

수직 방향성 결합기 스위치의 안쪽 클래딩 두께에 따른 특성 변화에 대한 연구

정병민* (1), 조성찬 (2), 김부균 (1)

(1) 숭실대학교 정보통신전자공학부

(2) 전자통신연구원 광라우팅연구부 광패킷교환팀

전화 : 02-813-1596 / 핸드폰 : 016-289-3482

A study of characteristics of Fused Vertical Coupler Switch versus the thickness of inner cladding layer

Byung-Min Jung* (1), Sung-Chan Cho (2), and Boo-Gyoun Kim (1)

(1) School of Electronic Engineering, SoongSil University, Seoul 156-743, Korea

(2) Optical Packet Switch Team, ETRI, Taejon 305-350, Korea

E-mail : dongcare@sunbee.soongsil.ac.kr

Abstract

We have studied the fabrication tolerance of a fused vertical coupler switch with switching operation induced section and extinction ratio enhanced section to obtain more than 30dB extinction ratio for both cross and bar states with less than 500 μm device length for various thicknesses of inner cladding layer.

I. 서론

인터넷 이용자수의 폭발적인 증가는 전송하고 처리해야하는 정보용량을 폭발적으로 증가시키고 있다. 이러한 폭발적인 정보용량을 처리하고 전송하기 위하여 광통신 시스템은 최근에 큰 발전을 이루어왔다. 그러나 아직도 스위칭 부분에 있어서는 기존의 전자소자에 의존하고있기 때문에 광통신 시스템의 전송 속도를 제한하는 원인이 되고있다.

이러한 문제점의 해결방안 중 하나는 광 스위칭 시스템의 구현이다. 이러한 광 스위칭 시스템을 구현하기 위하여 필요한 광 스위칭 소자가 가져야 될 조건은 작은 크기, 작은 손실 그리고 높은 소멸비(extinction ratio) 등의 특성을 가지고 있어야 한다. 또한 편광(polarization)에 따른 성능 변화가 작아야 하고 입력단과 출력단에서 광섬유와의 결합이 용이해야 하며 스위칭 시스템에서 발생하는 손실을 보상할 수 있기 위하여 반도체 광 증폭기와의 집적이 용이해야한다.

위와 같은 조건을 만족하는 광 스위칭 소자를 구현하기에 가장 적합한 구조는 방향성 결합기(directional coupler)라 할 수 있다. 이러한 방향성 결합기형 스위치는 스위칭을 일으키는 데 요구되는 굴절률 변화가 다른 구조의 스위치에 비해 작아 많은 연구가 진행되었다. 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]. 반면에 웨이퍼 융합 (wafer fusion)을 이용하여 융합된 수직 방향성 결합기 (fused vertical coupler, FVC)를 제작할 경우 입력단과 출력단의 각 포트들을 광섬유와 결합이 용이하도록 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 설계 시 많은 자유도가 주어진다[2].

최근 500 μm 이하의 길이를 가지며 스위칭 동작 유도 영역 (switching operation induced section, SOIS)과 소멸비 향상 영역 (extinction ratio enhanced section, ERES)으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 안쪽 클래딩의 굴절률 변화 없이 도파로 코어의 굴절률 변화만으로 크로스 상태와 바 상태에서 모두 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 수직 방향성 결합기스위치 (fused vertical coupler switch, FVCS)가 제안되었다[3]. 제안된 구조가 참고문헌 [4]의 스위칭 소자에 비하여 길이가 약 5배 길지만 이는 N×N 스위치로 집적화 할 경우 단위 스위치간의 분리와 각 단간의 분리에 요구되는 길이가 이에 비하여 매우 크기 때문에 큰 고려의 대상이 되지 않는다고 생각된다.

본 논문에서는 위와 같은 구조에서 안쪽 클래딩 (퓨전층)의 두께 변화에 따른 제작 공차와 코어 굴절률에 따른 비대칭 등과 같은 소자 특성의 변화에 대하여 보고하고자 한다.

전달 행렬 방법과 향상된 결합모드 이론을 사용하여 계산을 수행하였다.

II. 스위칭 동 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기

참고문헌 [4]와 [5]의 계산 결과에 대한 분석으로부터 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 한 단은 두 코어가 같은 굴절률 값을 가지는 대칭형 결합기 (symmetric

coupler)로 다른 한 단은 두 코어의 굴절율 값이 다른 비대칭형 결합기 (asymmetric coupler)의 조합에 의하여 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 크로스 상태와 바 상태를 얻을 수 있음을 알았다.

강하게 결합된 대칭형 수직 방향성 결합기의 경우 크로스 상태와 바 상태의 소멸비는 보통 13 dB에서 18 dB의 값을 가진다. 영역 1의 대칭형 결합기가 이러한 소멸비를 가지는 경우 영역 2에서 코어 굴절율의 비대칭의 크기를 조절하여 크로스 상태와 바 상태 모두 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있다[5]. 따라서 스위칭 동작과 소멸비 개선을 위해서 굴절율을 변화시켜야 하는 층의 수를 줄이기 위하여 수직 방향성 결합기를 다음과 같이 두개의 영역으로 구성할 수 있다. 앞단(SOIS)은 대칭형 결합기로써 두 코어 굴절율의 변화에 의하여 스위칭 동작만을 유도하고 뒷단(ERES)은 비대칭형 결합기로 두 코어 굴절율의 비대칭의 크기를 조절하여 소멸비를 향상시키는 역할을 수행하도록 구성한다. SOIS의 코어 굴절율은 소자의 길이를 최소화하기 위하여 크로스 상태와 바 상태의 코어 굴절율 차는 변화 가능한 코어 굴절율의 최대 값을 가지도록 설계하였다.

ERES에서의 소멸비는 SOIS 영역의 코어 굴절율 값에 거의 영향을 받지 않고 ERES의 두 코어의 굴절율의 비대칭 값에 의하여 결정된다. 이 때 두 코어 사이의 굴절율의 비대칭은 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 빛이 출력되는 코어의 굴절율 보다 작도록 설정한다. 스위칭 동작 시 SOIS와 ERES 영역의 굴절율의 차이가 크면 모드 부정합이 발생한다. 이러한 모드 부정합을 줄이고 ERES영역에서 높은 소멸비를 얻기 위한 굴절율 변화를 줄이기 위해 ERES 영역의 굴절율을 SOIS 영역의 크로스 상태와 바 상태의 코어 굴절율의 평균값으로 설정하여 설계하였다. 이와 같이 설계하면 크로스 상태와 바 상태가 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 ERES의 코어 굴절율의 비대칭 값이 같게되어 두 상태의 ERES의 길이가 정확하게 일치하여 같은 소자의 길이에서 크로스 상태와 바 상태가 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가질 수 있다.

III. 계산방법 및 설계지침

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 수행하였다. 그림 1은 참고논문[3]에서 제안한 스위칭 동작 유도영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 1차원 개념도이다.

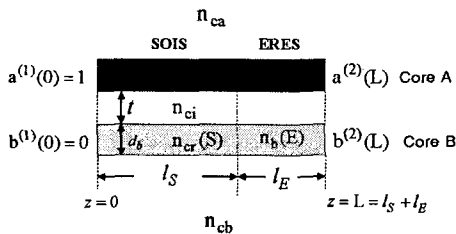


그림 1. 스위칭 동작 유도영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 1차원 개념도.

수직 방향성 결합기 스위치의 1차원 개념도에 대한 편광특성은 TM 모드의 경우 클래딩 영역에 존재하는 파위의 크기가 TE 모드에 비하여 크기 때문에 결합길이가 짧고 최대 소멸비가 약간 작다는 특성을 제외하고는 각 파라미터에 대한 특성변

화가 TE 모드와 비슷하다. 따라서 본 논문에서는 TE 모드에 대하여 안쪽 클래딩 (퓨전층)의 두께 변화에 따른 제작 공차와 코어 굴절율에 따른 비대칭등과 같은 소자 특성의 변화에 대하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용한 파라미터는 다음과 같다.

$n_{ca} = n_{cb} = n_{ci} = 3.17$, $d_a = d_b = 0.5 \mu\text{m}$, 그리고 계산에 사용한 파장은 $1.55 \mu\text{m}$ 이다.

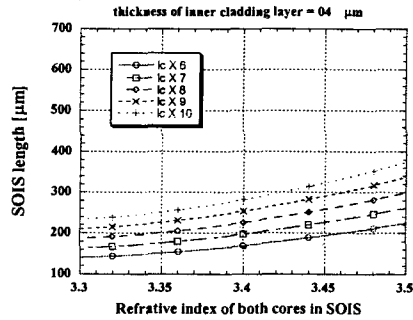


그림 2. 안쪽 클래딩의 두께가 $0.4 \mu\text{m}$ 일때 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이.

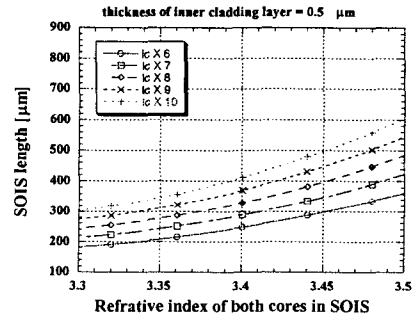


그림 3. 안쪽 클래딩의 두께가 $0.5 \mu\text{m}$ 일때 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이.

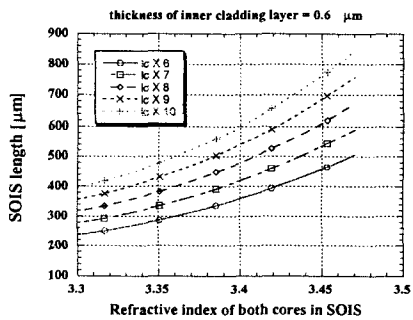


그림 4. 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6 \mu\text{m}$ 일때 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이.

그림 2, 그림 3 과 그림 4는 안쪽 클래딩의 두께가 $0.4 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ 와 $0.6 \mu\text{m}$ 일 때 SOIS의 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이이다. 같은 영역의 끝단에서 크로스 상태와 바 상태를 모두 얻기 위해서는 크

수직 방향성 결합기 스위치의 안쪽 클래딩 두께에 따른 특성 변화에 대한 연구

로스 상태와 바 상태의 결합길이 또는 결합길이의 배수가 같아야 하며 이 길이가 그 영역의 물리적 길이 (소자 길이)가 된다. 따라서 SOIS의 길이는

$$(m-1)l_c |_{n_{cr}(S)|_{l_m}} = m l_c' |_{n_{cr}(S)|_{l_m}}$$

의 조건으로부터 결정된다. m 이 홀수이면 l_c 와 l_c' 는 각각 SOIS에서 바 상태와 크로스 상태의 결합길이(소자 전체로 보면 크로스 상태와 바 상태)이며 m 이 짝수이면 l_c 와 l_c' 는 각각 SOIS에서 크로스 상태와 바 상태의 결합길이이다. $n_{cr}(S)$ 는 SOIS 영역에서의 두 코어 굴절률 값으로 결합길이 l_c 가 l_c' 보다 크기 때문에 l_c 의 결합길이를 가지는 경우의 두 코어 굴절률이 l_c' 의 결합길이를 가지는 경우의 두 코어 굴절률 보다 크다. 이러한 조건으로부터 SOIS의 물리적 길이가 결정되며 크로스 상태일 때와 바 상태의 각 코어의 굴절률이 결정된다.

수직 방향성 결합기 스위치 설계시 기본적으로 고려해야 하는 제약조건은 전류 주입이나 전압인가에 의하여 변화 가능한 굴절률 값이다. 변화 가능한 굴절률의 값을 1% 이하로 가정하였으므로 그림 2, 그림 3과 그림 4에서 크로스과 바 상태로의 굴절률 변화가 0.03 이하가 되는 영역이 스위치 설계가 가능한 SOIS의 굴절률의 영역이 된다. 그림 2, 그림 3과 그림 4의 계산 결과로부터 SOIS의 길이와 크로스 상태와 바 상태의 굴절률 차이를 결정하면 SOIS의 양쪽 코어의 굴절률이 결정된다. 그리고 SOIS의 굴절률에 따라서 ERES의 굴절률 또한 결정된다.

예를 들어 설명하면 다음과 같다. 그림 4에서 결합계수의 배수를 8과 9로 선택하고 SOIS의 길이를 370 μm 로 설정한 경우를 통해 설명하면 다음과 같다. 이 경우 $8l_c = 9l_c' = 370 \mu\text{m}$ 의 조건을 만족하는 경우로 크로스 상태일 때와 바 상태일 때의 SOIS 영역의 두 코어의 굴절률은 각각 3.3424와 3.3118 이다. 따라서 스위칭 동작 유도를 위한 SOIS에서의 크로스 상태와 바 상태 사이의 굴절률 값의 차이는 0.03이다. ERES의 한쪽 코어의 굴절률은 3.3424와 3.3118의 중간 값인 3.3271로 계산되는데 크로스 상태에 대해서는 3.3271이 코어 A의 굴절률로, 바 상태에 대해서는 코어 B의 굴절률로 결정된다. 그리고 최대 소멸비를 보이는 ERES의 나머지 코어의 굴절률은 참고문헌 [3]의 크로스과 바 상태의 최대 소멸비를 보이는 굴절률의 결정방법에 따라서 3.3327로 결정된다. 이와 같은 방법으로 스위치 설계 가능한 굴절률과 두께 및 소자길이를 구할 수 있다.

IV. 결과 및 요약

두께가 감소함에 따라 두 코어는 강하게 결합하기 때문에 SOIS의 결합길이는 감소한다. 그러나 SOIS에서 크로스 상태에서 바 상태로 변화를 일으키기 위하여 필요한 굴절률 범위는 1% ($\Delta n < 0.03$)이내 이어야 한다는 조건과 크로스과 바 상태의 길이는 같아야 한다는 조건을 고려하면 SOIS의 길이는 크게 감소하지 않는다. 그 이유는 두께가 작을수록 두 코어는 강하게 결합되기 때문에 SOIS의 코어의 굴절률 변화에 따른 결합길이의 변화가 작게 발생하기 때문이라 생각된다. 따라서 굴절률의 범위를 1% 이내로 가정하였을 때 같은 길이의 크로스 상태와 바 상태를 얻기 위해서는 그림 2, 그림 3과 그림 4에서 보듯이 SOIS 길이를 약 350 μm 이상으로 잡아주어야 한다.

다음은 그림 2, 그림 3과 그림 4의 각각의 두께에 대하여 SOIS의 코어의 굴절률이 증가함에 따라 SOIS의 길이, ERES의 길이, ERES의 코어 A와 코어 B의 비대칭, 크로스 상태와 바 상태에 대한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 ERES의 코어의 굴

절률 범위 등에 대한 결과를 정리한 것이다.

첫째, 안쪽 클래딩 영역에 존재하는 파위가 감소하므로 SOIS의 길이는 증가한다.

둘째, SOIS의 크로스 상태와 바 상태의 굴절률의 중간값을 가지는 ERES 코어의 굴절률도 따라서 증가하므로 ERES의 길이도 증가한다.

셋째, ERES의 코어의 굴절률도 증가하므로 ERES의 두 코어는 약하게 결합되어 ERES에서의 코어 A와 코어 B의 비대칭은 감소한다.

넷째, ERES의 코어의 굴절률도 증가하므로 ERES의 코어와 안쪽 클래딩과의 굴절률의 차이가 더욱 커지기 때문에 30dB 이상을 가지는 굴절률 범위 내에서의 전파상수의 변화는 급속도로 빨리 변하게 되고, ERES에서의 크로스과 바 상태에 대한 30dB 이상의 굴절률 값을 가지는 범위는 줄어든다.

표 1. SOIS의 길이가 390 μm 일 경우 여러 안쪽 클래딩의 두께에 대해서 계산한 스위칭에 필요한 SOIS 영역의 코어 굴절률과 공차 및 ERES 영역의 두 코어 사이의 굴절률 값의 최적화 비대칭.

t (μm)	SOIS의 길이 (μm)	Bar state			
		m	$n_{cr}(S)$	$\Delta n_{cr} > 30 \text{ dB}$	$n_{asy}(E)$
0.4	390	13	3.4232	0.0021	0.006
		13	3.4232	0.0019	0.0056
		11	3.4817	0.0016	0.0033
0.5	390	11	3.3566	0.002	0.0069
		11	3.3566	0.0018	0.0063
		9	3.4140	0.0014	0.0032
0.6	390	9	3.3262	0.0018	0.0063
		9	3.3262	0.0016	0.0057
		7	3.3846	0.0011	0.0025

t (μm)	SOIS의 길이 (μm)	Cross state			
		m	$n_{cr}(S)$	$\Delta n_{cr} > 30 \text{ dB}$	$n_{asy}(E)$
0.4	390	14	3.3950	0.0021	0.0074
		12	3.4518	0.0019	0.0045
		12	3.4518	0.0017	0.0043
0.5	390	12	3.3274	0.0021	0.0092
		10	3.385	0.0017	0.0047
		10	3.385	0.0016	0.0044
0.6	390	10	3.2956	0.0018	0.0092
		8	3.3548	0.0014	0.004
		8	3.3548	0.0013	0.0013

표 1은 SOIS의 길이가 390 μm 일 때 여러 개의 안쪽 클래딩(표전층)의 두께에 대하여 ERES 영역의 두 코어 굴절률 값의 최적화 비대칭 (optimum asymmetry)-최대의 소멸비 값을 얻을 수 있는 두 코어 사이의 굴절률 값의 차이-와 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 SOIS의 코어 굴절률의 공차에 대한 계산 결과를 정리한 것이다.

여기서 $n_{cr}(S)$ 는 바 상태와 크로스 상태에 대하여 스위칭 동작 유도를 위해 필요한 SOIS의 코어의 굴절률 값이고, $n_{asy}(E)$ 는 ERES에서 두 코어의 굴절률 값의 최적화 비대

칭이고, $\delta n_{eff} > 30 \text{ dB}$ 는 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 굴절율의 공차이다.

같은 두께를 가지는 경우 코어의 굴절율이 작으면 코어에 강급되는 파워비가 작아지기 때문에 코어의 굴절율 변화에 따른 전파 상수의 변화가 작아진다. 따라서 두 코어의 굴절율이 작은 경우가 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 굴절율의 공차가 더 큰 것을 볼 수 있다. 반면, 코어 굴절율이 작을수록 두 코어는 강하게 결합되어 최적화 비대칭, $n_{asy}(E)$,은 증가하는 것을 볼 수 있다.

다음은 표 1에서와 같이 고정된 SOIS의 길이에 대하여 두 코어 사이의 두께가 감소함에 계산 결과를 정리한 것이다.

첫째, ERES의 두 코어는 강하게 결합되므로 30 dB이상의 높은 소멸비를 얻기위한 ERES의 코어 A와 코어 B의 비대칭은 증가한다.

둘째, ERES에서 코어의 굴절율은 증가하므로 ERES에서 코어의 굴절율의 공차는 감소한다.

V. 결론

안쪽 클래딩의 두께를 작게 하거나 안쪽 클래딩의 굴절율의 값을 크게 하여 즉, 두 코어가 강하게 결합되게 설정하여 SOIS의 두 코어의 굴절율 값을 작게 설정하면 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 공차는 증가한다. 그러므로 ERES의 두 코어의 굴절율의 비대칭 값이 0.03보다 크지 않는 범위 내에서 안쪽 클래딩의 두께는 작게, SOIS의 두 코어의 굴절율 값을 작게 설정하여 스위치를 설계하면 큰 제작 공차를 얻을 수 있음을 알았다.

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 2000년도 대기초연구 지원사업에 의해 수행되었습니다.

VI. 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 조성찬, 정병민, 김부균, "스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합 스위치 설계," 대한 전자공학회논문지 심사중, 2001.
- [4] 조성찬, 실종철, 김부균, "두 개의 영역으로 구성된 매우 짧은 길이를 가지는 융합된 수직 방향성 결합 스위치 설계," 대한전자공학회논문지D편, 제37권, 10호, 42~50 쪽, 2000.
- [5] 조성찬, 실종철, 김부균, "매우 짧은 길이와 높은 소멸비를 가지는 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 설계," 대한전자공학회논문지D편, 제36권, 9호, 822~828 쪽, 1999.