위한 안쪽 클래딩의 굴절율 변화 값은 안쪽 클래딩의 두께에 관계없이 항상 구현 가능한 범위를 설정할 수 있었다. 안쪽 클래딩의 두께가 감소할수록 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 안쪽 클래딩과 코어의 굴절율 공차가 증가한다. 그러나 안쪽 클래딩의 두께가 작아 질수록 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 두 도파로 코어의 굴절율의 비대칭이 증가하여 실제 구현 가능한 값보다 커지기 시작하는 두께가 존재한다. 이 지점이 구현 가능한 굴절율의 변화 범위 내에서 30dB 이상의 소멸비를 보이는 안쪽 클래딩과 코어의 굴절율의 공차가 가장 큰 지점이므로 이 부근에서 소자를 설계하여야 함을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] J. E. Zucker, K. L. Jones, M. G. Young, B. I. Miller, and U. Koren, "Compact directional coupler switches using quantum well electrorefraction," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, no. 22, pp. 2280-2282, 1989.
- [2] Boo-Gyoun Kim, Ali Shakouri, Bin Liu and John E. Bowers, "Improved Extinction Ratio in Ultra Short Directional Couplers Using Asymmetric Structures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 8A, pp. L930-L932, 1998.
- [3] Ali Shakouri, Bin Liu, Boo-Gyoun Kim, Patrick Abraham, Andrew W. Jackson, Arthur C. Gossard, and John E. Bowers, "Wafer-Fused Optoelectronics for Switching," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2236-2242, 1998.
- [4] Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham, Y. J. Chiu, S. Zhang, and John E. Bowers, "Fused InP-GaAs Vertical Coupler Filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, No. 1, pp. 93-95, 1999.

- [5] 조성찬, 설종철, 김부근, “매우 짧은 길이와 높은 소멸비를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 설계,” *대한전자공학회논문지D편*, 제36권, 9호, 822~828쪽, 1999

 저 자 소 개

趙 成 贊(正會員) 第34卷 D編 第7號 104쪽 參照

1991년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1993년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 8월 숭실대학교 전자공학과 공학박사. 주관심분야 : 광소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

薛 鍾 哲(正會員) 第36卷 D編 第9號 828쪽 參照

1997년 2월 숭실대학교 물리학과 이학사. 2000년 2월 숭실대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 2000년 2월~현재 삼성전자 정보통신총괄 광전자사업팀 연구원. 주관심 분야 : 광소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

金 富 均(正會員) 第32卷 A編 第3號 57쪽 參照

1979년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1981년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 University of Southern California 공학 박사. 1993년 6월~8월 IBM Almaden 연구소 방문연구원. 1997년 2월~1998년 2월 University of California at Santa Barbara 방문 교수. 1981년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수. 주관심분야 : 광통신 및 광네트워크용 소자, 광통신 시스템 및 광네트워크 등임