

편광에 관계없이 매우 짧은 결합길이를 가지는 Double-Sided Deep-Ridge 도파관 구조 수직 방향성 결합기의 소멸비 향상

정병민 · 김부균[†]

숭실대학교 정보통신전자공학부

Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도 5동 1-1

(2003년 10월 23일 받음, 2003년 12월 19일 수정본 받음)

편광에 관계없이 매우 짧은 결합 길이를 가지는 Double-Sided Deep-Ridge (DSDR) 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 두 코어 굴절율에 약간의 비대칭성을 줌으로써 편광에 관계없이 소멸비가 크게 향상됨을 보였다. 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어는 강하게 결합되기 때문에 최대 소멸비를 보이는 두 코어 사이의 굴절율의 비대칭 값과 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절율의 공차는 증가한다. 또한 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어사이의 결합이 강하게 되어 결합기 길이와 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 결합길이의 공차는 감소한다. 편광에 관계없이 100 μm 이하의 매우 짧은 소자길이를 가지며 30 dB 이상의 매우 높은 소멸비를 가지는 DSDR 수직 방향성 결합기를 구현할 수 있음을 보였다.

주제어 : vertical directional coupler, deep-ridge waveguide, double-sided wafer process, polarization independence, ultra short coupling length, high extinction ratio.

I. 서 론

방향성 결합기는 광통신 시스템에 사용되는 광집적회로 (Photonic Integrated Circuit, PIC)를 구성하는 중요한 소자이기 때문에 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중 융합 수직 방향성 결합기(Fused Vertical Coupler, FVC)는 입력단과 출력단의 각 포트들을 광섬유와 결합이 용이하도록 쉽게 분리할 수 있고, 결합길이가 짧기 때문에 집적화 할 경우 큰 scalability를 얻을 수 있고, 제작공차가 비교적 크고 퓨전층의 조성비와 두께를 임의로 바꾸어 줄 수 있어 설계 시 많은 자유도가 주어지기 때문에 최근에 많은 연구가 수행 되고 있다[1-4]. 그러나 FVC 구조를 가진 방향성 결합기는 코어 영역이 slab 형태로 이루어진 도파관 소자를 이용하기 때문에 편광에 따라 성능이 변화하는 단점을 가지고 있고 소자 구현 시 두 개의 분리된 도파관의 ridge 부분을 정확하게 융합시켜야 하는 제작과정의 어려움이 있다.^[2,3] 최근에 우리는 편광에 따라 성능이 변화하는 단점을 극복하기 위하여 deep-ridge^[5-8] 도파관 구조에 제작이 용이한 double-sided 프로세스^[9]를 이용하여 구현할 수 있는 Double-Sided Deep-Ridge (DSDR) 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기를 제안하고 편광에 무관한 결합 길이를 가지는 구조 파라미터와 물질 파라미터를 제시하였다. 또한 여러 가지 구조 파라미터들이 결합길이에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.^[10]

DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기를 집적된 대용량의 광 스위칭 시스템에 사용하기 위해서는 단위 결합기

가 매우 짧은 결합길이(<수백 μm)와 매우 높은 (>30 dB) 소멸비(extinction ratio)를 가져야한다. FVC 구조를 가지는 수직 방향성 결합기에서 약간의 비대칭성을 줌으로써 대칭 구조를 가지는 경우에 비하여 소멸비가 매우 향상됨을 보였다.^[11]

본 논문에서는 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기에 비대칭성을 줌으로써 소멸비가 매우 향상됨을 보인다. 또한 변화 가능한 코어 굴절율의 범위(<1%) 안에서 코어 굴절율의 비대칭성을 이용하여 편광에 관계없이 100 μm 이하의 매우 짧은 결합길이를 가지며 30 dB 이상의 매우 높은 소멸비를 가지는 소자 파라미터들이 존재함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 구조 파라미터와 굴절율 변화에 따른 편광 특성에 관하여 살펴보았다. III장에서는 DSDR 수직 방향성 결합기의 두 코어 굴절율의 비대칭성에 따른 소멸비 향상에 대하여 논하였다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

II. 구조 파라미터와 굴절율 값의 변화에 따른 TE 모드와 TM 모드의 결합길이 차이의 변화

그림 1은 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 2차원 단면도이다. 이 구조는 참고문헌 [4]에서 제안된 FVC 구조를 가지는 수직 방향성 결합기와 달리 두 ridge 부분을 융합 시키는 과정이 없기 때문에 제작과정이 비교적 쉽고 융합 층이 도파 모드의 결합 영역으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 도파 모드의 특성에 미치는 영향이 실제적으로 거의 없다는 장점을 가지고 있다.^[9]

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

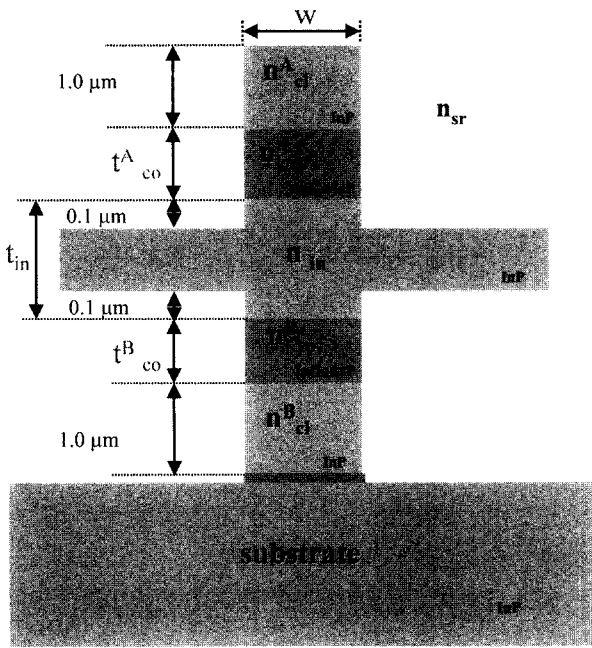


그림 1. Double-Sided Deep-Ridge 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 2차원 단면도.

새롭게 제안된 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 특성 해석을 위하여 사용된 구조 및 물질 파라미터는 다음과 같다. 도파관 A와 도파관 B의 바깥쪽 클래딩의 굴절율, n_{co}^A 와 n_{co}^B ,은 3.17로 도파관을 둘러싸고 있는 물질의 굴절율, n_{sr} ,은 공기의 굴절율인 1로 설정하였다.

구조 파라미터는 FVC 구조와 deep-ridge 도파관 구조의 특성 해석 연구 내용을 바탕으로 다음과 같이 설정하였다. 바깥쪽 클래딩의 두께는 $1\mu\text{m}$ 로, 도파관 A와 도파관 B의 코어의 두께는 같다고 설정하였다. 또한 사용된 파장은 $1.55\mu\text{m}$ 이다.

위와 같이 설정된 굴절율 및 구조 파라미터를 가지고 코어의 두께, t_{co}^A 와 t_{co}^B , 코어와 코어 사이의 내부 클래딩 영역의 두께, t_{in} , 및 도파관 폭, w , 그리고 코어 영역의 굴절율 n_{co}^A 와 n_{co}^B , 내부 클래딩 영역의 굴절율, n_{in} ,을 변화시키면서 DSDR 도파관 구조를 가진 수직 방향성 결합기의 편광에 따른 소멸비와 결합길이의 특성에 대하여 살펴보았다.

본 논문에서 모든 계산은 Beam Propagation Method(BPM)을 이용하여 수행하였다.

그림 2는 그림 1과 같은 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기에서 내부 클래딩 영역의 두께를 $0.4\mu\text{m}$ 로 고정시키고 여러 가지 코어 두께에 대하여 도파관 폭의 함수로 도시한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이를 나타낸 그림이다. 두 도파관의 코어 영역의 굴절율은 3.37이고 내부 클래딩 영역의 굴절율은 3.17이다. 여러 가지의 코어 두께에 대하여 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 도파관 폭이 존재함을 볼 수 있다. 또한 코어 두께가 증가할수록 결합길이는 증가하고 결합길이가 일치하는 도파관 폭이 증가함을 볼 수 있다. 코어 두께가 같을 때 도파관 폭의 증가에 따른 결합 길이의 변화는 TM 모드가 TE 모드 보다 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 도파관 폭의 증가에 따른 유효 굴절율의 변화가 TM 모

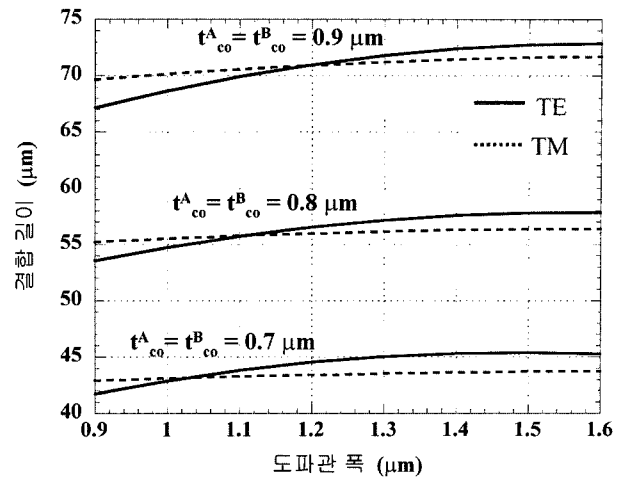


그림 2. 내부 클래딩 영역의 두께가 $0.4\mu\text{m}$ 일 때 여러 가지 코어 두께에 대하여 도파관 폭의 함수로 도시한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이.

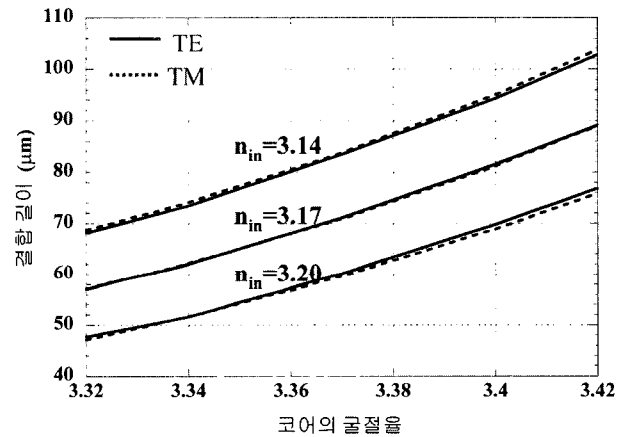


그림 3. 두 코어 굴절율이 같을 때 여러 가지 내부 클래딩의 굴절율에 대하여 코어 굴절율의 함수로 도시한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이.

드가 TE 모드 보다 작기 때문이라 생각된다.

그림 3은 그림 1과 같은 DSDR 수직 방향성 결합기 구조에서 내부 클래딩 영역의 두께가 $0.4\mu\text{m}$, 두 코어의 두께가 $0.9\mu\text{m}$ 그리고 도파관 폭이 $1.20\mu\text{m}$ 일 때 여러 가지의 내부 클래딩의 굴절율에 대하여 두 코어 영역의 굴절율, $n_{co}^A = n_{co}^B$,을 3.32에서 3.42까지 변화시키며 도시한 TE 모드와 TM 모드의 결합길이이다.

내부 클래딩의 굴절율이 3.17이고, 코어 영역의 굴절율이 3.32일 때 TE 모드와 TM 모드의 결합 길이의 차이, $2l_{c,TE} - l_{c,TM} / (l_{c,TE} + l_{c,TM})$,는 0.4% 이내였고 코어 영역의 굴절율이 3.42일 때는 0.2% 이내였다. 또한 내부 클래딩의 굴절율이 3.14일 때는 코어 영역의 굴절율 변화에 관계없이 TM 모드의 결합길이가 TE 모드의 결합길이보다 항상 길었고, 내부 클래딩의 굴절율이 3.20일 때는 TE 모드의 결합길이가 TM 모드의 결합길이보다 항상 길었다. 즉 내부 클래딩의 굴절율 변화에 따른 결합길이의 변화는 예상대로 TM 모드가 TE 모드보다

큰 것을 확인할 수 있었다. 그러나 내부 클래딩의 굴절율이 3.14와 3.20일 때 각각의 두 모드의 결합길이의 차이는 0.9%와 1.2% 이내로 매우 작았다. 따라서 코어 영역과 내부 클래딩의 굴절율의 변화에 따른 두 모드의 결합길이의 차이는 매우 작음을 볼 수 있었다.

DSDR 구조를 가지는 수직 방향성 결합기에서 굴절율의 변화에 따른 TE 모드와 TM 모드의 결합 길이의 차이의 변화는 도파관의 코어 두께 및 폭의 변화에 따른 TE 모드와 TM 모드의 결합 길이의 차이보다 매우 작음을 알 수 있다.¹⁵⁾ 따라서 다음 절에서는 DSDR 구조를 가지는 수직 방향성 결합기에서 대칭 구조인 경우 편광에 관계없이 결합길이가 같은 굴절율 값들과 구조 파라미터를 찾은 다음, 두 코어 굴절율의 비대칭성에 의하여 소멸비가 크게 향상됨을 보이고 편광에 따른 결합길이의 차이는 여전히 매우 작음을 보인다.

III. 두 코어 굴절율의 비대칭성에 의한 소멸비 향상

그림 4는 DSDR 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 내부 클래딩의 두께가 0.4 μm, 두 코어의 두께가 각각 0.7 μm, 두 코어 영역의 굴절율은 3.37 이고 내부 클래딩 영역의 굴절율은 3.17인 대칭 구조에서 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 코어 폭 1.0 μm를 가지는 경우에 코어 B의 굴절율을 3.37로 고정시키고 코어 A의 굴절율을 3.364에서 3.371까지 변화시키며 도시한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비와 결합길이를 나타낸다. 코어 A의 굴절율이 3.364에서 3.371까지 변화하는 동안 최대 발생하는 TE 모드와 TM 모드의 결합길이의 차이, $2 l_{c,TE} - l_{c,TM} / (l_{c,TE} + l_{c,TM})$,는 0.4%이내였다. 코어 A의 굴절율이 3.37인 대칭인 경우 TE(TM) 모드의 소멸비는 13.35 dB(13.45 dB)이고 결합길이는 43.4 μm이다. TE(TM) 모드의 최대 소멸비가 발생하는 코어 A의 굴절율은 3.365(3.3649)이며 이 경우 최대 소멸비는 54.98 dB(56.07 dB)이고 결합길이는 41.82 μm(41.87 μm) 이었다. 즉 약간의 비대칭성, Δn_{asy} ,을 줌으로써 두 모드의 소멸비가 크게 향상됨을 볼 수 있었다.

매우 짧은 결합길이를 가지는 대칭형 방향성 결합기는 각

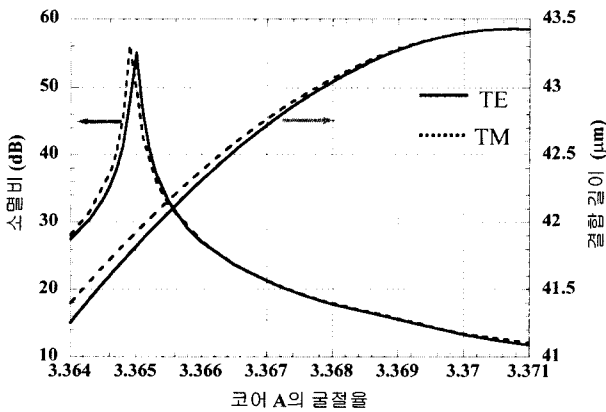


그림 4. 내부 클래딩 영역의 두께가 0.4 μm, 코어 두께가 0.7 μm, 코어 폭이 1.0 μm이고 코어 B의 굴절율이 3.37일 때 코어 A의 굴절율의 함수로 도시한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비와 결합길이.

각의 도파관에 존재하는 모드들의 형태가 동일하기 때문에 소멸비가 작다는 단점을 가지고 있다.¹¹⁾ 그러나 약간의 비대칭성을 방향성 결합기가 가지게 되면 각각의 도파관에 존재하는 모드들의 형태가 약간 달라져 결합기의 symmetric super 모드와 antisymmetric super 모드의 overlap 적분 값이 같아져 소멸비가 향상되어진다고 생각된다.¹¹⁾

또한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비가 모두 30 dB 이상인 코어 A의 굴절율 영역, $\delta n_{cr>30dB}$ 은 3.3643부터 3.3657로 0.0014이고 결합길이 범위, $\delta l_{cr>30dB}$ 는 41.56 μm부터 42.07 μm로 0.51 μm이었다. 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 대칭 구조에서 구조 파라미터와 내부 클래딩의 굴절율을 변화시키지 않고, 두 코어 굴절율의 비대칭성을 증가시킬 때 발생하는 두 모드의 결합길이의 변화는 TM 모드가 TE 모드보다 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 코어 굴절율의 변화에 따른 유효 굴절율의 변화가 TM 모드가 TE 모드보다 작기 때문이라 생각된다.

그림 5는 DSDR 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 내부 클래딩의 두께가 0.6 μm, 두 코어의 두께가 각각 0.9 μm, 두 코어 영역의 굴절율은 3.37이고 내부 클래딩 영역의 굴절율은 3.17인 대칭 구조에서 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 코어 폭 1.34 μm를 가지는 경우에 코어 B의 굴절율을 3.37로 고정시키고 코어 A의 굴절율을 3.364에서 3.371까지 변화시키며 도시한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비와 결합길이를 나타낸다. 코어 A의 굴절율이 3.364에서 3.371까지 변화하는 동안 발생하는 TE 모드와 TM 모드의 결합길이의 차이는 1.1% 이내였다. 코어 A의 굴절율이 3.37인 대칭인 경우 TE(TM) 모드의 소멸비는 25.18 dB(23.64 dB)이고 결합길이는 153.1 μm이다. TE(TM) 모드의 최대 소멸비가 발생하는 코어 A의 굴절율은 3.3697 (3.3696)이며 이 경우 최대 소멸비는 55.46 dB (45.91 dB)이었다. 즉 약간의 비대칭성, Δn_{asy} ,을 줌으로써 소멸비가 크게 향상됨을 볼 수 있었다. 또한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비가 모두 30 dB 이상인 코어 A의 굴절율 영역, $\delta n_{cr>30dB}$,은 3.36945부터 3.36985로 0.0004이고 결합길이 범위, $\delta l_{cr>30dB}$ 는 152.25 μm부터 152.89 μm로 0.64 μm이었다.

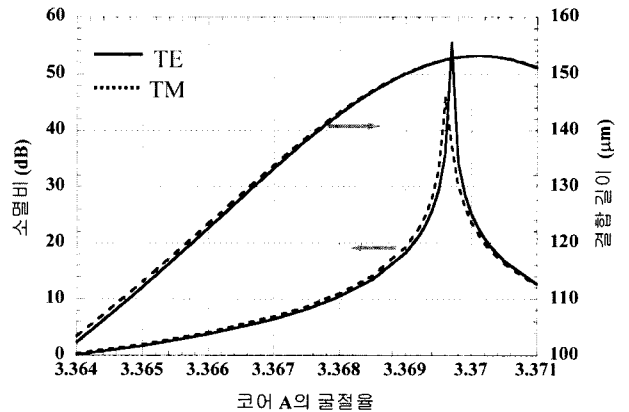


그림 5. 내부 클래딩 영역의 두께가 0.6 μm, 코어 두께가 0.9 μm, 코어 폭이 1.34 μm이고 코어 B의 굴절율이 3.37일 때 코어 A의 굴절율의 함수로 도시한 TE 모드와 TM 모드의 소멸비와 결합길이.

표 1. 대칭 구조를 가지는 DSDR 수직 방향성 결합기에서 편광에 관계없이 결합 길이가 일치하는 여러 가지 소자 파라미터 조합에 대하여 TE 모드와 TM 모드 동시에 최대 소멸비를 가질 수 있는 두 코어 굴절률 값의 차이, DSDR 수직 방향성 결합기의 결합기 길이, 이러한 조건에서의 두 모드의 소멸비, 편광에 관계없이 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 코어 굴절률의 범위와 결합길이의 범위.

내부 클래딩 영역의 두께 [μm]	코어 두께 [μm]	도파관 폭 [μm]	Δn_{asy}	결합기 길이 [μm]	TE 소멸비 [dB]	TM 소멸비 [dB]	$\delta n_{cr>30dB}$	$\delta l_{cr>30dB}$ [μm]
0.4	0.7	1.00	0.00505	41.85	41	40	0.0014	0.51
	0.8	1.12	0.00248	55.05	41	42	0.0010	0.52
	0.9	1.20	0.00138	70.23	41	42	0.0008	0.52
0.5	0.7	1.07	0.00258	59.85	44	43	0.0010	0.54
	0.8	1.20	0.00125	79.98	44	40	0.0007	0.57
	0.9	1.27	0.00070	103.65	42	50	0.0005	0.57
0.6	0.7	1.18	0.00135	85.95	40	42	0.0006	0.62
	0.8	1.26	0.00063	116.65	42	40	0.0005	0.62
	0.9	1.34	0.00035	152.65	43	43	0.0004	0.64
0.7	0.7	1.23	0.00060	123.70	56	60	0.0005	0.71
	0.8	1.30	0.00030	168.90	55	59	0.0004	0.75
	0.9	1.41	0.00018	224.65	42	44	0.0003	0.75
0.8	0.7	1.27	0.00035	176.35	43	40	0.0003	0.85
	0.8	1.35	0.00018	245.45	40	43	0.0002	0.89
	0.9	1.47	0.00009	331.60	43	44	0.0002	1.00

그림 4와 그림 5를 비교해 보았을 때 내부 클래딩의 두께와 코어 두께가 작을수록 두 도파관은 강하게 결합되어 있으므로 결합길이는 짧고 최대 소멸비가 발생하는 두 코어 굴절률의 비대칭 값은 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 코어에 강금되는 파워비가 작기 때문에 코어 굴절률의 변화에 따른 두 모드의 전파상수의 변화가 작고 따라서 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 두 코어 굴절률의 범위는 큰 것을 볼 수 있다.

편광에 관계없이 매우 높은 소멸비와 짧은 결합길이를 가지는 특성을 보이는 DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기의 보다 체계적인 설계 지침을 얻기 위하여 다음과 같은 계산을 수행하였다. 표 1은 대칭 구조를 가지는 DSDR 수직 방향성 결합기에서 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 여러 가지 구조 파라미터 조합에 대하여 최대 소멸비를 얻을 수 있는 두 코어 굴절률 값의 최적화 비대칭-TE 모드와 TM 모드 동시에 최대의 소멸비 값을 가질 수 있는 두 코어 굴절률 값의 차이, Δn_{asy} , DSDR 수직 방향성 결합기의 결합기 길이-TE 모드와 TM 모드 동시에 최대의 소멸비 값을 가질 수 있는 결합기 길이, l_b , 이러한 조건에서의 두 모드의 소멸비, 그리고 편광에 관계없이 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 코어 굴절률의 범위, $\delta n_{cr>30dB}$,와 결합길이의 범위, $\delta l_{cr>30dB}$ 에 대한 계산 결과를 정리한 것이다.

내부 클래딩의 두께가 같을 때 코어 두께가 감소함에 따라 코어에 강금되는 파워비가 작아지기 때문에 코어의 굴절률 변화에 따른 두 모드의 전파 상수의 변화가 작아진다. 따라서 코어의 두께가 작을수록 최대 소멸비 값을 얻을 수 있는 두 코어 굴절률 값의 차이, Δn_{asy} ,와 30 dB 이상의 소멸비를 얻을 수 있는 코어 굴절률의 범위, $\delta n_{cr>30dB}$,가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 코어 두께가 같을 때 내부 클래딩의 두께가 감소함에 따라 결합계수가 증가하기 때문에 코어의 굴절률 변화에 따른 전파 상수의 변화는 작아짐을 볼 수 있다.

표 1의 계산 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 내부 클래딩의 두께와 코어 두께가 증가할수록 편광에 관계없이 결합길이가 일치하는 도파관 폭이 증가한다.

둘째, 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어는 강하게 결합되기 때문에 최대 소멸비를 가지는 두 코어 사이의 굴절률의 최적화 비대칭 값과 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 코어 굴절률의 공차는 증가한다.

셋째, 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어사이의 결합이 강하게 되어 결합기 길이와 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 결합길이의 공차는 감소한다.

IV. 결 론

편광에 따른 성능 변화가 작은 deep-ridge 도파관 구조에 제작이 용이한 double-sided 프로세스를 이용하여 구현할 수 있는 편광에 관계없이 100 μm 이하의 매우 짧은 소자 길이를 가지며 30 dB 이상의 매우 높은 소멸비를 가지는 Double-Sided Deep-Ridge(DSDR) 도파관 구조를 가지는 새로운 수직 방향성 결합기를 제안하였다.

DSDR 도파관 구조를 가지는 수직 방향성 결합기가 대칭 구조를 가질 때 편광에 관계없이 결합 길이가 일치하는 여러 가지 소자 파라미터 조합에 대하여 두 코어 굴절률에 약간의 비대칭성을 줌으로써 편광에 관계없이 소멸비가 크게 향상됨을 보였다. 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어는 강하게 결합되기 때문에 최대 소멸비를 보이는 두 코어 사이의 굴절률의 비대칭 값과 30 dB 이상의 소멸비를 보이는 코어 굴절률의 공차는 증가함을 보였다. 또한 내부 클래딩의 두께와 두 코어의 두께가 감소할수록 두 코어사이의 결합이 강하게 되어 결합기 길이와 30 dB 이상의 소멸비를 가지는 결합길이의 공차는 감소함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 기초기술연구지원사업과 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

[1] B.-G. 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] A. Shakouri, B. Liu, B.-G. 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] B. Liu, A. 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] S.-C. Cho, B.-M. Jung, B.-G. Kim, H.-H. 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] 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.

[6] M. Kohtoku, H. Sanjoh, S. Oku, Y. Kadota, and Y. 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.

[7] W. P. Wong and K. S. Chiang, "Design of polarization-insensitive bragg grating in zero-birefringence ridge waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 9, pp. 1138-1145, 2001.

[8] 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.

[9] B. Liu, A. 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.

[10] 정병민, 김부균, "편광에 무관한 매우 짧은 결합길이를 가지는 새로운 수직 방향성 결합기," *한국광학회지*, 14권, 4호, pp. 359-364, 2003.

[11] K. L. Chen and S. Wang, "Cross-talk problems in optical directional couplers," *Appl. Phys. Lett.* 44, 166-168, 1984.

Improvement of extinction ratio of polarization independent very short vertical directional couplers with the double-sided deep-ridge waveguide structure

Byung-Min Jung and Boo-Gyoun Kim[†]

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, KOREA

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received October 23, 2003, Revised manuscript December 19, 2003)

We show that the extinction ratio is improved using slight asymmetry in two core refractive indices of polarization independent very short vertical directional couplers with the double-sided deep-ridge (DSDR) waveguide structure. The optimum asymmetry with the maximum extinction ratio and the tolerance of the refractive index of core with the extinction ratio larger than 30 dB increase as the thickness of inner cladding layer and the two cores decrease due to the increase of the coupling strength between the two cores. Also, the device length and the tolerance of the device length with the extinction ratio larger than 30 dB decrease as the thickness of the inner cladding layer and the two cores decrease due to the increase of the coupling strength between the two cores. We show that polarization independent vertical directional couplers with the DSDR waveguide structure with the device length less than 100 μm and the extinction ratio larger than 30 dB could be implemented.

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