

1.55 μm Ti:LiNbO₃ 광도파로의 두 모드 간섭을 이용한 편광모드 분리기

김정희 · 정기조 · 정홍식*

홍익대학교 대학원 전자전산공학과

Ⓣ 339-800 충남 연기군 조치원읍 신안동 산 34번지

이한영

전자부품연구원 광통신부품연구실

Ⓣ 451-865 경기도 평택시 진위면 마산리 455-6번지

(2001년 8월 29일 받음, 2002년 1월 16일 수정본 받음)

두 모드 간섭 현상을 기초로 해서 1.55 μm 파장대역에서 동작하는 편광모드 분리기를 Ti: x-cut LiNbO₃ 광도파로 구조를 이용하여 설계, 제작한 다음, TE, TM 입사 모드에 따른 소자의 동작 특성을 측정하였다. 광도파로 폭, 분기각도와 간섭영역 길이를 8 μm , 0.55°, 470 μm 로 제작된 소자의 분리 비는 TE, TM 입사 모드 각각에 대해서 16.18 dB, 21.25 dB로 측정되었으며, 누화는 -16.28 dB, -21.28 dB로 측정되었다. 삽입 손실은 TE, TM 각각에 대하여 2.24 dB/cm, 2.41 dB/cm로 측정되었으며, 30 nm 파장 범위 내에서 비교적 균일한 분리 비가 관찰되었다.

주제어 : integrated optics/waveguide.

I. 서 론

수십 개의 파장들을 다중화하여 전송 능력을 극대화시키는 파장분할다중(WDM) 기술은 시분할다중 기술과 비교하여 특정 파장 채널을 수동 소자로서 분기하거나, 결합함에 있어서 비교적 용이하다는 장점을 지니고 있다. 따라서 WDM 시스템의 송·수신 사이의 임의의 지점에서 특정 파장 채널을 분기(drop)하거나 삽입(add)할 수 있는 광 삽입/분기 다중화기(OADM: Optical Add/Drop Multiplexer)는 WDM 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 핵심 부품중의 하나로 인식되어지고 있다.^[1] LiNbO₃의 전기광학효과,^[2] 음향광학효과^[3,4] 그리고 스트레인광학효과^[5] 등을 이용한 2×2 OADM은 편광모드 변환기(polarization mode converter)와 편광모드 분리기(polarization mode splitter)를 활용하여 구현되었으며, 특히 편광모드 분리기의 성능이 OADM의 전체 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 한편 코히어런트 광 수신기를 구현하는 데에 있어서 입·출력 광의 편광을 조절하는 것보다는 오히려 편광 다이버시티(diversity)를 활용하는 편이 유리하다는 많은 연구 결과들이 보고되었다.^[6] 편광 다이버시티 개념을 도입하여 수신기를 구현하는 데에 있어서 편광모드 분리기가 반드시 필요하며, 또한 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다.

지금까지 광도파로 소자 형태로 다양한 편광모드 분리기 구조가 발표되었으며, 그 중에서 전기광학효과를 이용한 방향성

결합 구조의 편광모드 분리기가 실질적인 응용에 비교적 적합하다는 평가를 받았으나, LiNbO₃의 DC 유동(drift) 현상과 지속적인 전력 공급이 필요로 하기 때문에 수동 형태의 편광모드 분리기의 필요성이 오래 전부터 요구되어져 왔다.^[7] 일본의 Nakajima는 처음으로 0.63 μm 파장대역에서 동작하는 편광모드 분리기를 10 μm 폭을 갖는 광도파로 교차구조 형태로 구현하였으며, 독일의 Neyer는 1.3 μm 파장대역에서 -20 dB의 누화(crosstalk)를 나타내는 편광모드 분리기를 두 모드 간섭현상(TMI: Two Mode Interference)을 이용하여 제작하였다.^[8-10]

본 논문에서는 Ti:LiNbO₃ 광도파로와 두 모드 간섭현상을 이용하여 1.55 μm 파장대역에서 동작하는 편광모드 분리기를 구현하였다. II장에서는 두 모드 간섭현상의 일반적인 원리와 이를 활용하기 위해 발표된 구조를 검토한 다음 본 연구에서 이용한 구조와 전산모의 실험 결과를 제시하였으며, 제작공정과 관련된 내용은 III장에서 요약하였다. IV장에서는 제작된 소자의 누화, 편광모드 분리 비(splitting ratio), 파장 변화에 대한 영향을 체계적으로 검토하였으며, V장에서 끝맺음을 하였다.

II. 동작원리

그림 1(a)와 같이 교차 구조로 설계된 편광모드 분리기의 동작원리는 두 모드 간섭(TMI) 현상에 의해서 설명될 수 있다. 제안된 구조는 입·출력 단에 위치한 2개의 단일모드 Y형 커플러와 그 사이에 두 모드 도파로로 구성되어 있다. 기본 모드(fundamental mode)로 입사된 TE, TM 모드는 Y 커플러

*E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

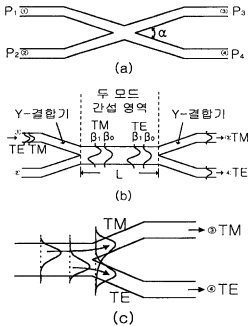


그림 1. 두 모드 간섭 현상을 이용한 (a) 편광모드 분리기 구조, (b) 두 모드 영역에 존재하는 편광 모드, (c) 두 모드 영역에서 간섭으로 형성된 편광모드의 분리 및 출력단에서 두 간섭 모드의 위상 분포.

에 의해서 기본 모드(fundamental mode: β_{TE}, β_{TM})와 제 1 고차 모드(first-order mode: β_{TE}, β_{TM})로 각각 진화하여, 총 4개의 모드들이 두 모드 영역을 진행하게 된다. 따라서 4개의 모드가 진행할 수 있도록 두 모드 영역의 도파로 폭과 굴절률 증가량을 적절하게 조절해야 된다. TMI를 이용한 편광모드 분리의 특징중의 하나는 단일모드 광도파로와 두 모드 도파로 영역간에 그림 1(b)와 같이 파워 손실 없이(adiabatic) 모드 분리와 결합이 일어난다는 것이다. 즉 단일모드 광도파로에 입사된 모드는 똑같은 파워를 갖는 대칭 모드(β_0)와 비대칭 모드(β_a)가 중첩되어 있기 때문에 대칭 모드는 두 모드 영역에서 손실이 거의 없이 기본 모드로 전이되고 ($\beta_0 \rightarrow \beta_0$), 비대칭 모드는 제 1모드로 전이되는($\beta_a \rightarrow \beta_1$) adiabatic 분리가 일어난다. 두 모드 영역에 존재하는 모드들이 또한 출력 광도파로와 결합할 때도 기억적으로 adiabatic 결합이 일어난다.¹⁸⁻¹⁰⁾

그림 1(a)의 구조가 편광모드 분리기로서 동작되는 원리는 다음과 같다. 두 모드 영역에서 각 편광모드의 기본 모드와 제 1 고차 모드간에는 간섭으로 인한 결합이 그림 1(c)와 같이 형성되면서 x 방향으로 진행하게 된다. 한편 LiNbO₃의 복굴절 및 분산 현상 때문에 일정한 거리를 진행한 후에 두 간섭 모드는 위상 차로 인한 세기 분포가 서로 다르게 나타나게 된다. 두 모드 영역의 진행 거리를 적절하게 조절하여 그림 1(c)와 같이 될 경우 TE, TM 모드는 각각 아래, 위 출력 단으로 통과하게 되며, 증폭적으로 편광모드 분리기로서 동작하게 된다. 한편 진행 거리를 조절할 경우 TE, TM 모드의 출력 단을 바꿀 수도 있다.

참고문헌 [10]의 두 모드 간섭에 관한 이론적인 모델로부터

편광모드 분리기의 분리 비(splitting ratio)는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{P_3^{TE}}{P_4} = \tan^2 \left[\frac{1}{2} (\Delta\beta^{TE} L_c + \phi_0^{TE}) \right] \quad (1-a)$$

$$\frac{P_3^{TM}}{P_4} = \tan^2 \left[\frac{1}{2} (\Delta\beta^{TM} L_c + \phi_0^{TM}) \right] \quad (1-b)$$

여기서 $\Delta\beta^{TE}, \Delta\beta^{TM}$ 은 TE, TM의 기본 모드와 제 1 모드간의 위상 속도 차를 의미하며, $L_c=0$ 에서는 ϕ_0^{TE}, ϕ_0^{TM} 이 분리 비를 결정하게 된다. 식 (1)로 부터 완전한 편광분리를 위한 조건은 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta\beta^{TE} \cdot L_c + \phi_0^{TE} = 2 \cdot n \cdot \pi \quad (2-a)$$

$$\Delta\beta^{TM} \cdot L_c + \phi_0^{TM} = 2 \cdot m \cdot \pi \quad (2-b)$$

여기서 $n, m, k = 1, 2, 3 \dots$ 을 나타내는 정수 값이며, $|n-m| = 2k-1$ 로 정의된다. 위 식에서 L_c 는 두 모드 간섭 영역의 유효 길이이다. 따라서 편광모드 분리기는 위 두 조건을 동시에 만족해야 된다. 일반적으로 소자의 길이를 최소화시키기 위해서 $k=1$ 을 선택할 경우, 식 (2)는 아래와 같은비로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\beta^{TE}}{\Delta\beta^{TM}} = \frac{(n+1)}{m}, \quad m=1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

여기서 $\phi_0^{TE} = 0, \phi_0^{TM} = 0, \Delta\beta^{TE} > \Delta\beta^{TM}$ 가정하였다. 식 (3)으로부터 $m = 1, 2$ 각각에 대해서 $\Delta\beta^{TE}/\Delta\beta^{TM}$ 의 비는 2.15로 계산되며, 이 수치들은 다행스럽게도 LiNbO₃에 적당한 농도의 Ti 확산에 의해서 얻을 수가 있다.

편광모드 분리 비와 누화 그리고 삽입손실(insertion loss)을 일반적으로 편광모드 분리기의 동작 성능을 비교하기 위한 지수로 사용하게 있으며, TE, TM 입사모드의 경우 각각 ①→④, ①→③로 출력된다고 가정할 경우 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$[\text{편광모드 분리 비}] = 10 \times \log \left[\frac{P_4}{P_3} \right]_{TE} \quad 10 \times \log \left[\frac{P_4}{P_3} \right]_{TM} \quad (4-a)$$

$$[\text{누화}] = 10 \times \log \left[\frac{P_3}{P_3 + P_4} \right]_{TE} \quad 10 \times \log \left[\frac{P_4}{P_4 + P_3} \right]_{TM} \quad (4-b)$$

III. 소자의 구조 및 제작공정

그림 1과 같은 편광모드 분리기는 두 모드가 나타나는 간섭 영역을 어떻게 구현하는가에 따라 다양한 형태로 제작이 가능하다.¹¹⁾ 첫 번째 구조는 도파로의 굴절률 증가분(Δn)을 균일하게 유지하면서 간섭 영역의 광도파로 폭을 임 · 출력단의 단일모드 광도파로 폭보다 두 배 정도도 할 경우 두 간섭 모드를 얻을 수 있다. 두 번째 구조는 Ti 채널 패턴을 중첩하여 간섭 영역의 굴절률을 다른 광도파로의 굴절률 증가량 보다 더 증가시킬 경우 두 모드를 수용할 수 있게 된다. 또 다른 구조로는 간섭 영역에 추가적으로 Ti를 증착한 후 "bow-tie" 형식으로 패턴을 형성하는 것이다. 즉 이중 확산 공정을 활용

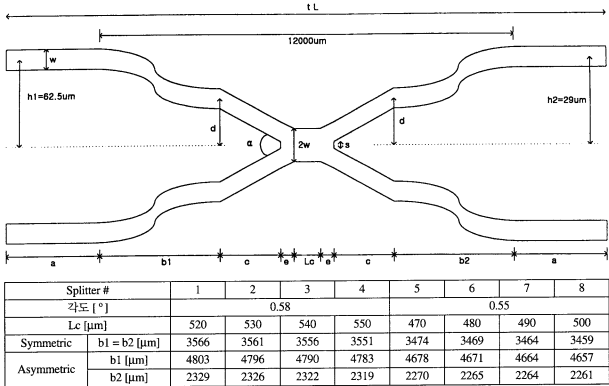


그림 2. 본 연구에서 설계 및 제작된 편광모드 분리기 구조 및 제원.

하는 것이다.

본 연구에서는 비교적 제작 공정 절차가 간단한 첫 번째 구조로 편광모드 분리를 구현하였다. 본 연구에서 제안된 구조는 그림 2와 같으며, 이러한 구조에서 편광모드 분리기 성능에 가장 민감하게 영향을 미치는 파라미터들은 Y형 커플러의 결합 각도(ω), 두 모드가 나타나는 도파로의 폭(W), 결합길이(L_c) 그리고 간섭 현상이 일어나는 부분의 끝점을 증가분 즉 T_1 의 두께이며, 그림 2에 요약된 제원으로 설계하여 마스크를 제작하였다. 그림 2에서 입·출력단의 간격이 같게 설계된 경우가 대칭 구조이며, 간격이 서로 다른 경우가 비대칭에

해당된다. 결합 각도와 도파로 폭은 0.55°, 0.58° 두 각도와 8 μm 를 중심으로 설계하였으며, 간섭 길이는 470-550 μm 사이의 값을 설정하였다. 제작된 소자와 광섬유간의 접촉을 고려하여, 현재 상용화된 이중 광섬유 캐필러리(capillary)의 중심(core) 간의 간격을 고려하여, 입력 단 및 출력 단 사이의 광도파로 간의 간격을 각각 125, 58 μm 로 하였다. 이럴 경우에도 소자의 전체 길이가 너무 길어져서 중간 부분에 S 구부림 형태의 도파로 구조를 삽입하여 길이를 축소하였다. 본 제작 공정에서는 T_1 식각(etching)을 습식(wet) 방법으로 수행하였기 때문에 측면(side) 식각을 고려하여 포토마스크 설계 시 도파

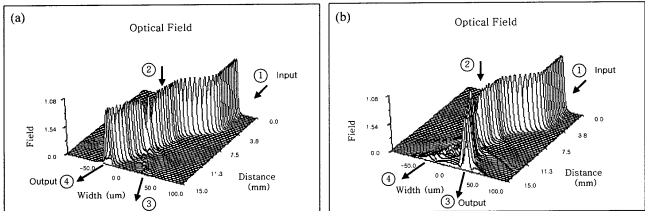


그림 3. (a) 입력 단 ①에 TE 모드를 입사하였을 경우의 전산모의 결과, (b) 입력 단 ①에 TM 모드를 입사하였을 경우의 전산모의 결과.

로의 폭을 8.5 μm로 설계하였다.

설계된 소자는 “Optiwave”사의 BPM_CAD를 이용하여 설계된 편광모드 분리기의 동작 성능을 검증하였다. 그림 3의 경우 1050°C, 8시간 확산 온도 및 시간, 1000 Å Ti 두께, 8 μm 입출력 도파로 폭, 그리고 470 μm 간섭영역 길이를 파라미터로 입력하였다. 그림 3(a)는 입력 단 ①에 TE 모드를 입사하였을 때 출력단 ④로 대부분의 TE 모드가 출력되고 있음을 보여주고 있으며, 그림 3(b)는 입력 단 ①에 TM 모드를 입사하였을 때 출력 단 ③으로 TM 모드 대부분이 출력됨을 보여주고 있다. 그림 3의 전산모의 결과로부터 TE, TM 모드의 경우 분리 비는 각각 20.3 dB, 27.9 dB로 계산되었다.

제작 공정을 단계별로 요약하면 다음과 같다. x-cut LiNbO₃ 위에 e-beam 증착기로 증착된 1000 Å 두께의 Ti를 사진식각(photo-lithography) 공정과 Ti 습식 식각 공정으로 8 μm 폭의 Ti 채널 패턴을 형성한 다음, 1050°C 온도에서 8시간 동안 확산하여 1.55 μm 파장 대역에서 동작하는 편광모드 분리기를 제작하였다. 고온의 확산 과정에서 공기 중으로 Li 원소의 역 확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasitic) 광도파로를 억제하기 위해서 습식 산소 분위기에서 확산을 수행하였다. 광도파로에 광파를 효율적으로 입사시키기 위해서 입사 단면을 광 등급(optical-grade) 수준으로 연마하였다. 제작된 소자의 편광모드 분리 비와 누화 등을 측정하기 위해서 end-fire 결합 시스템과 butt 결합 시스템이 공유된 측정 시스템을 구성하였다. 광섬유를 통해서 광파를 입사시켰으며, 편광 조절기를 사용하여 입력 모드의 편광 상태를 조절하였다. 핀 홀을 사용하여 두 출력 단으로부터 나오는 모드들을 정확히 분리하였으며, 측정되는 광파의 편광 성분들은 편광기를 이용하여 성분을 분석하였다.

IV. 동작 성능 및 측정 결과

그림 4는 분기각도, 광도파로 폭이 각각 0.58°, 8 μm로 제작된 소자에 대해서 간섭 영역의 길이에 따른 분리 비와 누화를 측정하였다. 간섭 영역의 길이가 520 μm일 때 TE 입사모

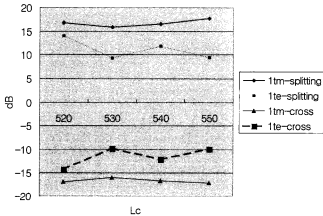


그림 4. α = 0.58°, w = 8 μm로 제작된 편광모드 분리기에 대해서 간섭 영역의 길이를 변화시키면서 측정된 편광모드 분리 비와 누화.

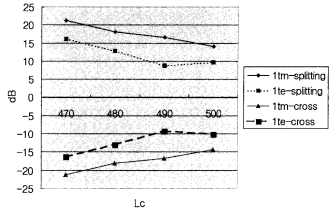


그림 5. α = 0.55°, w = 8 μm로 제작된 편광모드 분리기에 대해서 간섭 영역의 길이를 변화시키면서 측정된 편광모드 분리 비와 누화.

드에 대해서 14.07 dB 분리 비와 -14.23 dB 누화가 측정되었으며, TM 모드에 대해서는 16.77 dB 분리 비와 -16.86 dB 누화가 측정되었다. 한편 그림 5는 0.55° 분기각도와 8 μm 도파로 폭으로 제작된 소자에 대해서 간섭 영역의 길이를 변화시키면서 측정된 것이다. 이 경우에는 간섭 영역의 길이가 470 μm에 대해서 비교적 좋은 결과가 측정되었으며, TE, TM 입사모드에 대해서 분리 비와 누화가 각각 16.18 dB, -16.28 dB와 21.25 dB, -21.28 dB로 측정되었다. 따라서 본 연구에서는 0.55° 분기 각도로 제작된 소자에 대해서 더 양호한 동작 특성을 확인하였다. 제작된 소자의 측정치와 이론치를 표 1에 요약하였다. TE 모드보다는 TM 모드에 대해서 더 좋은 분리 비와 누화가 측정된 것은 이론적 분석에서 확인된 전산모의 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 한편 측정치와 이론치 간에 약 4~5 dB 정도 차가 나는 것은 제작 과정에서 나타나는 공정 오차 때문에 기인되는 것으로 판단된다. 즉 전산모의 실험 때 입력된 파라미터와 비교해서 Ti 두께, 도파로의 폭, 두 모드 영역의 길이, 그리고 확산 온도 등을 정확하게 조절하는 것이 매우 어렵기 때문에 이러한 차가 발생하는 것으로 이해된다. 그러나 Li의 역 확산 때문에 TE 모드에 대해서 나타나는 기생 평면 도파로를 좀더 억제시킬 경우에 이론치와 측정치 간에 나타나는 오차를 줄일 수 있으리라 사료된다.

그림 6은 출력 단 ③, ④로 나오는 광파를 CCD 격의 카메라로 촬영한 것이다. 그림 6(a), (b)는 TE, TM 입사 모드 각각에 대해서 출력 단 ④, ③으로 나오는 것을 알 수 있으며, 그림 6(c)는 TE, TM 모드를 동시에 입사시켰을 때, TE는 ④로, TM은 ③으로 분리되어 출력되는 것을 나타낸 것이다. 그림 7은 1555 nm 파장을 중심으로 ±15 nm 변화시키면서 TE, TM 각 입사 모드에 따라 측정된 분리 비를 나타낸 것이다.

표 1. 분리비와 누화에 대한 이론치와 측정치의 비교

	TE 입사 모드		TM 입사 모드	
	분리비(dB)	누화(dB)	분리비(dB)	누화(dB)
이론치	20.37	-20.4	27.95	-27.96
측정치	16.18	-16.28	21.25	-21.28

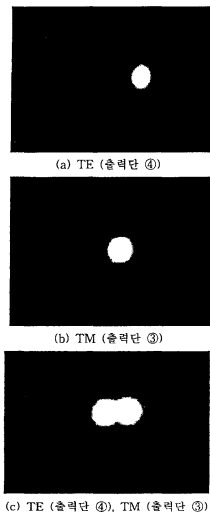


그림 6. 입력단 ①로 입사된 TE, TM 모드의 출력된 near field patterns. (a) TE 출력 모드(출력 단 ④), (b) TM 출력 모드(출력 단 ③), (c) TE, TM 출력 모드(출력 단 ③, ④).

파장 변화에 따라 분리 비는 30 nm 범위 내에서 대체적으로 균일한 동작 특성을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 두 모드 간섭 현상을 기초로 해서 1.55 μm 파장대역에서 동작하는 편광모드 분리기를 Ti: x-cut LiNbO₃ 광도파로 구조를 이용하여 설계, 제작하였다. 결합 각도와 도파로 폭은 0.55°, 0.58° 두 각도와 8 μm 를 중심으로 설계하였으며, 간섭 길이는 470~550 μm 사이의 값을 설정하였다. 광도파로 폭, 분기각도와 간섭영역 길이를 8 μm , 0.55°, 470 μm 로 제작된 소자의 분리 비는 TE, TM 입사모드 각각에 대해서 16.18 dB, 21.25 dB로 측정되었으며, 누화는 -16.28 dB, -21.28 dB로 측정되었다. 삽입손실은 TE, TM 각각에 대하여 2.24 dB/cm, 2.41 dB/cm로 측정되었으며, 30 nm 파장 범위 내에서 비교적 균일한 동작 특성이 관찰되었다.

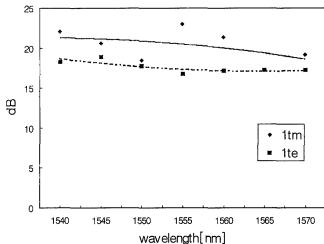


그림 7. 1555 nm 파장을 중심으로 ± 15 nm 변화시키면서 TE, TM 각 입사모드에 따라 측정된 분리 비.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-010-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] H. Onaka, "Photonic networking using optical ADM and OXC Nodes," *Fifth Optoelectronics and Communication Conference*, Chiba, Japan, 2000, pp. 426-427.
- [2] E. L. Wooten, et al., "Rapidly tunable narrowband wavelength filter using LiNbO₃ unbalanced Mach-Zehnder interferometers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 11, pp. 2530-2536, 1996.
- [3] T. Nakazawa, S. Taniguchi, and M. Seino, "Ti:LiNbO₃ acousto-optic tunable filter," *Fujitsu Sci. Tech. J.*, vol. 35, no. 1, pp. 107-112, 1999.
- [4] F. Wehrmann, et al., "Integrated optical, wavelength selective, acoustically tunable 2x2 switches (add-drop multiplexers) in LiNbO₃," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 2, no. 2, 1996.
- [5] Z. Tang, O. Eknoyan, and H. F. Taylor, "Polarization-independent electro-optically tunable wavelength filter in LiNbO₃," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 21, pp. 1758-1759, 1994.
- [6] B. Gance, "Polarization independent coherent optical receiver," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 2, pp. 274-276, 1987.
- [7] R. C. Alfemess and L. L. Buhl, "New low-loss waveguide electrooptic polarization controller for $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$," in *Proc. 4th Int. Conf. Integrated Opt. Optical Fiber Commun.*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 38-39.
- [8] A. Neyer, et al., "A beam propagation method analysis of active and passive waveguide crossings," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, no. 3, pp. 635-642, 1985.
- [9] A. Neyer, "Guided-wave devices based on two-mode-inter-

ference," *SPIE 993 Integrated Optical Circuit Engineering IV*, pp. 68-75, 1988.

using Ti:LiNbO₃ waveguide crossings," *Appl. Phys. Lett.* vol. 55, no. 10, pp. 927-929, 1989.

[10] A. Neyer, "Low-crosstalk passive polarization splitters

1.55 μm polarization mode splitter utilizing two mode interference of Ti:LiNbO₃ optical waveguides

Jung-Hee Kim, Ki-Jo Jung, and Hong-Sik Jung^{*}

Department of Electronics and Computer Engineering, Hong-ik University, Jochiwon 339-800, KOREA

**E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr*

Han-Young Lee

Optical Telecommunication Components Lab., Korea Electronics Technology Institute, KyungGi-Do 451-865, KOREA

(Received August 29, 2001 ; revised manuscript received January 16, 2002)

Passive polarization mode splitters at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ were designed and fabricated based on Ti:x-cut LiNbO₃ single-mode optical waveguide and two-mode interference theory. The splitting ratio with waveguide width $8 \mu\text{m}$, branching angle 0.55° and interfering length $470 \mu\text{m}$ showed 16.18 dB, 21.25 dB for TE and TM input polarization modes, respectively. Polarization crosstalk of -16.28 dB and -21.28 dB for TE and TM modes was achieved. Total insertion losses of 2.24 dB/cm (TE) and 2.41 dB/cm (TM) were also measured. The devices operated nearly wavelength independently over a range of 30 nm.

Classification code : OE.010.