

論文2002-39SD-5-5

비대칭 수직 방향성 결합기 스위치

(A Novel Asymmetric Vertical Directional Coupler Switch)

趙成贊,* 鄭炳珉**, 金富均**, 崔智然*, 黃鉉龍*

(Sung-Chan Cho, Byung-Min Jung, Boo-Gyoun Kim, Jee Yon Choi,
and Hyun-Yong Hwang)

요약

스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치를 제안하였다. 스위칭 동작 유도 영역에서는 코어 한 개의 굴절율 값을 변화시키어 크로스 상태 (cross state) 와 바 상태 (bar state)의 스위칭 동작을 유도하였으며, 소멸비 향상 영역에서의 코어 굴절율의 비대칭을 조절하여 소자의 끝단에서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 크로스 상태와 바 상태를 얻을 수 있었다. 두 코어의 굴절율 값이 같은 대칭형 결합기의 소멸비 조절 영역을 진행하면서 스위칭 동작 유도 영역의 끝단에서 다른 크로스 상태와 바 상태의 소멸비는 소멸비 조절 영역의 끝단에서 같은 값이되어 소멸비 향상 영역에서 최대 소멸비를 가지기 위한 코어 굴절율의 비대칭 값과 소멸비 향상 영역의 길이가 같게된다. 또한 여러 코어 굴절율 값과 안쪽 클래딩의 두께에 따른 크로스 상태와 바 상태의 소멸비 계산 결과의 분석을 통하여 30 dB 이상의 높은 소멸비를 보이며 큰 제작 공차를 얻기 위한 비대칭 수직 방향성 결합 스위치의 설계 지침을 제시하였다.

Abstract

We propose a novel ultra-short asymmetric vertical directional coupler switch (VDCS) with high extinction ratios larger than 30 dB composed of switching operation induced section (SOIS), extinction ratio adjusted section (ERAS), and extinction ratio enhanced section (ERES). In this VDCSs, switching operation is achieved by changing the refractive index of one core in SOIS. The improvement of extinction ratios larger than 30 dB for both cross and bar states is achieved by controlling the asymmetry of refractive indices between both cores in ERES. After propagating through ERAS with symmetry in the structure, different extinction ratios between cross and bar states at the end of SOIS are changed to the same value. For this reason, the optimum asymmetry of the refractive indices of cores to have the maximum extinction ratios and the lengths of ERES are the same for cross and bar states. Design guidelines to achieve high extinction ratios with large tolerances are presented.

I. 서론

* 正會員, 韓國電子通信研究院 네트워크연구소 光通信
研究部 광패킷라우터팀

(Optical Packet Routing Team, ETRI)

** 正會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil Univ.)

接受日:2001年10月18日, 수정완료일:2002年1月31日

광라우터를 사용하여 전광통신망을 구축하기 위해서는 대용량의 고속 광 스위치가 요구된다. 이러한 집적된 대용량의 광 스위치 시스템을 구성하는 단위 스위치는 높은 소멸비, 낮은 편광 의존성, 작은 크기 그리고 작은 손실 등과 같은 특징을 가지고 있어야 한다. 광패킷 스위치는 수 μ s 또는 수 ns의 스위칭 속도가 요

구된다.^[1] 이러한 고속의 스위칭 동작은 전기광학 효과, 운반자 주입 (carrier injection) 그리고 캐리어 공핍 (depletion) 현상을 이용하여 제작이 가능하다.^[2~4]

수평 방향으로 결합되는 도파로(laterally arranged waveguide) 구조를 가지는 방향성 결합기 형태의 스위치는 결합길이가 길며 매우 작은 제작 공차를 가지기 때문에 실제 소자를 제작하는데 매우 어렵다는 단점이 있다.^[5] 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.^[6~8] 또한 퓨전을 이용한 수직 방향성 결합기 (vertical directional coupler)는 결합 영역외의 영역을 공기로 분리하므로 집적된 $N \times N$ 스위치 소자를 제작하는 경우 교차 부분이 공기로 분리되어 두 도파 모드 사이에 결합이 발생하지 않기 때문에 쉽게 집적화가 가능하다. 또한 퓨전층의 조성비와 두께를 임의로 바꾸어 줄 수 있기 때문에 설계시 많은 자유도가 주어진다.^[6~8]

수직 방향성 결합기는 결합 모드 사이의 nonorthogonality 때문에 크로스 상태 (cross state)와 바 상태 (bar state)의 소멸비가 낮다. 그러나 결합된 두 코어의 굴절율의 비대칭을 이용하면 30 dB 이상의 크로스 상태의 소멸비를 얻을 수 있다.^[6] 또한 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서는 코어 굴절율의 비대칭과 대칭의 조합에 의하여 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 바 상태를 얻을 수 있다.^[9,10]

참고문헌 9에서 제안된 구조와 같이 두 코어의 굴절율과 안쪽 클래딩의 굴절율을 독립적으로 변화시키기 위해서는 세 개의 P-i-N 구조와 세 개의 전극이 필요하므로 제작공정과 구조가 매우 복잡하다. 따라서 최근 참고문헌 10에서 제안된 구조보다 제작이 용이한 수백 μm 의 길이를 가지며 30 dB 이상의 높은 소멸비를 가지는 스위칭 동작 유도 영역 (switching operation induced section, SOIS)과 소멸비 향상 영역 (extinction ratio enhanced section, ERES)으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치 (vertical directional coupler switch)가 제안되었다.^[11] 제안된 수직 방향성 결합기 스위치에서, 스위칭 동작은 스위칭 동작 유도 영역의 두 코어의 굴절율을 변화시키어 유도하고, 소멸비 향상 영역의 두 코어의 굴절율의 비대칭을 조절하여 향상시키

었다. 그러나 이러한 구조도 수직 방향으로 두 개의 P-i-N 구조와 두 개의 전극이 필요하므로 제작과 구조가 복잡하다.

참고문헌 11에서 제안된 것과 같이 스위칭 동작과 소멸비 향상을 두 코어의 굴절율의 변화가 아니라 한 개의 코어의 굴절율을 변화시키어 얻을 경우 수직 방향성 결합기 스위치는 한 개의 P-i-N 구조와 수직 방향으로 단일 전극이 요구되므로 구조와 제작 공정은 보다 용이해진다. 따라서 본 논문에서는 스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역 (extinction ratio adjusted section, ERAS) 그리고 소멸비 향상 영역으로 구성된 비대칭 수직 방향성 결합기 스위치를 제안하였다. 이러한 장점 외에도 새로이 제안된 수직 방향성 결합기는 참고문헌 11에서 제안된 것보다 같은 양의 굴절율 변화를 가정하였을 경우 길이가 약 1/2배로 짧아 소형이며 파워 소모가 작다는 장점을 가지고 있다.

전달 행렬 방법과 향상된 결합모드 이론을 사용하여 계산을 수행하였으며, 그 결과를 빔 전파 방법 (beam propagation method, BPM)을 사용하여 계산한 결과와 비교하였으며, 두 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역 그리고 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 동작 원리, 특성 그리고 구현 방안에 대하여 간략하게 설명을 하였다. III절에서는 향상된 결합모드 이론과 BPM을 이용하여 제안된 비대칭 수직 방향성 결합기의 끝단에서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 크로스 상태와 바 상태를 얻을 수 있음을 보였다. 또한 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 공차가 큰 구조에 대한 설계 지침을 제시하였다. 마지막으로 IV절에서는 결론을 맺었다.

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

참고문헌 9와 10의 계산 결과에 대한 분석으로부터 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 한 단은 두 코어가 같은 굴절율 값을 가지는 대칭형 결합기 (symmetric coupler)이고 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.

즉, 크로스 상태의 소멸비는 단일 영역으로 구성된 비대칭형 결합기를 사용하여 향상시킬 수 있었다. 바 상태의 소멸비는 두개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 앞 영역은 비대칭형 결합기로, 뒤 영역은 대칭형 결합기로 (또는 반대 순서)로 구성하면 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있었다. 이러한 사실로부터 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 앞 영역은 대칭형 결합기로 뒤 영역은 비대칭형 결합기로 구성하면 크로스 상태와 바 상태가 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지도록 할 수 있음을 알 수 있었다.

위에서 설명한 구조의 동작 원리를 상술하면, 본 논문에서 고려하는 강하게 결합된 대칭형 수직 방향성 결합기의 경우 크로스 상태와 바 상태의 소멸비는 보통 13 dB에서 20 dB의 값을 가진다. 영역 1의 대칭형 결합기가 크로스 상태와 바 상태에 대하여 이러한 소멸비를 가지는 경우 영역 2에서 코어 굴절율의 비대칭의 크기를 조절하여 크로스 상태와 바 상태 모두 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있다. 따라서 스위칭 동작과 소멸비 개선을 위해서 굴절율을 변화시켜야하는 층의 수를 줄이기 위하여 수직 방향성 결합기를 다음과 같이 두개의 영역으로 구성할 수 있다. 앞단의 SOIS는 대칭형 결합기로써 스위칭 동작만을 유도하고 뒷단의 ERES는 비대칭형 결합기로 두 코어 굴절율의 비대칭의 크기를 조절하여 소멸비를 향상시키는 역할을 수행하도록 구성한다.

스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기를 구현하는 방법에는 크게 두 가지를 제안 할 수 있다. 첫 번째는 두 코어의 굴절율을 모두 변화시켜 스위칭 동작을 유도하고 소멸비를 향상시키는 방법이다. 두 번째는 코어 한 개의 굴절율만을 변화시켜 스위칭 동작을 유도하고 소멸비를 향상시키는 방법이다. 본 논문에서는 후자에 대하여 연구하였다.

그림 1 (a)는 입력단과 출력단에서의 각 포트들이 분리된 융합된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 개념도이고 (b)는 스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역 그리고 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 1차원 개념도 이다. SOIS에서는 크로스 상태에서 바 상태 (또는 반대의 경우)로의 천이가 한 개의 코어 굴절율 변화에 의하여 이루어진다. 결합된 두 모드 간의 위상 부정합 (phase mismatch)는 모드간의 파워 스윙 (swing)을 작게 할뿐만 아니라 결

합 길이를 작게한다. 따라서 코어 한 개의 굴절율을 변화시키는 경우 모드 부정합에 의하여 결합길이를 변화시킬 수 있으므로 스위칭 동작의 유도가 가능하다. 소멸비 향상 영역에서는 코어의 비대칭 값의 조절에 의하여 소멸비의 개선이 이루어지므로 한쪽 코어의 굴절율만을 변화시켜서도 30 dB 이상을 얻기 위해서 요구되는 코어 굴절율의 비대칭 값을 가지도록 할 수 있다.

제안된 구조에서는 한 개의 코어의 굴절율에 의하여 스위칭 동작이 유도되므로 크로스 상태와 바 상태는 SOIS가 각각 대칭형 결합기와 비대칭형 결합기 일 때 (또는 역순 일 때) 동작되도록 설계된다. 영역의 끝단에서의 소멸비는 입력 조건과 두 코어 사이의 굴절율의 비대칭 값에 의하여 결정된다. 크로스 상태와 바 상태는 SOIS 영역이 한 경우는 대칭형 결합기이고 다른 경우는 비대칭형 결합기이므로 SOIS의 끝단에서의 소멸비가 큰 차이를 가지기 때문에 30 dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 ERES 영역에서의 비대칭 값이 두 경우 다르다. 따라서 크로스 상태와 바 상태의 ERES 영역의 길이가 다소 차이를 보인다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 SOIS와 ERES 사이에 대칭형 결합기의 ERAS이 필요하다. 입력 조건이 다른 경우에도 결합 길이 만큼 두 코어의 굴절율이 같은 대칭형 결합기를 진행하면 끝단에서의 소멸비는 같은 값을 보인다. 따라서 대칭형의 ERAS를 통과하면서 SOIS의 끝단에서의 크로스 상태와 바 상태의 다른 소멸비는 같은 값으로 변하게 되어 30 dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 ERES 에서의 크로스 상태와 바 상태의 비대칭 값은 같게되어 두 경우 ERES의 길이가 일치하게 된다. ERAS를 통과한 빛은 SOIS 영역의 굴절율 값과 소멸비 값에 관계 없이 참고문헌 10에서의 대칭형 결합기의 SOIS 영역을 지난 것과 같은 특성을 가지므로 ERES 설계 지침은 쉽게 얻을 수 있으며 참고문헌 10 그리고 11과 같음을 예측할 수 있다.

스위칭 동작과 소멸비 향상을 얻기 위해서는 한 개 코어 영역의 굴절율 변화가 요구된다. 즉, 스위칭 동작 유도와 소멸비 향상을 위해 코어 굴절율의 비대칭으로 조절할 수 있어야 한다. 이러한 굴절율 변화는 전기광학 효과와 운반자 주입 (또는 캐리어 공핍)을 이용하여 유도할 수 있다. 이러한 굴절율 변화를 성취할 수 있는 구조는 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째는 수직 방향으로 전체적으로 PPinNN로 구성하고 이중 굴

굴절을 변화시키고자 하는 쪽의 코어가 pin구조를 가지도록 구성하여 수직으로 역방향 전압을 인가하여 얻는 구조 또는 안쪽 클래딩 층에 캐리어 블록킹 층을 두고 한쪽의 코어를 포함한 두파관 구조를 PpinNN 구조로 구성하여 한쪽 방향에만 전류가 인가될 수 있도록 하는 방법이다.^[2,4] 두 번째 구조는 Liu 등이 최근 제작한 단일 전극의 push-pull 구조와 같이 도핑 농도, 반도체 화합물질의 조성비 그리고 광축 방향을 적절하게 선정하여 두 코어의 굴절율이 비대칭으로 변화하는 구조이다.^[12]

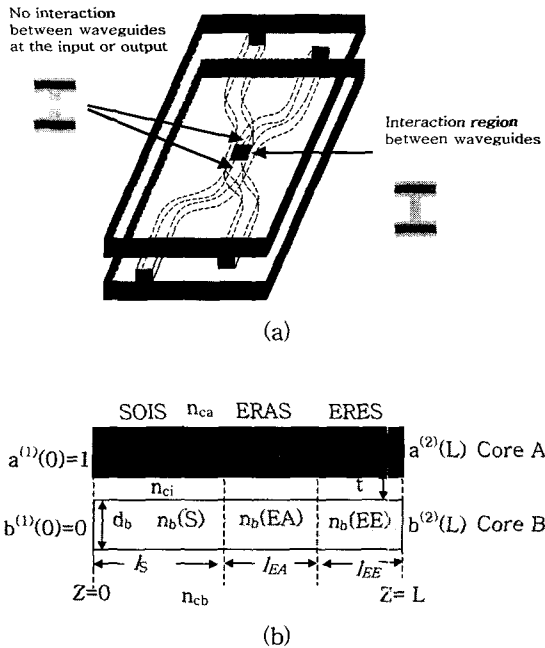


그림 1. (a) 입력단과 출력단에서의 각 포트들이 분리된 융합된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 개념도 (b) 스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역 그리고 소멸비 향상 영역으로 구성된 융합된 수직 방향성 결합기 스위치의 결합 영역에 대한 1차원 개념도

Fig. 1. (a) Schematic diagram of fused vertical directional coupler switches with separated input and output waveguides. (b) Schematic diagram of one dimensional index profile in the straight interaction regions of fused vertical directional coupler switches with switching operation induced section, extinction ratio adjusted section, and extinction ratio enhanced section.

III. 계산 결과 및 스위치 설계지침

그림 1에서와 같이 실제 소자 제작에 사용되는 ridge 도파로와 같은 2차원의 채널 광도파로는 유효굴절률 방법을 사용하여 슬랩 형태의 1 차원 광도파로로 단순화 할 수 있으므로 본 논문에서는 1차원 광도파로에 대하여 계산을 수행하였다.^[9,10] TM 모드의 경우는 도파로에 구속되는 파위의 크기가 TE 모드에 비하여 작기 때문에 결합길이가 더 작다는 특성을 제외하고는 수직 방향성 결합기의 각 파라메타의 변화에 대한 특성변화가 TE 모드와 비슷하다. 따라서 본 논문에서는 TE 모드에 대하여 결합길이가 소멸비 및 굴절율의 공차에 대한 계산을 수행하였다.

제안된 구조에 대한 계산은 참고문헌 10와 13에서 제시된 향상된 결합모드 이론과 전달 행렬 방법을 사용하여 수행하였다. 각 영역의 끝단에서의 소멸비는 도파로 코어 A의 광파워, $P_a^{(i)}$, 와 도파로 코어 B의 광파워, $P_b^{(i)}$, 의 비이다. 계산에 사용한 파라메타 값들은 다음과 같다. $n_{ca} = n_{cb} = n_{ci} = 3.17$, $n_b(S) = n_a(EA) = n_b(EA) = n_b(EE) = 3.37$, $d_a = d_b = 0.5 \mu\text{m}$ 그리고 계산에 사용한 파장은 $1.55 \mu\text{m}$ 이다. 변화 가능한 코어 A의 굴절율의 변화를 0.5% 로 가정하였다.

같은 영역의 끝단에서 크로스 상태와 바 상태를 모두 얻기 위해서는 크로스와 바 상태의 결합길이가 또는 두 상태의 결합길이의 배수가 같아야 하며 이 길이가 그 영역의 물리적 길이 (소자 길이)가 된다. ERAS에서의 효과적인 소멸비의 조절을 위해서 SOIS의 길이는 SOIS의 비대칭 값에 관계없이 끝단에서 소멸비가 대칭형 결합기와 거의 같은 값을 가지는 바 상태의 길이로 하였다. 따라서 SOIS의 길이는 $2m l_c |n_a(S)|_{\text{Min or Max}}$ $= (2m - 1) l_c' |n_a(S) = n_b(S)|$ 의 조건으로부터 결정된다. 여기서, l_c 와 l_c' 은 각각 크로스 상태와 바 상태의 결합길이이다. 또한, $n_{a,b}(S)$ 는 각각 SOIS의 코어 A와 코어 B의 굴절율이다. 따라서 굴절율 차이 $\Delta n_a(S) = n_b(S) - n_a(S)|_{\text{Min or Max}}$ 는 스위칭 동작 유도에 필요한 굴절률 변화이다. 여기서, $n_a(S)|_{\text{Min or Max}}$ 는 각각 코어 A의 변화 가능한 굴절율의 최소값과 최대값이다. 따라서 앞에서 굴절률 변화에 대한 가정에 의하여 $\Delta n_a(S)$ 은 0.015 이하가 되도록 설계하여야 한다. 이러한 조건

으로부터 SOIS의 물리적 길이가 결정되며 크로스 상태와 바 상태의 각 코어의 굴절율이 결정된다.

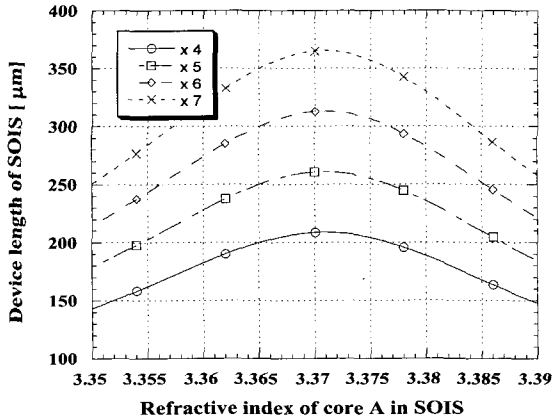


그림 2. 안쪽 클래딩의 두께가 0.6 μm 일 때 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이

Fig. 2. Length of SOIS as a function of refractive index of core A for various multiples of coupling length in SOIS of a vertical directional coupler with the thickness of inner cladding layer of 0.6 μm .

표 1. 각 영역에서의 코어 A의 굴절율
Table 1. Refractive index of core A in each section.

Power Launch	State	$n_a(S)$	$n_a(EE) _{optimum}$
Core A	Bar	3.3578	3.3729
		3.3836	
	Cross	3.37	3.3669
Core B	Bar	3.3578	3.3669
		3.3836	
	Cross	3.37	3.3729

수직 방향성 결합기 스위치 설계시 우선 고려해야 하는 제약 조건은 운반자 주입이나 전압인가에 의하여 변화가능한 굴절율 값이다. 이러한 제약 조건내에서 SOIS의 길이와 코어 A의 굴절율 값을 결정하기 위하여 그림 2와 같은 계산을 수행하였다. 그림 2는 수직 방향성 결합기에서 안쪽 클래딩의 두께가 0.6 μm 일 때 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이이다. 한 예를 들어 SOIS의 길이와

각 영역에서의 스위칭 동작과 소멸비 향상에 필요한 굴절율 값 설정에 대하여 설명하면 다음과 같다. 그림 2에서 코어 B의 굴절율은 3.37이므로 코어 A의 굴절율이 3.37일 때 크로스 상태인 $(2i-1)l_{c, cross}$ 의 길이를 SOIS의 길이로 설정한다. 이때 바 상태의 SOIS의 코어 A의 굴절율은 $(2i-1)l_{c, cross} = 2il_{c, bar}$ 를 만족하는 값이다. 두 경우의 코어 A의 굴절율 차이는 스위칭 동작 유도에 필요한 값이며 가정한 굴절율 변화 값인 $0.015-\delta$ 이하가 되어야 한다. 여기서 δ 는 ERES에서 최대의 소멸비를 가지기 위한 코어 굴절율의 비대칭 값이다. 대칭형 결합기인 ERAS에서의 굴절율의 효율적인 조절을 위해서 코어 A와 코어 B의 굴절율이 다른 비대칭 결합기일 경우는 SOIS의 길이가 바 상태가 되도록 설정하였다. SOIS의 길이를 260 μm 로 선택할 경우 크로스 상태와 바 상태의 결합길이는 $5l_{c, cross} = 6l_{c, bar} = 260 \mu\text{m}$ 를 만족하며 각각에 대한 코어 A의 굴절율은 3.37과 3.3578 (또는 3.3836)이다. 코어 B의 굴절율은 3.37 그리고 SOIS의 길이는 260 μm 로 설정한 경우 스위칭 동작과 소멸비 향상에 필요한 각 영역의 코어 A의 굴절율에 대한 값은 표 1과 같다. 그림 2와 표 1에서 볼 수 있듯이 바 상태의 경우 SOIS에서의 코어 A의 굴절율은 3.3578 또는 3.3836 값을 가질 수 있다. 두 경우 스위칭 및 소멸비 특성은 대칭형 결합기인 ERAS의 역할 때문에 표 1에서 볼 수 있듯이 같다.

본 논문에서 고려한 수직 방향성 결합기 스위치는 비대칭 구조이므로 SOIS의 입력단에서 빛이 코어 A에 입사하는 경우와 코어 B에 입사하는 경우 각각 독립적으로 고려해야 한다. 그림 3은 빛이 코어 A에 입사하는 경우 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 크로스 상태와 바 상태에 대한 소멸비이다. 바 상태와 크로스 상태에 대한 SOIS의 코어 A의 굴절율은 각각 3.3578 (또는 3.3836)과 3.37이다. 최대의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 A의 굴절율 값인 3.3669와 3.3729에서 크로스 상태와 바 상태에 대한 ERES의 길이는 각각 51.2 μm 와 51.9 μm 이다. 크로스 상태와 바 상태 모두 ERAS를 통과하면서 ERAS의 끝단에서 소멸비가 같게되므로 ERES에서 최대 소멸비를 가지기 위한 두 코어의 굴절율 값의 차이가 같다. 스위칭 소자의 크로스 상태는 ERES에 빛이 코어 A에 입사하고 바 상태는 ERES의 코어 B에 입사한다. 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 최대 소멸비를 보이는 최적의 코어 굴절율의

비대칭 값 만큼 작은 지점에서 소멸비의 최대값이 발생하므로 두 경우 그림 3에서 볼 수 있듯이 3.37을 중심으로 거울형상 (mirror image)이다. 최대 소멸비를 보이는 ERES에서의 코어 B와 코어 A의 굴절율 값의 차이는 약 0.003이다.

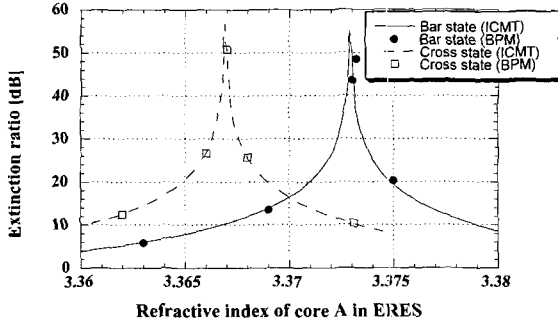


그림 3. 빛이 코어 A에 입사하는 경우 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 크로스 상태와 바 상태에 대한 소멸비

Fig. 3. The extinction ratio of cross and bar states as a function of the refractive index of core A in ERES when the power is launched into core A.

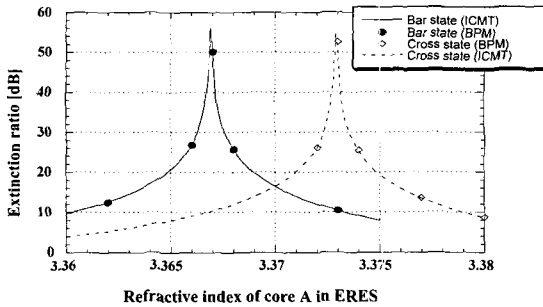


그림 4. 빛이 코어 B에 입사하는 경우 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 크로스 상태와 바 상태에 대한 소멸비

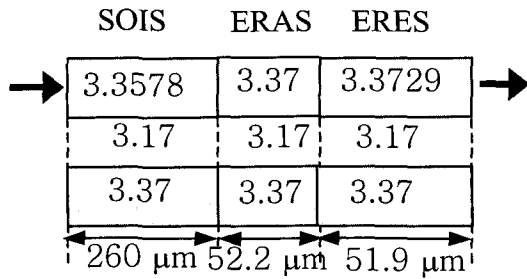
Fig. 4. The extinction ratio of cross and bar states as a function of the refractive index of core A in ERES when the power is launched into core B.

그림 4는 빛이 코어 B에 입사하는 경우 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 크로스 상태와 바 상태에 대한 소멸비이다. 바 상태와 크로스 상태에 대한 SOIS의 코어 A의 굴절율은 각각 3.3578 (또는 3.3836) 과 3.37 이다. 최대의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 A

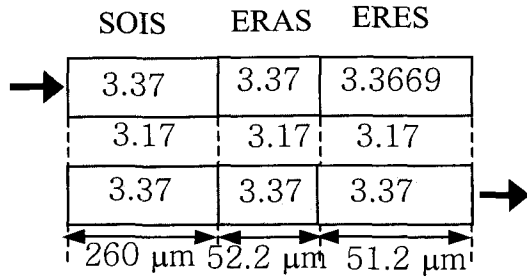
의 굴절율 값인 3.373와 3.367에서 크로스 상태와 바 상태에 대한 ERES의 길이는 각각 $51.9 \mu\text{m}$ 와 $51.2 \mu\text{m}$ 이다. 그림 3에서 설명한 것과 같은 이유에서 그림 4의 크로스 상태와 바 상태의 두 경우 코어 A의 굴절율이 3.37을 중심으로 거울 형상이다. 또한 같은 이유에서 그림 3과 4도 빛이 입사하는 코어가 다르므로 크로스 와 바 상태가 교환되어 일치하는 것을 볼 수 있다. 최대 소멸비를 보이는 ERES에서의 코어 B와 코어 A의 굴절율 값의 차이는 0.003이다. 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 A의 굴절율의 공차는 그림 3과 4 모두 0.0012이다.

그림 5는 지금까지의 계산 결과를 바탕으로 설계한 SOIS, ERAS 그리고 ERES로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치 설계의 한 예이다. ERAS와 ERES는 각 영역의 결합길이를 설계 하였다. 비대칭성을 이용하여 스위칭 동작을 유도하고 소멸비를 향상시키는 제안된 수직 방향성 결합기 스위치는 설계 예에서 보는 것처럼 ERES의 길이가 크로스 와 바 상태일 때 약간 차이를 보인다. 따라서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 공차를 작게 한다는 단점을 갖는다. 이러한 단점은 ERES영역의 비대칭성의 특징 때문에 발생한다. 즉, 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 작아야 30 dB 이상의 소멸비를 가지기 때문에 한 경우는 코어의 굴절율이 3.3729이고 다른 한쪽은 3.3669이다. 이와 같이 코어의 굴절율이 두 경우 다르기 때문에 결합 세기가 다르다. 따라서 최대 소멸비를 가지기 위한 비대칭 값이 차이를 가져 ERES의 길이가 차이를 보인다. 그러나 이러한 단점은 참고문헌 12에서의 push-pull 구조와 같이 두 코어의 굴절율의 한쪽은 양의 값으로 다른 한쪽은 음의 값으로 변하게 하면 참고문헌 11의 설계 예에서와 같이 ERES의 길이가 같게된다. SOIS에서의 스위칭 동작 유도에 필요한 코어 굴절율의 대칭과 비대칭도 push-pull 구조로 쉽게 얻을 수 있으므로 본 논문에서 제안한 비대칭 수직 방향성 결합기의 구현이 단일 전극을 이용하여 가능함을 알 수 있다.

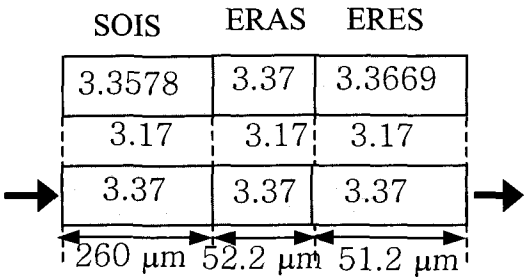
본 논문에서 제안된 수직 방향성 결합기와 참고문헌 11에서 제안된 구조와의 중요한 두 가지 차이점은 다음과 같다. 첫 번째 전자는 스위칭 동작 유도과 소멸비 향상을 위해 한 쪽 코어의 굴절율만 변화시키고 후자는 두 코어 굴절율을 모두 변화시킨다. 두 번째는 후자는 SOIS와 ERES로 구성되고 전자는 두 영역 사이에 ERAS를 삽입한다. 이 때 후자의 경우는 크로스 상태



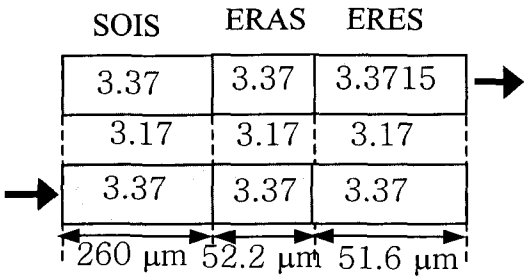
(a) 코어 A에 빛이 입사할 때 바 상태



(b) 코어 A에 빛이 입사할 때 크로스 상태



(c) 코어 B에 빛이 입사할 때 바 상태



(d) 코어 B에 빛이 입사할 때 크로스 상태

그림 5. SOIS, ERAS 그리고 ERES로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치 설계의 한 예

Fig. 5. A design example of VDCS with SOIS, ERAS, and ERES.

와 바 상태 모두 SOIS가 대칭형 구조이나 전자는 한 경우는 대칭형 구조이고 다른 경우는 비대칭 구조가 되어 SOIS의 끝단에서의 두 경우의 소멸비가 큰 차이

를 보인다. 그러나 전자의 경우는 중간에 대칭형 구조인 ERAS 영역이 삽입되어 ERAS 영역의 끝단에서의 소멸비 특성이 후자의 SOIS의 끝단에서의 특성과 같기 때문에 30 dB 이상의 소멸비를 얻기 위하여 요구되는 ERES의 특성이 두 경우 같게 된다. 결론적으로, 본 논문에서 제안된 구조의 수직 방향성 결합기 스위치에서 SOIS은 스위칭 동작 유도의 역할을 수행하며, 중간에 소멸비를 조절하기 위한 대칭형 결합기인 ERAS가 삽입되었으므로 SOIS의 영역 끝에서의 소멸비는 ERES에서의 소멸비 향상에 영향을 주지 않는다. 코어와 안쪽 클래딩 층의 굴절율과 두께는 결합 세기의 크기를 결정하여 스위칭 동작에 유도되는 굴절율 변화에만 영향을 준다. 따라서 30 dB 이상의 소멸비를 얻기 위한 코어 굴절율의 공차가 큰 구조에 대한 설계지침은 ERES에 대한 소멸비 향상에 대한 분석을 통해서 얻을 수 있다. 또한 앞에서 설명한 이유 때문에 본 논문에서 제안된 구조는 11에서의 스위치 구조와 같은 경향의 설계 지침을 갖는다.

SOIS, ERAS 그리고 ERES로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치의 보다 체계적인 설계 지침을 얻기 위하여 다음과 같은 계산을 수행하였다. 표 2는 여러 개의 SOIS의 길이와 안쪽 클래딩의 두께에 대하여 계산한 스위칭 동작 유도에 필요한 굴절율 변화 값, ERES 영역의 두 코어 굴절율 값의 최적화 비대칭 (optimum asymmetry)-최대의 소멸비 값을 얻을 수 있는 두 코어 사이의 굴절율 값의 차이와 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차에 대한 결과를 정리한 것이다. 여기서 $\delta n_a(E E) |_{>30dB}$ 는 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES에서의 코어 A의 굴절율 공차이다. 코어의 굴절율이 작으면 코어에 구속되는 파워비가 작아지기 때문에 코어의 굴절율 변화에 따른 전파 상수의 변화가 작아진다. 따라서 두 코어의 굴절율이 작은 경우가 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차가 더 큰 것을 볼 수 있다. 반면, 코어 두께가 작을수록 두 코어는 강하게 결합되어 최적화 비대칭, $\delta n_{asy}(EE)_{optimum}$, 는 증가하는 것을 볼 수 있다. 빛이 SOIS의 코어 A에 입사하는 경우와 B에 입사하는 경우 대칭형 구조인 ERAS를 지나면서 같은 소멸비를 가지게 되므로 두 경우의 $\delta n_a(E E) |_{>30dB}$ 와 $|\delta n_{asy}(EE)_{optimum}|$ 가 같은 것을 볼 수 있다.

스위칭 동작 유도를 위한 SOIS에 대한 표 2의 계산

결과와 참고문헌 9와 10의 계산 결과를 참고하여 정리하면 다음과 같다.

첫째, 두 코어의 굴절율이 작을수록 두 코어사이의 결합이 강하게 되어 코어 굴절율의 공차는 증가하지만 ERES에서의 두 코어 사이의 굴절율의 최적화된 비대칭 값은 커진다.

둘째, 안쪽 클래딩의 두께가 작을수록 두 코어가 강하게 결합되어 SOIS의 길이가 같아지는 코어의 굴절율은 증가한다.

계산 결과로부터 ERES에서의 두 코어의 굴절율 값의 최적화 비대칭 $\delta n_{asy}(EE)_{optimum}$ 는 가정한 코어 굴절율의 변화 값(0.015) 보다 항상 작은 것을 볼 수 있다. 또한 안쪽 클래딩의 두께를 작게하거나 굴절율의 값을 크게하여, 즉, 두 코어가 강하게 결합되게 설정하고 두 코어의 굴절율 값을 작게 설정하면 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 공차는 증가한다. 본 논문에서 제안된 구조의 수직 방향성 결합기 스위치의 설계 지침은 참고문헌 11의 SOIS와 ERES로 구성된 수직 방향

성 결합기와 같음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

스위칭 동작 유도 영역, 소멸비 조절 영역 그리고 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기를 제안하였다. 스위칭 동작 유도 영역에서는 코어 한 개의 굴절율을 변화시키어 크로스 상태와 바 상태의 스위칭 동작을 유도하였으며, 소멸비 향상 영역에서는 코어 굴절율의 비대칭을 조절하여 소자의 끝단에서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 크로스 상태와 바 상태를 얻을 수 있었다. 두 코어의 굴절율 값이 같은 대칭형 결합기의 ERAS를 진행하면서 SOIS의 끝단에서 다른 크로스 상태와 바 상태의 소멸비는 ERAS의 끝단에서 같은 값이되어 ERES에서 최대 소멸비를 가지기 위한 코어 굴절율의 비대칭 값과 ERES의 길이가 같게되었다. 제안된 비대칭 수직 방향성 결합기 스위치에서는 스위칭 동작과 소멸비 향상을 얻기 위해 코어 한 개의 굴절율

표 2. 여러 개의 SOIS의 길이와 안쪽 클래딩의 두께에 대하여 계산한 스위칭 동작 유도에 필요한 굴절율 변화 값, ERES 영역의 두 코어 굴절율 값의 최적화 비대칭, 그리고 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차. 크로스 상태와 바 상태는 각각 ⊗와 ⊖로 표시되었다.

Table 2. Tolerance of refractive index of cores and the optimum asymmetry in ERES and the refractive index change of cores in SOIS required for switching operation in the case of SOIS length of 260 μm for various thicknesses of inner cladding layer and refractive indices of core B. The cross and bar states are denoted by ⊗ and ⊖, respectively.

$n_c(S)$	$t [\mu m]$	SOIS의 길이 $[\mu m]$	$n_a(S)$		$\Delta n_a(S)$	$\delta n_a(EE) _{>30dB}$		$ \delta n_{asy}(EE)_{optimum} $	
			⊖	⊗		Launch A (⊖) & Launch B (⊗)	Launch A (⊗) & Launch B (⊖)	Launch A (⊖) & Launch B (⊗)	Launch A (⊗) & Launch B (⊖)
3.37	0.4	288	3.3547	3.37	0.0153	0.0024	0.0029	0.0096	0.0107
			3.3882		0.0182				
	0.5	260	3.356	3.37	0.014	0.0017	0.0019	0.0053	0.0057
			3.3862		0.0162				
	0.6	260	3.3578	3.37	0.0122	0.0012	0.0012	0.0029	0.0031
			3.3836		0.0136				
3.43	0.4	275	3.4462	3.43	0.0162	0.0019	0.0021	0.0053	0.0056
			3.4163		0.0137				
	0.5	230	3.4171	3.43	0.0129	0.0013	0.0013	0.0026	0.0026
			3.4443		0.0143				
	0.6	207	3.3578	3.43	0.0122	0.0009	0.0009	0.0013	0.0013
			3.3836		0.0136				

만을 변화시키므로 참고문헌 10에서 제안한 수직 방향성 결합기 스위치 보다 구조가 보다 간단하며 제작 공정이 보다 용이하다. 또한 같은 코어의 굴절율 변화 값에 대하여 소자의 길이가 짧다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Sadot and I. Elhanany, "Optical switching speed requirements for Terabit/second packet over WDM networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 4, pp. 440~442, 2000.
- [2] H. Inoue, T. Kato, Y. Takahashi, E. Amada, and K. Ishida, "InP-based optical switch module operating through carrier-induced refractive index change," *Optical Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 191~199, 1990.
- [3] R. F. Kalman, L. G. Kazovsky, and J. W. Goodman, "Space division switches based on semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, No. 9, pp. 1048~1051, 1992.
- [4] 변영태, "저손실 W형 GaAs/AlGaAs 광도파로와 고효율 PPpinNN 위상 변조기의 제작 및 특성연구," 박사학위 논문, 고려대학교, 1996.
- [5] J. E. Zucker, K. L. Jones, M. G. Young, B. I. Miller, and U. Koren, "Compact directional coupler switches using quantum well electro-refraction," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, No. 22, pp. 2280~2282, 1989.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Sung-Chan Cho, Boo-Gyoun Kim, and Ali Shakouri, "Improved Extinction Ratios for Both Cross and Bar States Using Two-Section Ultra Short Vertical Directional Couplers," *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, Vol. 39, No. 12A, pp. 6555~6559, 2000.
- [10] Sung-Chan Cho, Boo-Gyoun Kim, Yong Moon, and Ali Shakouri, "Ultra Short Two-Section Vertical Directional Coupler Switches with High Extinction Ratios," *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, Vol. 40, No. 6A, pp. 4054~4050, 2001.
- [11] Sung-Chan Cho, Byung-Min Jung, and Boo-Gyoun Kim, "A novel vertical directional coupler switch with switching operation induced and extinction ratio enhanced sections," *OECC/IOOC 2001*, p. OR. WedD.3, Sydney, Australia, July, 2001.
- [12] B. Liu, A. Shakouri, P. Abraham and J. E. Bowers, Push-pull vertical directional coupler switch, *IEEE Photon Technol. Lett.* Vol. 11, No. 6, pp. 662~664, 1999.
- [13] S. L. Chuang, *Physics of Optoelectronic Devices*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

저 자 소 개



趙成贊(正會員) 第34卷 D編 第7號
參照

1991년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1993년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 8월 숭실대학교 전자공학과 공학박사. 2000년 9월~현재 전자통신연구원 네트워크연구소 광패킷교환팀. <주관심분야: 광패킷 라우터, 광 버스트 스위치 및 광패킷 라우터용 광소자 등임>

鄭炳珉(正會員)

2000년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 2002년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2002년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 박사과정. <주관심분야: 광 스위칭 소자, 광 버스트 스위치 및 광패킷 교환용 광소자 등임>

金富均(正會員) 第32卷 A編 第3號 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>



崔智然(正會員)

1992년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1994년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1994년 2월~현재 한국전자통신연구원 네트워크연구소 광패킷교환팀. <주관심분야: 광패킷 스위치, 광 버스트 스위치, 교환용 광소자>



黃鉉龍(正會員)

1998년 2월 호서대학교 전자공학과 공학사. 2000년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 2000년 5월~현재 전자통신연구원 네트워크연구소 광패킷교환팀. <주관심분야: 광패킷 스위칭, 광증폭기 등임>