

편광에 관계없이 매우 높은 소멸비와 짧은 길이를 가지는 수직 방향성 결합기 스위치

정병민 · 김부균[†]

승실대학교 정보통신전자공학부
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도 5동 1-1

(2004년 7월 28일 받음, 2004년 10월 21일 수정본 받음)

편광에 무관한 결합길이를 가지는 double-sided deep-ridge (DSDR) 도파관 구조의 수직 방향성 결합기를 이용하여 대칭형 구조를 가지는 스위칭 동작 유도 영역과 비대칭형 구조를 가지는 소멸비 향상 영역으로 구성된 수직 방향성 결합기 스위치를 제안하였다. 이러한 구조를 이용하여 짧은 길이를 가지며 편광에 관계없이 크로스 상태와 바 상태에서 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 스위치를 설계하는 방법과 설계 예를 제시하였다.

주제어 : Vertical directional coupler switch, Deep Ridge Waveguide, Double Sided Process, Polarization independent high extinction ratios, Coupling length.

I. 서 론

고속의 광통신망을 구축하기 위해서는 대용량의 광 스위칭 시스템이 요구된다. 이러한 집적된 대용량의 광 스위칭 시스템을 구성하는 단위 스위치는 작은 크기, 작은 손실, 높은 소멸비 등과 같은 특성을 가지고 있어야 한다. 또한 편광에 따른 성능의 변화가 작아야 하고 광 집적회로에서 발생하는 손실 보상을 위해 광 증폭기를 집적시킬 수 있어야 한다.^[1-3]

위와 같은 특성들을 구현하기 위하여 스위칭 동작 유도 영역(switching operation induced section, SOIS)과 소멸비 향상 영역(extinction ratio enhanced section, ERES)으로 구성된 융합 수직 방향성 결합기 스위치(Fused Vertical Coupler Switch, FVCS)가 제안되었다.^[4] 이러한 구조의 장점은 코어의 굴절률 변화를 변화만으로 매우 짧은 소자 길이를 가지고 크로스와 바 상태 모두에서 30 dB 이상의 매우 높은 소멸비를 얻을 수 있다는 것이다. 그러나 제안된 FVCS 구조는 코어 영역이 slab 형태로 이루어진 도파관 구조를 이용하기 때문에 편광에 따라 성능이 변화하는 단점을 가지고 있다. 또한 소자 구현 시 두 개의 분리된 도파관의 ridge 부분을 정확하게 융합시켜야 하는 제작과정의 어려움이 있다.^[2,3] 현재까지 융합 수직 방향성 결합기 구조를 이용하여 구현한 소자로는 파장 다중화기^[5], 광 add/drop multiplexer^[6], 와 융합 수직 방향성 결합기 필터 및 스위치^[7] 등이 있다.

최근에 우리는 편광에 따른 성능 변화가 작은 deep-ridge 도파관 구조^[8-11]에 제작이 용이한 double-sided wafer 프로세스^[12]를 이용하여 구현 가능한 Double-Sided Deep-Ridge(DSDR) 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기(DSDR 수직 방향성 결합기)를 제안하였고 굴절률 및 구조 파라미터들이 결합

길이와 소멸비 향상에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.^[13,14] DSDR 수직 방향성 결합기는 굴절을 변화에 따른 편광 특성의 변화가 구조 파라미터의 변화에 따른 편광 특성의 변화보다 작기 때문에^[8,14] 편광에 관계없이 같은 결합길이를 가지는 DSDR 수직방향성 결합기의 구조 파라미터에서는 코어의 굴절을 변화에 따른 편광 특성의 변화가 매우 작음을 알 수 있었다.^[14]

본 논문에서는 편광에 따른 성능 변화가 작은 DSDR 수직 방향성 결합기를 사용하여 코어의 굴절을 변화만으로 매우 짧은 길이를 가지며 크로스와 바 상태 모두에서 편광에 관계없이 30 dB 이상의 높은 소멸비를 가지는 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기 스위치(DSDR 수직 방향성 결합기 스위치)를 제안하고 소자 특성에 대한 연구 결과를 발표하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 매우 짧은 길이를 가지며 크로스와 바 상태 모두에서 편광에 관계없이 30 dB 이상의 높은 소멸비를 얻을 수 있는 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 구조를 제시하고 동작 원리를 설명한다. 3장에서는 매우 짧은 길이를 가지는 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 끝단에서 크로스와 바 상태 모두에서 편광에 관계없이 30 dB 이상의 소멸비를 동시에 얻을 수 있는 설계 방법을 제시하고 또한 Beam propagation method(BPM) 방법을 이용하여 그러한 특성을 가지는 설계 예를 보인다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기 스위치

그림 1은 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 3차원 개념

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

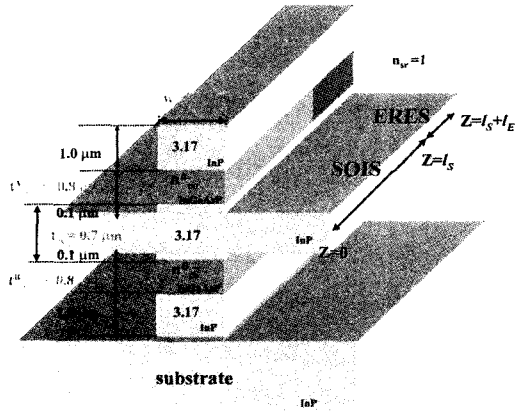


그림 1. DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 3차원 개념도.

도이다. 이 구조는 융합 수직 방향성 결합기 스위치 구조와 비교하였을 때 두 ridge 부분을 융합시키는 과정이 없기 때문에 제작과정이 비교적 쉽고 또한 융합 층이 도파 모드의 결합 영역으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 융합 층이 도파 모드의 특성에 미치는 영향이 실질적으로 거의 없다는 장점

을 가지고 있다.^[12] 또한 이 구조의 내부 클래딩 영역에는 코어의 폭보다 더 큰 폭을 가지는 영역-날개구조부(wing) 영역이 존재하고 있다. 이러한 날개구조부 영역이 존재하지 않는 경우-DSDR 수직 방향성 결합기를 구성하는 모든 영역이 같은 폭을 가지는 경우에는 편광에 무관한 결합길이를 가지는 구조 파라미터와 물질 파라미터가 존재하지 않게 된다. 날개구조부 폭이 특정 길이 이상이 되면 날개구조부 폭 증가에 따른 TE 모드와 TM 모드의 결합길이의 변화는 거의 없으며 또한 두 모드의 결합길이의 차이도 거의 발생하지 않게 된다.^[15]

그림 1과 같은 DSDR 수직 방향성 결합기는 double-sided wafer 프로세스를 사용하여 다음과 같은 제작 과정에 의하여 구현될 수 있으리라 생각된다. 먼저 그림 2(a)와 같이 기판 위에 구현하고자 하는 InP와 InGaAsP의 층들을 차례로 성장시킨다. 그 후 그림 2(b)와 같이 날개 구조부의 밑에 존재하는 deep-ridge 도파관 구조를 식각에 의하여 형성한다. 다음에 이러한 구조를 뒤집어 다른 host 기판과 융합시킨다. 마지막으로 위의 기판을 제거한 후 날개 구조부의 위에 존재하는 deep-ridge 도파관 구조를 식각에 의하여 형성한다. 이와 같

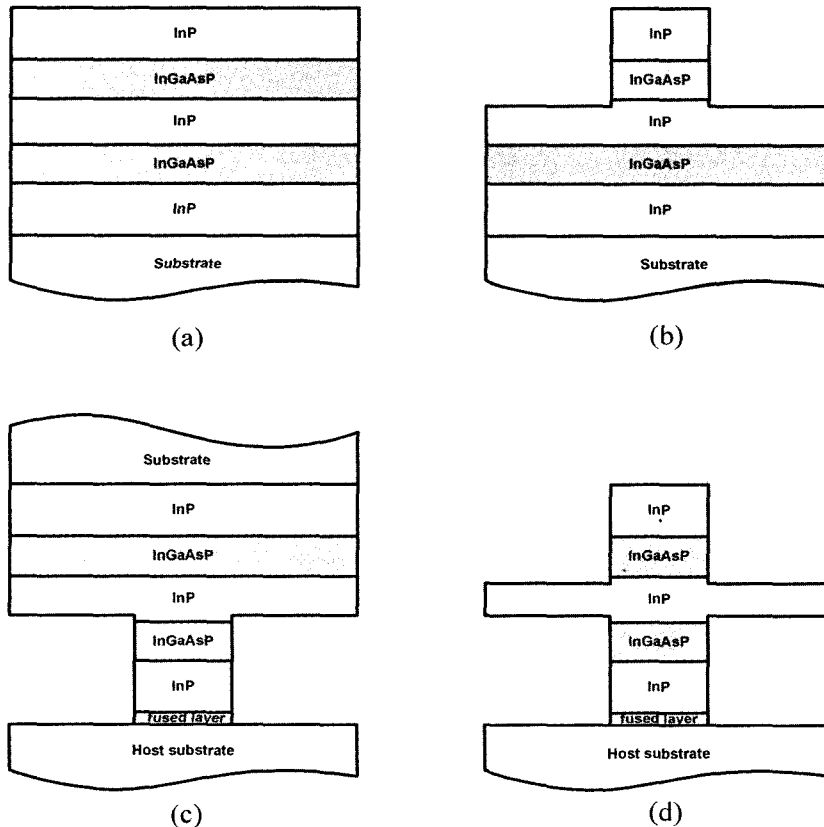


그림 2. 그림 1과 같은 DSDR 수직 방향성 결합기 제작 과정 개념도.

- (a) 기판위에 구현하고자 하는 InP 층과 InGaAsP 층 들을 차례로 성장시킨 구조
- (b) 날개구조부 밑에 존재하는 deep-ridge 도파관 구조를 식각에 의하여 형성시킨 구조
- (c) (b)의 구조를 뒤집어 다른 host 기판 위에 융합시킨 구조
- (d) 위의 기판을 제거한 후 식각에 의하여 날개구조부 위에 존재하는 deep-ridge 도파관 구조를 형성시킨 구조

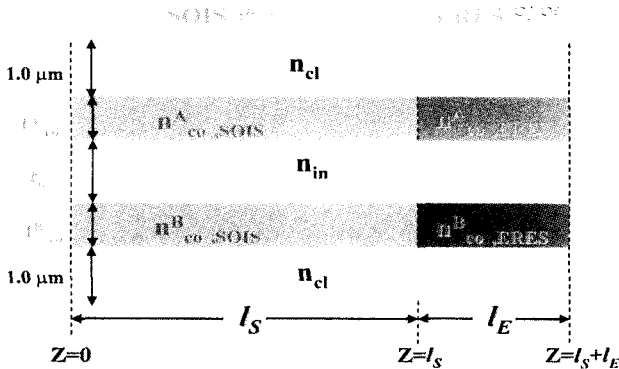


그림 3. 스위칭 동작 유도 영역과 소멸비 향상 영역으로 구성된 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 1차원 측면도.

은 과정을 거치면 그림 1과 같은 DSDR 수직 방향성 결합기가 구현되어질 수 있으리라 생각된다.

제안된 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 특성 해석을 위하여 사용된 구조 및 물질 파라미터는 DSDR 수직 방향성 결합기 특성 연구 결과를 바탕으로 다음과 같이 설정하였다. 바깥쪽 클래딩의 두께는 $1 \mu\text{m}$, 도파관 A와 도파관 B의 코어의 두께, t_{co}^A 와 t_{co}^B , 는 $0.8 \mu\text{m}$, 내부 클래딩의 두께, t_{in} , 는 $0.7 \mu\text{m}$, 그리고 도파관 폭, w , 은 $1.30 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 또한 도파관 A와 도파관 B의 바깥쪽 클래딩의 굴절율, n_{cl}^A 와 n_{cl}^B , 그리고 내부 클래딩의 굴절율, n_{in} 은 3.17로, 도파관을 둘러싸고 있는 물질의 굴절율, n_{sr} 은 공기의 굴절율인 1로 설정하였다. 또한 사용된 파장은 $1.55 \mu\text{m}$ 이다.

DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 동작 원리는 융합 수직 방향성 결합기 스위치의 동작 원리와 유사하다.^[4] DSDR 수직 방향성 결합기 스위치는 융합 수직 방향성 결합기 스위치처럼 스위칭 동작 유도 영역(switching operation induced section, SOIS)과 소멸비 향상 영역(extinction ratio enhanced section, ERES)으로 구성된다. SOIS 영역과 ERES 영역으로 구성된 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 1차원 측면도를 그림 3에 보인다. 대칭형 결합기 구조를 가지는 SOIS 영역에서 두 코어의 굴절율을 변화시키면 결합길이가 달라진다. 코어 굴절율 1에 의하여 발생하는 결합길이의 짝수 배와 코어 굴절율 2에 의하여 발생하는 결합길이의 홀수 배가 SOIS 영역과 같은 길이를 가지면 SOIS 영역에서는 코어 굴절율 변화만으로 스위칭 작용이 발생한다. 그러나 매우 짧은 결합 길이를 가지는 대칭형 수직 방향성 결합기는 높은 소멸비를 가질 수 없다는 단점을 가지고 있다.^[14]

따라서 광 스위치의 소멸비를 향상시키기 위하여 SOIS 영역의 출력단에 그림 3에서 보는 것처럼 비대칭형 구조의 ERES 영역을 연결한다. ERES 영역은 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 코어의 굴절율이 SOIS 영역의 출력이 입사하는 코어의 굴절율보다 약간 크도록 설정해 주어 두 코어를 따라 진행되는 광파의 간섭 효과에 의해 크로스 상태와 바 상태 모두에 대하여 ERES 영역에서 같은 결합길이를 가지며 30 dB 이상의 매우 높은 소멸비를 얻을

수 있도록 하는 역할을 수행한다.^[14,13,14] 따라서 그림 1과 같이 SOIS 영역과 ERES 영역으로 구성된 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치는 짧은 길이를 가지며 크로스와 바 상태 모두에서 편광에 관계없이 30 dB 이상의 소멸비를 동시에 얻을 수 있게 된다.

III. 편광에 관계없이 크로스 상태와 바 상태에서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 수직 방향성 결합기 스위치

그림 4는 그림 1과 같은 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 SOIS 영역에서 TE 모드와 TM 모드 각각에 대하여 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 결합길이와 결합길이의 배수를 취한 SOIS 영역의 길이를 보여주고 있다. 두 코어의 굴절율이 3.32에서 3.42까지 변화하는 동안 TE 모드와 TM 모드의 결합 길이 차이, $2|l_{c,TE} - l_{c,TM}| / (l_{c,TE} + l_{c,TM})$, 는 1.7% 이내로 매우 작음을 알 수 있다. 두 코어 굴절율의 변화에 따른 결합길이의 변화는 예상대로 TE 모드가 TM 모드보다 약간 큰 것을 볼 수 있고 두 코어 굴절율이 3.37일 때 두 모드의 결합길이는 정확히 일치함을 볼 수 있다. 소멸비 향상을 위하여 사용되는 ERES 영역의 길이는 결합길이에 해당되므로 스위치의 출력단에서 바(크로스) 상태를 얻기 위해서는 SOIS 영역의 길이가 TE 모드와 TM 모드의 결합길이의 홀수(짝수)배가 되어야 한다. 또한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이의 홀수 배의 길이와 짝수 배의 길이가 같아지는 SOIS 영역의 코어의 굴절을 값이 존재해야 한다.

따라서 SOIS 영역의 길이 및 바 상태와 크로스 상태를 얻기 위한 SOIS 영역의 코어의 굴절율은 $(m-1)l_c / n(S) = m l_c' / n(S)$ 의 조건으로부터 결정된다. m 이 짝수(홀수)이면 l_c 와 l_c' 는 각각 바(크로스) 상태와 크로스(바) 상태의 결합길이이다. $n(S)$ 와 $n(S)'$ 는 SOIS 영역에서의 두 코어 굴절을 값으로 결합길이 l_c 가 l_c' 보다는 항상 크기 때문에 l_c 의 결합길이를

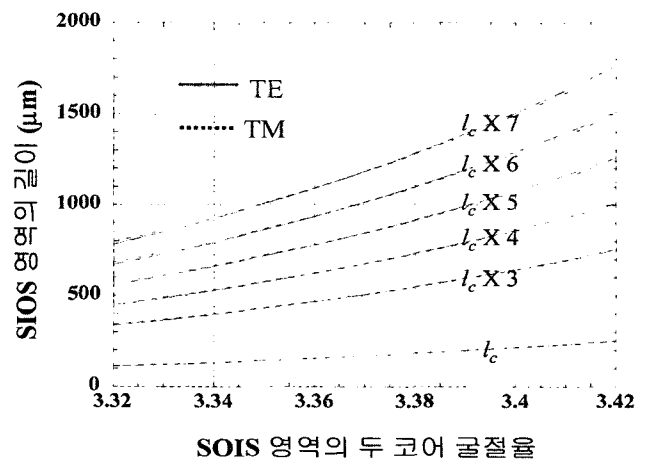
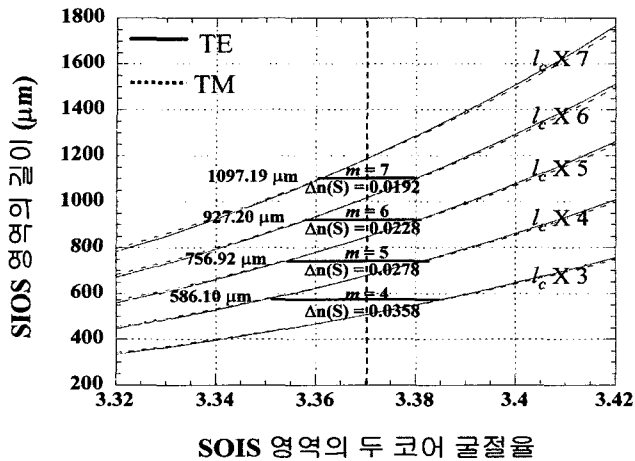


그림 4. 두 코어의 굴절율의 함수로 계산한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이와 결합길이에 배수를 취한 SOIS 영역의 길이.



SOIS 영역의 두 코어 굴절율

그림 5. 결합길이의 배수에 따른 스위칭 동작 유도에 필요한 두 코어 굴절율의 변화 값, $\Delta n(S)$.

를 가지는 경우의 두 코어 굴절율, $n(S)$, 이 l_c' 의 결합길이를 가지는 경우의 두 코어 굴절율, $n(S)'$, 보다 항상 크다. 이러한 조건으로부터 SOIS 영역의 물리적 길이가 결정되며 바 상태와 크로스 상태를 얻기 위하여 필요한 SOIS 영역의 코어의 굴절율이 결정된다.

구현 가능한 수직 방향성 결합기 스위치의 설계시 기본적으로 고려해야 하는 제약조건은 전류 주입이나 전압인가에 의하여 변화 가능한 굴절율 값이다. 변화 가능한 굴절율의 값을 1% 이하로 가정하면 크로스 상태와 바 상태의 천이를 위하여 필요한 굴절율의 변화, $\Delta n(S)$ 는 약 0.033 이하가 되도록 설계되어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 $\Delta n(S)$ 와 SOIS 영역의 길이, $(m-1)l_c |_{n(S)} = m l_c |_{n(S)}$ 를 결정하기 위하여 그림 5에 결합길이의 배수에 따른 스위칭 동작 유도에 필요한 코어 굴절율의 변화 값을 보인다. 두 코어 굴절율이 3.37일 때 두 모드의 결합길이는 정확히 일치하기 때문에 편광 특성이 최소화된 SOIS 영역의 길이를 구하기 위해서는 코어 굴절율이 3.37일 때를 중심으로 대칭적으로 코어 굴절율을 설정하여야 한다. 그림 5에서 보면 결합길이의 배수가 커질수록 바 상태와 크로스 상태의 천이를 위하여 필요한 굴절율의 변화, $\Delta n(S)$ 는 작아지고 반면에 SOIS 영역의 길이는 커짐을 볼 수 있다. 이 경우 최소의 SOIS 길이를 가지며 변화 가능한 굴절율 범위를 만족하는 $\Delta n(S)$ 는 0.0278이고 결합길이의 배수 m 은 5가 된다.

$\Delta n(S)$ 와 결합길이의 배수 m 이 결정되면 바 상태와 크로스 상태의 SOIS 영역에서의 코어의 굴절율이 결정된다. 그림 5의 경우에서, $\Delta n(S) = 0.0228$ ($\Delta n(S) = 0.0278$)이고 $m = 6$ ($m = 5$)인 경우 바 상태의 코어의 굴절율은 3.3814(3.3561)이고 크로스 상태의 코어의 굴절율은 3.3586(3.3839)이다. 이 때 바 상태를 얻기 위한 TE 모드와 TM 모드의 5(5)배의 결합길이는 각각 929.41 μm (755.63 μm)와 925.66 μm (758.20 μm)이고, 크로스 상태를 얻기 위한 TE 모드와 TM 모드의 6(4) 배의 결합길이는 각각 925.67 μm (758.67 μm)와 928.05 μm

(755.16 μm)이다. 따라서 SOIS 영역에서 발생하는 편광에 따른 특성 변화를 최소화하기 위하여 SOIS 영역의 길이는 바 상태의 TE 모드와 TM 모드의 5(5)배의 결합길리와 크로스 상태의 TE 모드와 TM 모드의 6(4)배의 결합길리의 평균값인 927.20 μm (756.92 μm)로 설정하였다.

위와 같은 길이와 굴절율을 가지는 SOIS 영역은 대칭형 구조를 가지므로 SOIS 영역의 출력단에서 광파의 소멸비는 작은 값을 가진다. 따라서 수직 방향성 결합기 스위치의 출력단에서 크로스 상태와 바 상태에서 TE 모드와 TM 모드가 모두 높은 소멸비를 가지기 위하여 SOIS 영역의 출력단에 비대칭형 구조를 가지는 ERES 영역을 연결한다. 이 때 SOIS 영역과 ERES 영역의 굴절율의 차이가 크면 모드 부정합이 발생한다. 이러한 모드 부정합 효과를 최소화하고 크로스 상태와 바 상태에서 TE 모드와 TM 모드의 소멸비 특성을 최적화하기 위하여, DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율을 SOIS 영역의 바 상태와 크로스 상태의 코어 굴절율의 평균값인 3.37로 설정하여야 한다.

표 1은 $\Delta n(S) = 0.0228$ ($\Delta n(S) = 0.0278$)이고 $m = 6$ ($m = 5$)인 경우, DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율이 3.37일 때, SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율을 변화시키면서 계산한 바 상태와 크로스 상태에서 TE 모드와 TM 모드의 소멸비 및 그러한 소멸비를 얻을 수 있는 스위치의 길이와, 4가지 경우에 모두 30 dB 이상과 20 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 스위치의 길이 영역을 보여준다. 예를 들어 $\Delta n(S) = 0.0228$ 이고 $m = 6$ 인 경우에 SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 3.3697, 스위치 소자 길이가 1097.78 μm 이면 바 상태의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비는 각각 34.8 dB와 31.5 dB이고 크로스 상태의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비는 각각 46.8 dB와 31.8 dB이다. 그리고 4가지의 경우 모두 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 스위치 소자 길이 영역은 1097.16 μm ~ 1098.40 μm 로 1.24 μm 임을 알 수 있었으며 20 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 스위치 소자 길이 영역은 1089.86 μm ~ 1105.92 μm 로 16.06 μm 임을 알 수 있었다. 또한 $\Delta n(S) = 0.0228$ 이고 $m = 6$ 인 경우에 SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 3.3698일 때와 $\Delta n(S) = 0.0278$ 이고 $m = 5$ 인 경우에 SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 3.3697일 때에도 4가지의 경우 모두 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 스위치 소자 길이 영역이 존재함을 볼 수 있었다.

그림 6은 $\Delta n(S) = 0.0228$ 이고 $m = 6$ 인 경우, DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율이 3.37, SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 3.3697일 때 스위치 소자의 길이에 따른 바 상태와 크로스 상태에서 TE 모드와 TM 모드의 소멸비를 보인다. 4가지 경우가 모두 30 dB 이상의 소멸비를

표 1. SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율을 변화시키면서 계산한 바 상태와 크로스 상태에서 TE 모드와 TM 모드가 30 dB 이상과 20 dB 이상의 소멸비를 만족하는 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 길이와 최적의 소멸비를 만족하는 소자 길이 및 그 길이에서의 소멸비.

	ERES 영역의 코어 굴절율	30dB 영역 길이 (20dB 영역 길이) (μm)	소자길이 (μm)	바 상태 소멸비 [dB]		크로스 상태 소멸비 [dB]	
				TE	TM	TE	TM
				$\Delta n(S) = 0.0228, m = 6$			
	3.3696	0 (1089.80~1105.14)	1097.48	28.77	28.11	33.07	29.87
	3.3697	1097.16~1098.40 (1089.86~1105.92)	1097.78	34.8	31.5	46.8	31.8
	3.3698	1098.04~1098.86 (1090.24~1106.22)	1098.46	45.50	31.10	35.57	30.91
	3.3699	0 (1090.98~1106.10)	1098.54	32.76	28.88	28.90	27.24
	3.3700	0 (1092.12~1105.46)	1098.80	27.55	25.79	25.16	24.47
$\Delta n(S) = 0.0278, m = 5$							
	3.3696	0 (919.96~934.76)	927.36	33.66	29.81	28.62	27.64
	3.3697	927.44~927.98 (920.12~935.56)	927.72	47.74	30.77	34.74	30.60
	3.3698	0 (920.60~935.90)	928.26	34.71	29.16	47.55	30.74
	3.3699	0 (921.44~935.78)	928.62	28.49	26.28	33.48	28.34
	3.3700	0 (922.72~935.90)	929.32	24.84	23.93	27.73	28.26

가지는 스위치 소자의 길이는 1097.16 μm 에서 1098.40 μm 로 1.24 μm 의 공차를 가지며 20 dB 이상의 소멸비를 가지는 스위치 소자의 길이는 1089.86 μm 에서 1105.92 μm 로 16.06 μm 의 공차를 가짐을 볼 수 있다.

그림 7은 $\Delta n(S) = 0.0228$ 이고 $m = 6$ 인 경우, DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율이 3.37이고 스위치 소자 길이가 1097.78 μm 일 때 SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴

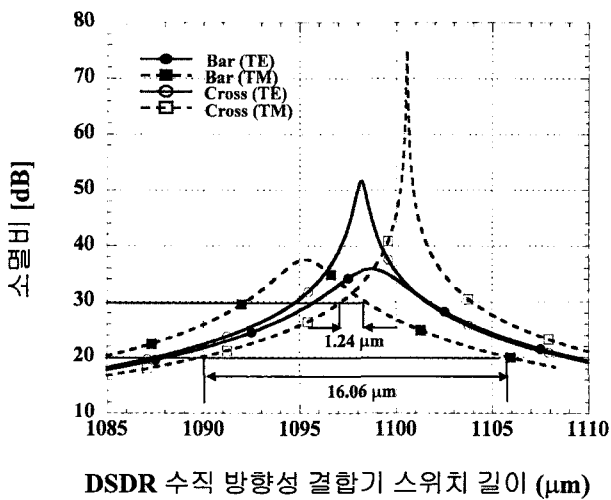


그림 6. DSDR 수직 방향성 결합기 스위치 길이에 따른 바 상태와 크로스 상태에서의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비.

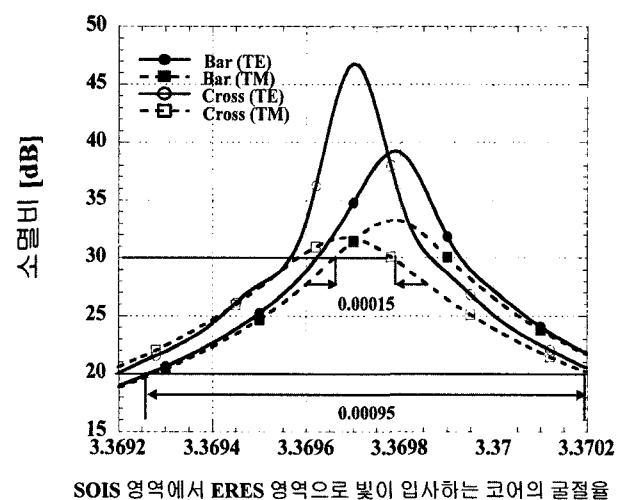


그림 7. SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율에 따른 바 상태와 크로스 상태에서의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비.

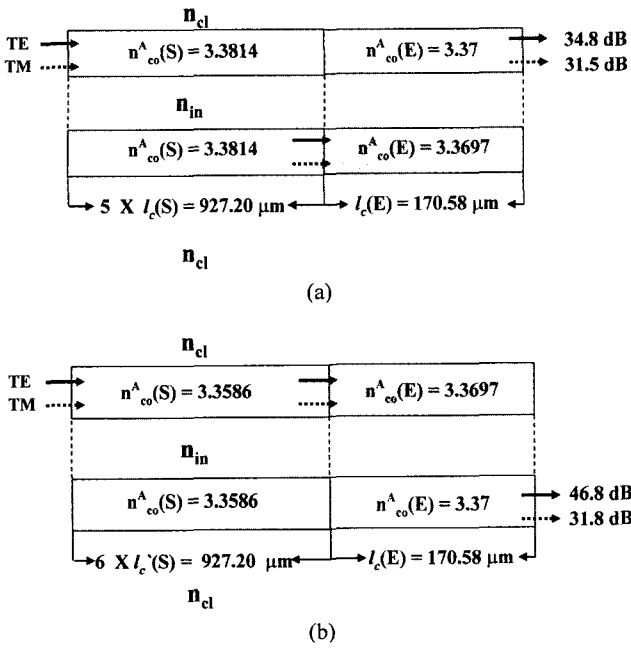


그림 8. SOIS 영역의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우, SOIS 영역과 ERES 영역으로 구성된 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치 설계의 예 (a) 바 상태와 (b) 크로스 상태.

절율에 따른 바 상태와 크로스 상태에서 TE 모드와 TM 모드의 소멸비를 보인다. 4가지 경우가 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 코어의 굴절율은 3.36965에서 3.36980로 0.00015의 공차를 가지며 20 dB 이상의 소멸비를 가지는 코어 굴절율은 3.36925에서 3.3702로 0.00095의 공차를 가짐을 볼 수 있다. 특히 SOIS 영역에서 ERES 영역으로 빛이 입사하는 코어의 굴절율이 3.37일 때-ERES 영역도 대칭형 구조를 가지는 경우에도 4가지 경우 모두 20 dB 이상의 소멸비를 가짐을 볼 수 있었다.

그림 8(a)와 그림 8(b)는 각각 $\Delta n(S)=0.0228$ 이고 $m=6$ 일 때, 스위치의 입력부인 SOIS 영역의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우 스위치의 출력단에서 편광에 관계없이 바 상태와 크로스 상태에서 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 한 예를 나타낸다. 바 상태와 크로스 상태일 때의 1차원 측면도와 그 상태를 얻기 위하여 필요한 각 영역의 길이와 굴절율을 보여준다. SOIS 영역의 길이가 $927.20 \mu\text{m}$ 이고 ERES 영역의 길이가 $170.58 \mu\text{m}$ 일 때 바 상태의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비는 각각 34.8 dB와 31.5 dB이고 크로스 상태의 TE 모드와 TM 모드의 소멸비는 각각 46.8 dB와 31.8 dB임을 볼 수 있다.

그림 9(a)와 그림 9(b)는 각각 그림 8(a)와 그림 8(b)에서 보인 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치가 바 상태(TE 모드와 TM 모드)와 크로스 상태(TE 모드와 TM 모드)일 때 진행 거리에 따른 도파로 A와 도파로 B에 존재하는 광파의 파워 변화를 나타내고 있다. SOIS 영역은 두 코어의 굴절율이 같아 대칭형 구조를 가지고 있기 때문에 SOIS 영역의 출력단

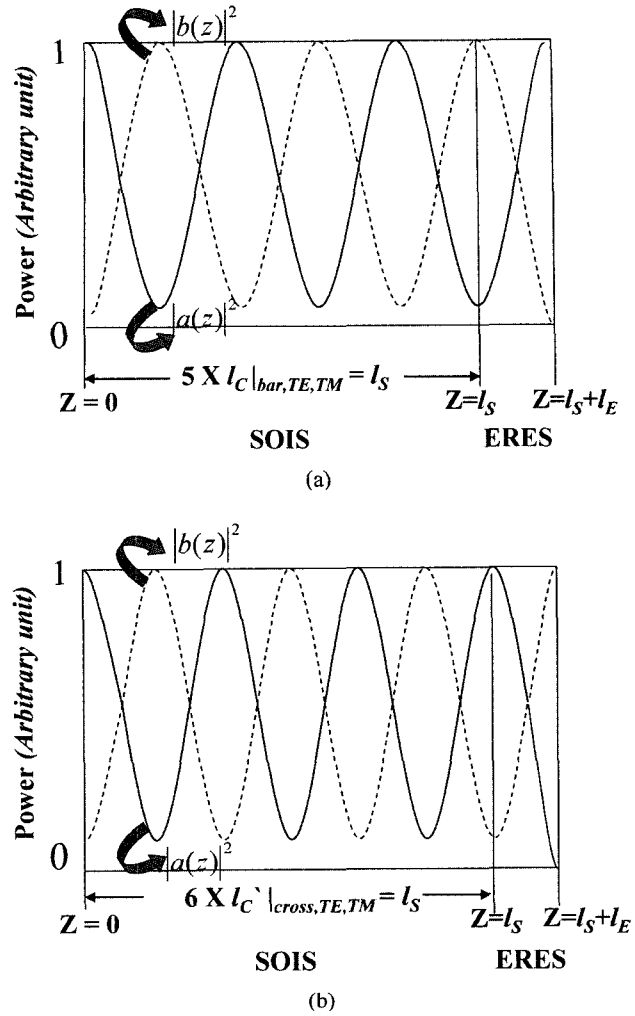


그림 9. SOIS 영역의 입력단의 도파로 A에 빛이 입사하는 경우, DSDR 수직 방향성 결합기 스위치가 (a) 바 상태 (TE 모드, TM 모드)와 (b) 크로스 상태 (TE 모드, TM 모드)일 때 진행 거리에 따른 도파로 A와 도파로 B에 존재하는 광파의 파워 변화.

에서 크로스 상태와 바 상태에서 모두 낮은 소멸비를 가짐을 볼 수 있다. 반면에 ERES 영역은 두 코어의 굴절율이 달라 대칭형 구조를 가지고 있기 때문에 크로스 상태와 바 상태에서 모두 매우 높은 소멸비를 가지게 됨을 볼 수 있다.

IV. 결 론

DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기가 편광에 관계없이 같은 결합길이를 가지는 구조 파라미터와 굴절율을 기초로 하여 짧은 소자 길이를 가지며 편광에 관계없이 크로스 상태와 바 상태에서 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치를 설계하는 방법과 설계한 예를 제시하였다.

이러한 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기

스위치는 두 코어의 굴절율이 같아 대칭형 구조를 가지는 SOIS 영역과 두 코어의 굴절율이 달라 비대칭형 구조를 가지는 ERES 영역으로 구성된다. SOIS 영역에서 코어의 굴절을 변화만으로 크로스 상태와 바 상태의 천이가 일어나야 하며 또한 각 상태에서 편광에 따른 SOIS 영역의 특성 변화가 작게 발생해야 한다. 따라서 주어진 구조 파라미터와 굴절율에서 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 코어의 굴절을 중심으로 대칭이 되는 코어의 두 굴절을 값에서 크로스 상태와 바 상태가 발생하도록 코어의 두 굴절 값을 설정하였다. 크로스 상태와 바 상태를 발생시키는 코어의 두 굴절 값을 값의 차이는 전류 주입이나 전압인가에 의하여 변화 가능한 굴절율 값을 굴절율 값의 1% 이하가 되도록 설정하였다. 또한 SOIS 영역의 길이는 SOIS 영역의 출력부에서 각 상태의 편광에 따른 특성 변화를 최소화하기 위하여 각 상태에서 편광에 따라(4가지 경우) 최대 소멸비를 가지는 4가지 길이의 평균값으로 설정하였다. 이러한 조건을 만족하는 SOIS 영역의 길이는 스위칭 작용을 발생시키기 위하여 필요한 코어 굴절율의 차이가 작아질수록 커짐을 알 수 있었다.

ERES 영역에서 바 상태와 크로스 상태의 결합길이가 같아지기 위하여 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율을 SOIS 영역의 바 상태와 크로스 상태의 코어 굴절율의 평균값으로 설정한다. ERES 영역의 다른 코어의 굴절율이 스위치의 출력이 발생하는 ERES 영역의 코어의 굴절율보다 약간 작은 굴절율을 가지는 경우에 소멸비가 매우 향상됨을 보았다.

위와 같은 방법을 사용하여 SOIS 영역과 ERES 영역으로 구성되는 DSDR 수직 방향성 결합기 스위치 구조에서 편광에 관계없이 크로스 상태와 바 상태에서 모두 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 설계 예들을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Sung-Chan Cho, Byung-Min Jung, Boo-Gyoun Kim, Hyun-Ha Hong, and Ali Shakouri, "A Novel Vertical Directional Coupler Switch With Switching-Operation-Induced Section and Extinction-Ratio-Enhanced Section," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. 1773-1778, 2002.
- [5] Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham, and John E. Bowers, "A wavelength multiplexer using cascaded 3D vertical couplers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 3, pp. 282-284, 2000.
- [6] Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham, and John E. Bowers, "Optical add/drop multiplexers based on X-crossing vertical coupler filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 410-412, 2000.
- [7] Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham, and John E. Bowers, "Push-pull Fused vertical coupler switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 662-664, 1999.
- [8] H. Bissessur, P. Pagnod-Rassiaux, R. Mestric, and B. Martin, "Extremely Small Polarization Independent Phased-Array Demultiplexers on InP," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 554-556, 1996.
- [9] Masaki Kohtoku, Hiroaki Sanjoh, Satoshi Oku, Yoshiaki Kadota, and Yuzo Yoshikuni, "Polarization Independent Semiconductor Arrayed Waveguide Gratings Using a Deep-Ridge Waveguide Structure," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E81-C, no. 8, pp. 1195-1204, 1998.
- [10] Wa Peng Wong, and Kin Seng Chiang, "Design of Polarization-Insensitive Bragg Grating in Zero-Birefringence Ridge Waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 9, pp. 1138-1145, 2001.
- [11] S.-H. Jeong, T. Mizumoto, K. Nakatsuhara, M. Takenaka and Y. Nakano, "Deep-ridge distributed feedback waveguide for polarization independent all-optical switching," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 8, pp. 498-499, 2001.
- [12] Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham and John E. Bowers, "Vertical Coupler with separated inputs and outputs fabricated using double-sided process," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 18, pp. 1552-1554, 1999.
- [13] 정병민, 김부균, "편광에 무관한 매우 짧은 결합길이를 가지는 새로운 수직 방향성 결합기," *한국광학회지*, 14권 4호, pp. 359-364, 2003.
- [14] 정병민, 김부균, "편광에 관계없이 매우 짧은 결합길이를 가지는 Double-Sided Deep-Ridge 도파관 구조 수직 방향성 결합기의 소멸비 향상," *한국광학회지*, 15권 1호, pp. 12-16, 2004.
- [15] 정병민, 윤정현, 김부균, "Double-Sided Deep-Ridge 도파관 구조 수직 방향성 결합기의 날개구조부 폭과 두께가 편광 특성에 미치는 영향," *한국광학회지*, 15권 4호, pp. 293-298, 2004.

A Very Short Vertical Directional Coupler Switch with Polarization Independent Very High Extinction Ratios

Byung-Min Jung and Boo-Gyoun Kim[†]

School of Electronic Engineering, Soongsil University 1-1 Sangdo 5-Dong Dongjak-Gu, Seoul 156-743, Korea

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received July 28, 2004, Revised manuscript October 21, 2004)

We propose a novel vertical directional coupler switch using a vertical directional coupler with polarization independent coupling lengths employing the doublesided deep-ridge waveguide structure. This switch is composed of a switching operation induced section with symmetric structures and an extinction ratio enhanced section with asymmetric structures. We present design methods and examples for this switch with very short lengths and very high extinction ratios larger than 30 dB for both TE and TM modes in cases of both cross and bar states.

OCIS Codes : 060.1810, 130.3120, 250.5300, 230.3120, 230.7380.