

論文2001-38SD-9-6

스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합 스위치 설계

(Vertical Directional Coupler Switches with Switching Operation Induced and Extinction Ratio Enhanced Sections)

趙成贊*, 鄭炳珉**, 金富均**

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

요 약

스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합 스위치를 제안하였다. 스위칭 동작 유도 영역에서는 두 코어의 굴절율을 변화시켜 cross state와 bar state의 스위칭 동작을 유도하였으며, 소멸비 향상 영역에서의 코어 굴절율의 비대칭을 조절하여 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 얻을 수 있었다. 또한 여러 코어 굴절율 값과 안쪽 클래딩의 두께에 따른 cross state와 bar state의 소멸비 계산 결과의 분석을 통하여 30dB 이상의 높은 소멸비를 보이며 큰 제작 공차를 얻기 위한 수직 방향성 결합 스위치의 설계 지침을 제시하였다.

Abstract

Fused vertical directional coupler switches (FVCSs) with switching operation induced section (SOIS) and extinction ratio enhanced section (ERES) are proposed. In these FVCSs, switching operation is achieved by changing the refractive indices of both cores in SOIS and improvement of extinction ratios larger than 30dB for both cross and bar states is achieved by controlling the asymmetry of refractive indices between both cores in ERES. In addition, the design guidelines to have high extinction ratios larger than 30dB with large tolerances of the refractive index of cores are presented.

* 正會員, 電子通信研究院 超高速通信技術研究部 광패킷교환팀

(Optical Packet Switch Team, ETRI)

** 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 2000년도 대학기초연구지원사업, 2001년도 두뇌한국 21사업 및 광주과학기술원 초고속 광 네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의해 수행되었습니다.

接受日字: 2001年 3月8日, 수정완료일: 2001年 7月20日

I. 서론

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 작아야 하고 광 집회로에서 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 공

차를 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 서로 다른 기판에 제작된 ridge형 도파관을 붙이는 기술이기 때문에 입력단과 출력단의 각 포트들을 광섬유와 결합이 용이하도록 쉽게 분리할 수 있고, 결합길이가 짧고 제작 공차가 비교적 크기 때문에 많은 연구가 수행되어 왔다^[2-4]. $N \times N$ 스위칭 소자를 Baseline 구조를 이용하여 필요한 단위소자와 단수를 최소화하여 한 기판에 집적하는 경우 수평 방향성 결합기는 앞단의 스위칭 소자와 뒷단의 스위칭 소자의 연결 부분에서 도파로 사이에 교차 문제가 발생하여 집적화가 매우 어렵다^[5]. 그러나 퓨전을 이용한 수직 방향성 결합기는 결합 영역외의 영역을 공기로 분리하므로 교차 부분이 공기로 분리되어 두 도파로 모드 사이에 결합이 전혀 발생하지 않기 때문에 집적화가 가능하다. 또한 퓨전층의 조성비와 두께를 임의로 바꾸어 줄 수 있기 때문에 설계시 많은 자유도가 주어진다^[2-4].

최근 $100 \mu\text{m}$ 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 있음이 보고되었다^[6, 7]. 그러나 안쪽 클래딩과 도파로 코어의 굴절율을 캐리어 주입에 의하여 독립적으로 굴절율의 변화를 유도하기 위한 구조는 매우 복잡하여 공정의 난이도가 높다. 따라서 본 논문에서는 안쪽 클래딩의 굴절율 변화 없이 도파로 코어의 굴절율 변화만으로 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 스위칭 동작 유도 영역 (switching operation induced section, SOIS)과 소멸비 향상 영역 (extinction ratio enhanced section, ERES)으로 구성된 수직 방향성 결합기를 제안한다. 제안한 구조가 참고문헌 7의 스위칭 소자에 비하여 길이가 약 5배 길지만 이는 scability를 크게 하여 $N \times N$ 스위치로 집적화할 경우 단위 스위치간의 분리와 각 단간의 분리에 요구되는 길이가 이에 비하여 매우 크기 때문에 큰 고려의 대상이 되지 않는다.

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

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다중 영역으로 구성된 일반적인 융합된 수직 방향성 결합기에 대한 수식을 향상된 결합모드 이론과 전달행렬 방법을 이용하여 구하였다. 3장에서는 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 동작 원리와 특성에 대하여 설명을 하였다. 4장에서는 향상된 결합모드 이론과 BPM을 이용하여 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 동시에 얻을 수 있음을 보였다. 또한 30dB 이상의 소멸비를 가지는 공차가 큰 구조에 대한 설계 지침을 제시하였다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

II. 다중 영역으로 구성된 융합된 방향성 결합기의 전달행렬

그림 1에서와 같이 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 i 번째 영역에서의 필드의 관계를 나타내는 향상된 결합모드 이론에 의한 수식은 다음과 같다^[8].

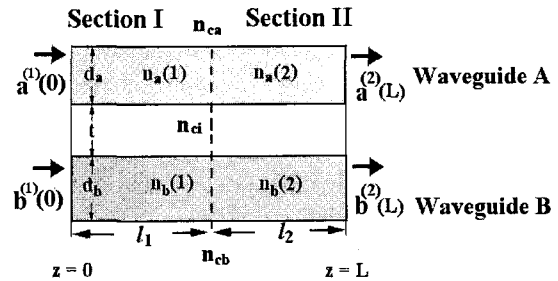


그림 1. 두 개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기의 개념도

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

$$\frac{d}{dz} a^{(i)}(z) = -i\gamma_{(a)}^{(i)} a^{(i)}(z) - ik_{ab}^{(i)} b^{(i)}(z) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} b^{(i)}(z) = -ik_{ba}^{(i)} a^{(i)}(z) - i\gamma_{(b)}^{(i)} b^{(i)}(z) \quad (2)$$

여기서 $a^{(i)}(z)$ 와 $b^{(i)}(z)$ 는 각각 i 번째 영역에서의 도파로 A와 도파로 B의 도파 모드의 필드 크기이며 $\gamma_{(a)}^{(i)}$, $k_{ab}^{(i)}$, $k_{ba}^{(i)}$, 그리고 $\gamma_{(b)}^{(i)}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \gamma_{(a)}^{(i)} &= \beta_a^{(i)} + \frac{K_{aa}^{(i)} - C_{(i)} K_{ba}^{(i)}}{1 - C_{(i)}^2}, \\ \gamma_{(b)}^{(i)} &= \beta_b^{(i)} + \frac{K_{bb}^{(i)} - C_{(i)} K_{ab}^{(i)}}{1 - C_{(i)}^2}, \\ k_{ab}^{(i)} &= \frac{K_{ab}^{(i)} - C_{(i)} K_{bb}^{(i)}}{1 - C_{(i)}^2}, \\ k_{ba}^{(i)} &= \frac{K_{ba}^{(i)} - C_{(i)} K_{aa}^{(i)}}{1 - C_{(i)}^2}, \\ K_{ab}^{(i)} &= \frac{\omega}{4} \iint \Delta \epsilon_{(i)} [E_{t,a}^{(i)} \cdot E_{t,b}^{(i)} - E_{z,a}^{(i)} \cdot E_{z,b}^{(i)}] dx dy, \\ C_{(i)} &= \frac{C_{ab}^{(i)} + C_{ba}^{(i)}}{2}, \\ C_{ab}^{(i)} &= \frac{1}{2} \iint E_{t,b}^{(i)} \times H_{t,a}^{(i)} \cdot \hat{z} dx dy, \\ C_{ba}^{(i)} &= \frac{1}{2} \iint E_{t,a}^{(i)} \times H_{t,b}^{(i)} \cdot \hat{z} dx dy, \end{aligned}$$

영역 2의 출력단에서의 두 도파모드의 크기 $a^{(2)}(L)$ 과 $b^{(2)}(L)$ 은 전달행렬에 의하여 다음과 같이 영역 1의 입력단에서의 두 도파모드의 크기 $a^{(1)}(0)$ 와 $b^{(1)}(0)$ 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} a^{(2)}(L) \\ b^{(2)}(L) \end{bmatrix} = T^{(2)} T^{(1)} \exp[-i(\phi^{(1)} + \phi^{(2)})] \begin{bmatrix} a^{(1)}(0) \\ b^{(1)}(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 i 번째 영역에서의 전달행렬 $T^{(i)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T^{(i)} = \begin{bmatrix} \cos \phi^{(i)} l^{(i)} + i \frac{\Delta}{\phi^{(i)}} \sin \phi^{(i)} l^{(i)} & -i \frac{k_{ab}^{(i)}}{\phi^{(i)}} \sin \phi^{(i)} l^{(i)} \\ -i \frac{k_{ab}^{(i)}}{\phi^{(i)}} \sin \phi^{(i)} l^{(i)} & \cos \phi^{(i)} l^{(i)} + i \frac{\Delta}{\phi^{(i)}} \sin \phi^{(i)} l^{(i)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $l^{(i)}$ 은 각 영역에서의 길이이며 $\phi^{(i)}$, $\phi^{(i)}$, 그리고 그 외의 다른 변수들은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \phi^{(i)} &= \frac{r_b^{(i)} + r_a^{(i)}}{2}, \\ \Delta^{(i)} &= \frac{r_b^{(i)} - r_a^{(i)}}{2}, \\ \psi^{(i)} &= \sqrt{\Delta^{(i)2} + k_{ab}^{(i)} k_{ba}^{(i)}}. \end{aligned}$$

따라서 각 영역의 출력단에서의 도파관 모드 A와 B의 출력 파워 $P_a^{(i)}$ 와 $P_b^{(i)}$ 는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다^[8].

$$P_a^{(i)} = Re[(a^{(i)}(l^{(i)} + C_{ab}^{(i)} b^{(i)}(l^{(i)}))(a^{*(i)}(l^{(i)} + C_{ba}^{*(i)} b^{*(i)}(l^{(i)}))] \quad (5)$$

$$P_b^{(i)} = Re[(C_{ba}^{(i)} a^{(i)}(l^{(i)} + b^{(i)}(l^{(i)}))(C_{ab}^{*(i)} a^{*(i)}(l^{(i)} + b^{*(i)}(l^{(i)}))] \quad (6)$$

여기서 $C_{ab}^{(i)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ab}^{(i)} = \frac{1}{2} \iint E_{t,b}^{(i)} \times H_{t,a}^{(i)} \cdot \hat{z} dx dy \quad (7)$$

여기서 $E_{t,b}^{(i)}$ 는 영역 i 의 도파로 B의 도파모드의 횡방향으로의 전기장이며 $H_{t,a}^{(i)}$ 는 영역 i 의 도파로 A의 도파모드의 횡방향으로의 자기장이다. 각 영역의 끝단에서의 소멸비는 $P_a^{(i)}$ 와 $P_b^{(i)}$ 의 비이다.

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

참고문헌 6과 7의 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 굴절률 값이 다른 비대칭형 결합기(asymmetric coupler)의 조합에 의하여 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 얻을 수 있음을 알았다. Cross state의 소멸비는 단일 영역으로 구성된 비대칭형 결합기를 사용하여 향상시킬 수 있었다. Bar state의 소멸비는 두개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 앞 영역은 비대칭형 결합기로, 뒤 영역은 대칭형 결합기로 (또는 반대 순서)로 구성하면 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있었다. 이러한 사실로부터 두개의 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기에서 앞 영역은 대칭형 결합기로 뒤 영역은 비대칭형 결합기로 구성하면 cross state와 bar state가 모두 30dB 이상의 소멸비를 가지도록 할 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 고려하는 강하게 결합된 대칭형 수직 방향성 결합기의 경우 cross state와 bar state의 소멸비는 보통 13dB에서 18dB의 값을 가진다. 영역 1의 대칭형 결합기가 cross state와 bar state에 대하여 이러한 소멸비를 가지는 경우 영역 2에서 코어 굴절률의 비대칭의 크기를 조절하여 bar state와 cross state 모두 30dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있다. 따라서 스위칭 동작과 소멸비 개선을 위해서 굴절률을 변화시켜야 하는 층의 수를 줄이기 위하여 수직 방향성 결합기를 다음과 같이 두개의 영역으로 구성할 수 있다. 앞단

(SOIS)은 대칭형 결합기로서 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 cross state와 bar state의 코어 굴절율은 변화 가능한 코어 굴절율의 최대값과 최소값을 가지도록 설계하여야 한다. 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 굴절율보다 작도록 설정한다. 스위칭 동작시 SOIS와 ERES 영역의 굴절율의 차이가 크면 모드 부정합이 발생한다. 이러한 모드 부정합을 줄이고 ERES영역에서 스위칭 동작을 위한 굴절율 변화를 줄이기 위해 ERES 영역의 굴절율을 SOIS 영역의 cross state와 bar state 코어 굴절율의 평균값으로 설정하여 설계하여야 한다. 이와 같이 설계하면 cross state와 bar state가 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 ERES의 코어 굴절율의 비대칭 값이 같게되어 두 state의 ERES의 길이가 정확하게 일치하는 장점이 있다. 참고문헌 7에서는 스위칭 동작 유도를 위하여 인쪽 클래딩 층의 굴절율을 변화시키고 또 소멸비 향상을 위하여 두 코어의 굴절율을 변화시키어야 하였다. 그러나 본 논문에서와 같은 방법으로 스위치를 설계하면 인쪽 클래딩의 굴절율의 변화 없이 코어만의 굴절율 변화로 동일한 특성을 얻을 수 있다.

그림 2 (a)는 입력단과 출력단에서의 각 포트들이 분리된 융합된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 개념도이고 (b)는 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 1차원 개념도이다. SOIS에서는 bar state에서 cross state (또는 반대의 경우)로의 천이가 두 코어 굴절율 변화에 의하여 이루어진다. SOIS에서는 18dB 이하의 낮은 소멸비를 보이지만 ERES에서의 도파로 코어의 굴절율의 변화에 의한 굴절율의 비대칭에 의하여 30dB 이상의 소멸비를 얻는다.

IV. 계산 결과 및 스위치 설계지침

그림 2에서와 같이 실제 소자 제작에 사용되는

ridge 도파로와 같은 2차원의 채널 광도파로는 유효굴절율 방법을 사용하여 슬랩 형태의 1차원 광도파로로 단순화할 수 있으므로 본 논문에서는 1차원 광도파로에 대하여 계산을 수행하였다^{6,7}. TM 모드의 경우는 도파로에 강급되는 파워의 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 결합길이나 소멸비 및 굴절율의 공차에 대한 계산을 수행하였다. 계산에 사용한 파라메타 값들은 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.

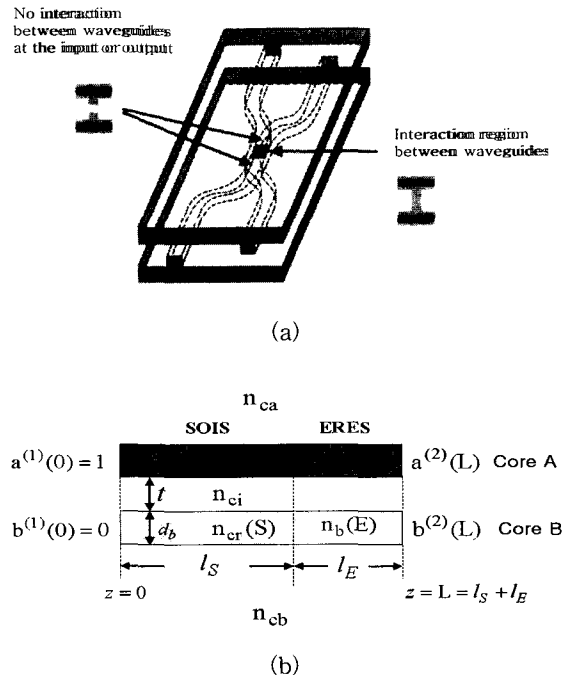


그림 2. (a) 입력단과 출력단에서의 각 포트들이 분리된 융합된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 개념도 (b) 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치에 대한 1차원 개념도

Fig. 2. (a) Schematic diagram of fused vertical coupler switches with separated input and output waveguides. (b) Schematic diagram of one dimensional index profile in the straight interaction regions of fused vertical coupler switches with switching operation induced section and extinction ratio enhanced section.

그림 3은 안쪽 클래딩의 두께가 0.6 μm 일때 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이이다. 같은 영역의 끝단에서 cross state와 bar state를 모두 얻기 위해서는 cross state와 bar state의 결합길이 또는 두 state의 결합길이의 배수가 같아야 하며 이 길이가 그 영역의 물리적 길이 (소자길이)가 된다. 따라서 SOIS의 길이는 $(m-1)l_c |n_{cr(S)}|_{Max} = m l'_c |n_{cr(S)}|_{Min}$ 의 조건으로부터 결정된다. m이 홀수이면 l_c 와 l'_c 는 각각 SOIS에서 bar state와 cross state의 결합길이(소자 전체로 보면 cross state와 bar state)이며 m이 짝수이면 l_c 와 l'_c 는 각각 SOIS에서 cross state와 bar state의 결합길이이다. $n_{cr}(S)$ 는 SOIS 영역에서의 두 코어 굴절율 값으로 결합길이 l_c 가 l'_c 보다 크기 때문에 l_c 의 결합길이를 가지는 경우의 두 코어 굴절율이 l'_c 의 결합길이를 가지는 경우의 두 코어 굴절율 보다 크다. 이러한 조건으로부터 SOIS의 물리적 길이가 결정되며 cross state 일 때와 bar state의 각 코어의 굴절율이 결정된다.

수직 방향성 결합 스위치 설계시 기본적으로 고려해야 하는 제약조건은 전류 주입이나 전압인가에 의하여

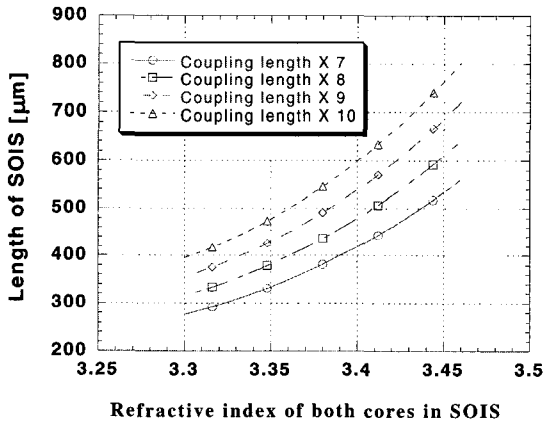


그림 3. 안쪽 클래딩의 두께가 0.6 μm 일때 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이에 배수를 취한 SOIS의 길이

Fig. 3. Length of SOIS as a function of refractive index of both cores for various multiples of coupling length in switching operation induced section of vertical directional couplers with the thickness of inner cladding layer of 0.6 μm .

변화 가능한 굴절율 값이다. 이러한 제약 조건 내에서 SOIS의 길이와 각 영역의 코어 굴절율 값을 결정하기 위하여 결합길이의 배수로 계산된 SOIS의 길이간의 굴절율 차이를 계산하여 그림 3에 보였다. 여기서 $n_{cr,i}$ 는 결합길이 i배 (SOIS의 길이)가 370, 380, 390 그리고 400 μm 일때의 SOIS 영역에서의 두 코어의 굴절율 값이다. 따라서 그림 4에서 $\Delta n_{cr,i} = n_{cr,i} - n_{cr,i+1}$ 는 여러 SOIS의 길이에 대하여 스위치 동작에 필요한 SOIS 영역의 두 코어의 굴절율 변화 값이다.

변화 가능한 굴절율의 값을 1% 이하로 가정을 하였으므로 그림 4에서 $\Delta n_{cr,i}$ 가 0.03 이하가 되는 영역이 스위치 설계가 가능한 영역이 된다. 그림 4의 계산 결과로부터 SOIS의 길이와 $\Delta n_{cr,i}$ 를 결정하면 양쪽 코어의 굴절율이 결정된다. 한 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 그림 4에서 결합계수의 배수를 8로 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 cross state 일때와 bar state 일때의 SOIS 영역의 두 코어의 굴절율은 각각 3.3424와 3.3118 이다. 따라서 스위칭 동작 유도를 위한 SOIS에서의 cross state와 bar state 사이의 굴절율 값의 차이는 0.03이다.

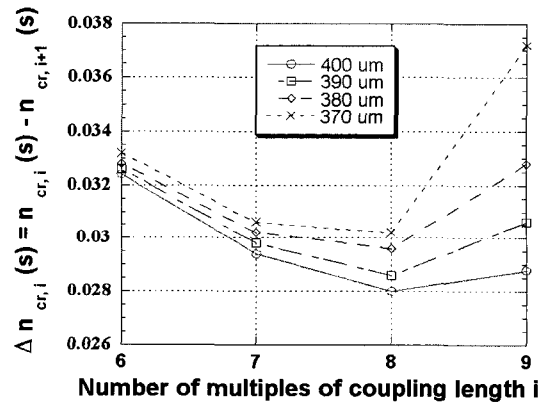


그림 4. 안쪽 클래딩의 두께가 0.6 μm 일 때 여러 SOIS의 길이에 대하여 스위칭 동작 유도에 필요한 두 코어 굴절율의 변화 값, $\Delta n_{cr,i} = n_{cr,i} - n_{cr,i+1}$

Fig. 4. Refractive index change of cores for switching operation, $\Delta n_{cr,i} = n_{cr,i} - n_{cr,i+1}$, for various lengths of switching operation induced section with the thickness of inner cladding layer of 0.6 μm .

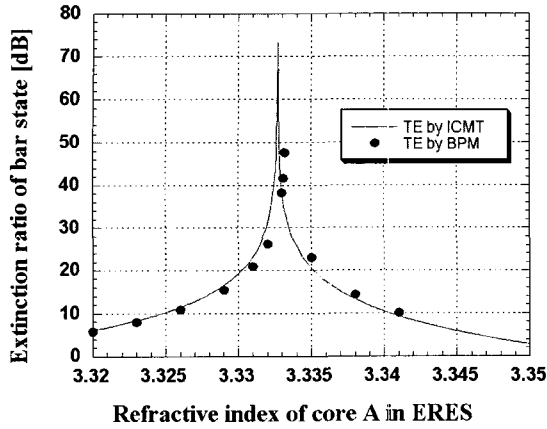


그림 5. SOIS의 입력단의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6 \mu\text{m}$ 이고, SOIS의 두 코어의 굴절율은 3.3118, ERES의 코어 B의 굴절율이 3.3271, SOIS의 길이가 $370 \mu\text{m}$ 일 때의 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 bar state의 소멸비

Fig. 5. Extinction ratio of bar state as a function of refractive index of core A in ERES with the thickness of inner cladding layer of $0.6 \mu\text{m}$, the refractive indices of both cores in SOIS of 3.3118 and core B in ERES of 3.3271, and the SOIS length of $370 \mu\text{m}$.

그림 5는 SOIS의 입력단의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6 \mu\text{m}$ 이고, SOIS의 두 코어의 굴절율은 3.3118, ERES의 코어 B 굴절율이 3.3271이고, SOIS의 길이가 $370 \mu\text{m}$ 일 때의 bar state의 소멸비를 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 결과이다. 여기서 ERES의 코어 B의 굴절율 값은 앞 절에서 설명한 설계 지침에 의하여 bar state의 SOIS의 코어 굴절율 값 3.3118과 cross state의 SOIS의 코어 굴절율 값 3.3424의 평균값으로 설정하였다. ERES에서는 코어 B에서 빛이 입사하므로 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위해서는 ERES의 코어 A의 굴절율이 코어 B의 굴절율 보다 큰 값을 가지는 비대칭 구조이어야 하는 것을 확인 할 수 있었으며 최대 소멸비를 가지는 코어 A의 굴절율은 3.3327로 코어 B의 굴절율과의 차이는 0.0056 이었다. 30dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 A의 굴절율의 공차는 최대 소멸비를 보이는 굴절율 값을 중심으로 약 0.0016 이다.

그림 6은 SOIS의 입력단의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6 \mu\text{m}$ 이고, SOIS의

두 코어의 굴절율이 3.3424이고, ERES의 코어의 굴절율이 3.3271이고, SOIS의 길이가 $370 \mu\text{m}$ 일 때 cross state 일 때의 소멸비를 ERES의 코어 B의 굴절율의 함수로 계산한 결과이다. 앞에서 언급하였듯이 cross state의 경우도 SOIS의 코어 굴절율의 값에 관계없이 독립적으로 ERES의 두 코어 굴절율의 비대칭을 이용하여 소자 끝단에서 높은 소멸비를 얻을 수 있다. 30dB 이상의 소멸비를 보이는 ERES의 코어 A의 굴절율의 공차도 bar state와 비슷하게 약 0.0016 임을 알 수 있다.

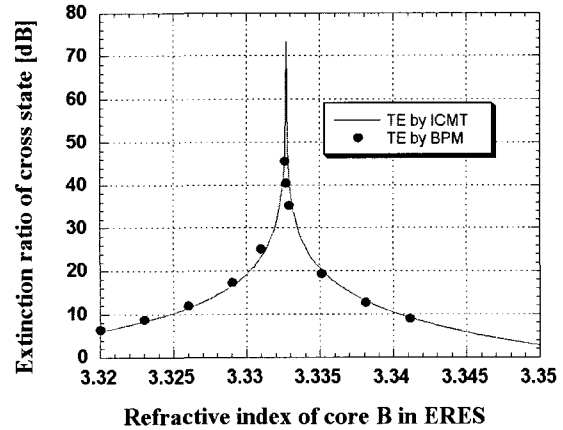


그림 6. SOIS의 입력단의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우 안쪽 클래딩의 두께가 $0.6 \mu\text{m}$ 이고, SOIS의 두 코어의 굴절율이 3.3424, ERES의 코어 A의 굴절율이 3.3271이고, SOIS의 길이가 $370 \mu\text{m}$ 일 때 ERES의 코어 A의 굴절율의 함수로 계산한 cross state의 소멸비

Fig. 6. Extinction ratio of cross state as a function of refractive index of core A in ERES with the thickness of inner cladding layer of $0.6 \mu\text{m}$, the refractive indices of both cores in SOIS of 3.3424 and core A in ERES of 3.3271, and the SOIS length of $370 \mu\text{m}$.

그림 7은 지금까지의 계산 결과를 바탕으로 설계한 SOIS와 ERES로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치 설계의 한 예이다. 앞에서 설명한 스위치 설계 지침에 의하여 cross state와 bar state의 SOIS의 길이가 정확하게 일치하도록 코어 굴절율 값을 설정하였다. Cross state와 bar state의 결합세기가 같고 SOIS의 소멸비가 거의 같은 값을 가지므로 30dB 이상의 소멸비를 가지기 위한 cross state와 bar state에 대한 ERES의 두 코어의 굴절율의 비대칭 값이 같다. 따라

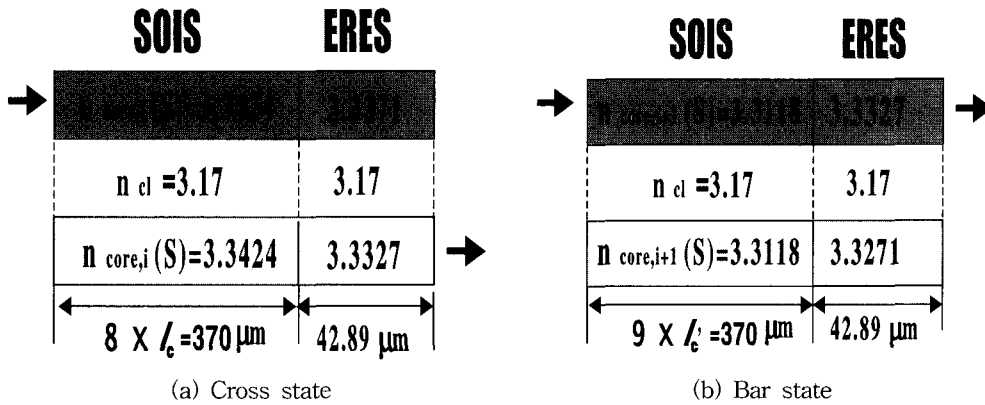


그림 7. SOIS와 ERES로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치의 설계의 예
 Fig. 7. Design example of vertical directional coupler switch with SOIS and ERES.

서 cross state와 bar state의 ERES의 길이가 정확하게 일치하여 전체적으로 두 state의 소자길이가 정확하게 일치하도록 설계할 수 있음을 알 수 있다.

SOIS와 ERES로 구성된 수직 방향성 결합 스위치의 보다 체계적인 설계 지침을 얻기 위하여 다음과 같은 계산을 수행하였다. 표 1은 SOIS의 길이가 $390 \mu\text{m}$ 일 때 여러 개의 안쪽 클래딩의 두께에 대하여 ERES 영역의 두 코어 굴절율 값의 최적화 비대칭 (optimum asymmetry)-최대의 소멸비 값을 얻을 수 있는 두 코어 사이의 굴절율 값의 차이-와 30dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차에 대한 계산 결과를 정리한 것이다. 여기서 $n_{cr}(S)$ 는 SOIS의 코어의 굴절율

값이고 $\Delta n_{cr}(S) = |n_{cr}(S)_{cross} - n_{cr}(S)_{bar}|$ 은 스위칭 동작 유도를 위해 필요한 SOIS의 코어의 굴절율의 변화 값이고, $n_{asy}(E)$ 는 ERES에서 두 코어의 굴절율 값의 최적화 비대칭이고, $\delta n_{cr} > 30dB$ 는 30dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차이다. 표 1은 수식 $(m-1)l_c |n_{cr}(S)_{Max} - n_{cr}(S)_{Min}| = m l_c |n_{cr}(S)_{Max} - n_{cr}(S)_{Min}|$ 를 만족하고 그리고 $n_{cr}(S)_{Max} - n_{cr}(S)_{Min} = \Delta n_{cr}(S)$ 가 1%이하 일 때 가능한 여러 코어 굴절율 값들에 대한 계산 결과이다. 표 1에서 m은 결합길이의 배수이다. 코어의 굴절율이 작으면 코어에 강금되는 파워비가 작아지기 때문에 코어의 굴절율 변화에 따른 전파 상수의 변화가 작아진다. 따

표 1. SOIS의 길이가 $390 \mu\text{m}$ 인 경우 여러 안쪽 클래딩의 두께에 대해서 계산한 스위칭에 필요한 SOIS 영역의 코어 굴절율의 변화와 ERES 영역의 두 코어 사이의 굴절율 값의 최적화 비대칭과 공차

Table 1. 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 $390 \mu\text{m}$ for various thicknesses of inner cladding layer.

t [μm]	SOIS의 길이 [μm]	$\Delta n_{cr}(S)$	Bar state(SOIS)		Cross state(SOIS)		(ERES)	
			m	$n_{cr}(S)$	m	$n_{cr}(S)$	$\delta n_{cr} > 30dB$	$n_{asy}(E)$
0.4	390	0.0282	13	3.4232	14	3.3950	0.0021	0.0065
		0.0286	13	3.4232	12	3.4518	0.0019	0.0049
		0.0299	11	3.4817	12	3.4518	0.0017	0.0036
0.5	390	0.0292	11	3.3566	12	3.3274	0.0019	0.0076
		0.0284	11	3.3566	10	3.385	0.0016	0.0048
		0.029	9	3.4140	10	3.385	0.0014	0.0037
0.6	390	0.0306	9	3.3262	10	3.2956	0.0017	0.0073
		0.0286	9	3.3262	8	3.3548	0.0014	0.0046
		0.0298	7	3.3846	8	3.3548	0.0012	0.0029

라서 두 코어의 굴절율이 작은 경우가 30dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차가 더 큰 것을 볼 수 있다. 반면, 코어 굴절율이 작을수록 두 코어는 강하게 결합되어 최적화 비대칭, $n_{asy}(E)$, 는 증가하는 것을 볼 수 있다.

스위칭 동작 유도를 위한 SOIS에 대한 표 1의 계산 결과를 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 코어간에 강하게 결합되어 SOIS의 길이를 같게 만들어주는 코어의 굴절율은 증가한다.

계산 결과로부터 ERES에서의 두 코어의 굴절율 값의 최적화 비대칭 n_{asy} 는 가정한 코어 굴절율의 변화 값(0.03) 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 30dB 이상의 소멸비를 보이는 공차는 증가한다.

IV. 결 론

스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기를 제안하였다. 스위칭 동작 유도 영역에서는 두 코어의 굴절율을 변화시키어 cross state와 bar state의 스위칭 동작을 유도하였으며, 소멸비 향상 영역에서의 코어 굴절율의 비대칭을 조절하여 소자의 끝단에서 30dB 이상의 소멸비를 가지는 cross state와 bar state를 얻을 수 있었다. 두 코어의 굴절율의 비대칭 값이 0.03보다 크지 않는 범위 내에서 안쪽 클래딩의 두께는 작게, 두 코어의 굴절율 값은 작게 설정하여 스위치를 설계하면 큰 제작 공차를 얻을 수 있음을 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] Max Ming-Kang Liu, *Principles and applications of optical communications*, IRWIN, Chicago, 1996.
- [6] Sung-Chan Cho, Boo-Gyoun Kim, 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.
- [7] 조성찬, 설종철, 김부균, "두 개의 영역으로 구성된 매우 짧은 길이를 가지는 융합된 수직 방향성 결합 스위치 설계," 대한전자공학회논문지D편, 제37권, 10호, 794-820쪽, 2000
- [8] S. L. Chuang, *Physics of Optoelectronic Devices*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

저 자 소 개

趙 成 贊(正會員) 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. 2000년 9월~현재 전자통신연구원 네트워크연구소 광패킷교환팀. 주관심 분야: 광패킷 교환, 광 버스트 스위치 및 광교환용 광소자 등임

鄭 炳 珉(正會員)

2000년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 2000년 3월~현재 숭실대학교 전자공학과 석사과정. 주관심 분야: 광통신 및 광네트워크용 소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

金 富 均(正會員) 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. 주관심 분야: 광통신 및 광네트워크용 소자, 광통신 시스템 및 광네트워크 등임