

LiNbO₃의 음향광학효과와 음향파 장벽을 이용한 편광모드 변환형, 파장가변 광 필터에 관한 연구

임경훈 · 정홍식

홍익대학교 전자전산공학과

(2000년 2월 22일 받음, 2000년 5월 30일 수정본 받음)

음향파 장벽 구조와 음향광학효과를 이용한 편광모드 변환형 파장가변 광 필터를 LiNbO₃와 Ti 이종 확산 공정 기술을 이용하여 제작하였다. 1551.6 nm 파장의 TE, TM 입사 편광모드에 대해서 173.07 MHz, 173.05 MHz의 RF 주파수에서 81% 이상의 변환효율과 ~200 kHz(~1.83 nm)의 통과대역폭을 얻었으며, 구동파워는 10.97 mW로서 음향파 장벽이 없는 광 필터 파위의 10%에 불과 하였다. 파장 변화율과 부 모드 레벨이 각각 8.2 nm/MHz와 -4 dB로 측정되었다.

OCIS codes : 130.0130, 160.1190.

I. 서 론

다양한 멀티미디어 정보가 포함된 인터넷 수요가 매년 폭발적으로 증가되고 있는 추세에 비추어 볼 때 Tbps급의 대용량 광통신시스템이 멀지 않은 장래에 필요할 것으로 예측되고 있으며, 이러한 시스템들을 성공적으로 개발, 확산시키기 위해서는 다양한 광집적 소자들이 필요한데, 특히 파장통과 대역폭이 좁고, 파장대역을 넓게 가변 시킬 수 있으며, 스위칭 속도가 빠른 집적광학형 광 필터의 중요성이 점점 증대되고 있다.^[1] 이러한 파장가변형 광 필터는 광전송 시스템뿐만 아니라, 광교환 시스템, 광가입자망 그리고 광신호처리 시스템에서도 매우 중요한 역할을 수행하고 있다.

지금까지 대부분의 집적광학 형태의 광 필터는 LiNbO₃의 전기광학효과, 스트레인광학효과, 음향광학효과와 편광모드 변환 원리를 주로 이용하여 왔다. 전기광학효과를 이용한 광 필터의 파장대역폭과 스위칭 속도는 양호하나 파장가변 대역폭이 좁고, 편광모드 변환과 파장가변에 각각 독립적인 두 개의 전기 신호가 필요하다.^[2] 스트레인 광학효과를 이용한 소자는 파장가변에만 한 개의 전기적인 신호가 필요하나, 아직 그 성능을 인정받기엔 초기단계이다.^[3,4] 한편 음향광학효과를 이용하는 가변파장 광 필터(AOTF: Acousto-optic Tunable Filter)는 150 nm 이상의 파장을 가변 시킬 수 있으며, 2 nm 이하의 파장 통과대역폭, μ s 정도의 비교적 빠른 스위칭 속도, 그리고 여러 파장채널을 동시에 선택할 수 있는 특성들 때문에 많은 연구가 진행되어져 왔으나, 표면 음향파(SAW: Surface Acoustic Wave) 구동에 필요한 RF 파워가 크고, 부 모드(sidelobe)가 비교적 크다는 지적을 받고 있다.^[5,6]

본 논문에서는 음향파 장벽(acoustic barrier) 구조를 이용하여, SAW의 구동파워를 감소시킬 수 있는 AOTF를 제작하였으며, 파장통과 대역폭, 편광모드 변환률, RF 구동 주파수 변화에 따른 파장가변 변화율, 부 모드 레벨 그리고 SAW 발생에 필요한 RF 구동파워를 측정하였으며, 음향파 장벽이 없는

AOTF를 제작하여 구동파워를 비교하였다.

II. AOTF의 동작원리

음향광학효과를 이용하는 파장가변 광 필터의 동작은 SAW에 의해서 LiNbO₃ 표면에 생성된 복굴절 섭동(birefringence perturbation)이 광도파로를 진행하는 두 편광모드를 상호 결합하여, 변환시키는 원리에 기초한다. LiNbO₃와 같은 복굴절 기판에 제작된 광도파로를 따라 진행하는 두 편광모드(TE, TM)는 유효굴절률 값이 같지 않기 때문에 진행하는 위상속도 또한 다르며, 이럴 경우에 두 편광모드간에 결합 효율도 떨어지게 된다. 이러한 구조에서는 일반적으로 두 편광모드의 위상속도를 서로 정합시켜 주어야만 완전한 모드 변환을 기대할 수 있다. 따라서 AOTF 경우에는 SAW의 모멘텀이 편광모드간의 위상속도 부 정합을 보상시킬 때 완전한 편광모드 변환이 일어난다. 한편 편광모드간에 결합이 일어나, 다른 모드로 변환되는데 필요한 최소거리, L_b 는 아래와 같이 정의된다.

$$L_b = \frac{\lambda}{n_{TE} - n_{TM}} = \frac{\lambda}{|\Delta n|} \quad (1)$$

여기서 n_{TE} 와 n_{TM} 은 TM과 TE 편광모드의 유효굴절률이며, λ 는 광파의 파장이다. 교차지 트랜스듀서(IDT: Inter Digital Transducer)에 의해서 발생하는 SAW의 파장 Λ 가 식 (1)의 결합길이 L_b 와 같을 때 비로서 완전한 모드변환이 일어나게 된다. 아래와 같은 수식으로 SAW의 파장을 정의할 수 있으며, 이 파장이 궁극적으로 IDT 전극 주기에 해당된다.

$$\Lambda = \frac{V_s}{f_o} = \frac{\lambda}{|\Delta n|} \quad (2)$$

여기서 V_s 와 f_o 는 SAW의 위상속도와 구동주파수를 의미한다. 식 (2)에서 Δn 은 기판 내에서 균일하지 못한 물질 조성비, 기판의 온도 변화, 균일하지 못한 Ti 채널 패턴의 두께와 폭

때문에 야기되는 유효굴절률 변화에 의해서 민감하게 영향을 받는다. 이러한 현상이 광도파로를 따라 진행하는 편광모드간의 위상 부 정합을 일으키는 주요 원인이 되며, 궁극적으로 광 필터의 성능에도 심각하게 영향을 미치게 된다. 따라서 Ti 채널 패턴을 형성할 때 박막 두께가 균일하게 증착되도록 장비와 조건을 선택해야되며, 또한 채널 폭이 균일하게 형성될 수 있도록 세심한 주의가 요구된다. 한편, 식 (2)를 만족할 때 편광모드 변환은 공진 특성을 나타내며, 대응되는 파장대역폭 $\Delta\lambda$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\lambda = \frac{0.8\lambda^2}{L \cdot \Delta n} \quad (3)$$

여기서 L은 편광모드 변환이 일어나는 소자 전체 길이를 나타낸다.

Schmidt는 LiNbO₃에 Ti, Ni 또는 Cr을 확산시킬 경우, 추가적인 SAW의 손실 없이 속도를 증가시킬 수 있다고 발표하였다.^[7] Ti이 확산된 영역에서는 SAW의 속도가 약 1% 정도 빨라지고, 그렇지 않은 영역에서는 Li₂O의 out-diffusion 때문에 속도가 늦어져, 궁극적으로는 SAW를 가둘 수 있는 음향파 장벽이 형성된다.^[8] 본 연구에서는 Ti 확산을 이용하여 음향파 장벽 구조를 형성하였다.

III. 제작공정

AOTF의 제작공정은 음향파장벽 제작, 광도파로 제작 그리고 IDT 제작으로 크게 3 단계로 구분된다. 단계별로 공정을 검토해보면 다음과 같다. 먼저 25 mm×12 mm 크기의 X-cut LiNbO₃시편에 magnetron sputter로 ~1600 Å의 Ti을 증착하였다. 그림 1과 같이 음향파장벽의 폭이 200 μm, 장벽간의 간격이 120 μm가 되도록 Ti 패턴을 사진식각(photo lithography) 공정으로 형성한 다음, 1050°C 온도에서 24시간 동안 습식 산소(wet-O₂) 분위기에서 확산하였다. 장시간 확산 후 표면을 관찰한 결과 기판 가장자리에서 거북이 등 모양의 표면 손상이 약간 관찰되었을 뿐 전반적으로 표면은 양호하였으며, 그 밖의 특이한 현상은 나타나지 않았다. 1550 nm 파장대역에서 단일모드 특성을 갖는 채널형 광도파로를 제작하기 위해서 ~1000 Å의 Ti을 다시 증착하고, 8 μm 폭을 갖는 Ti 채널 패

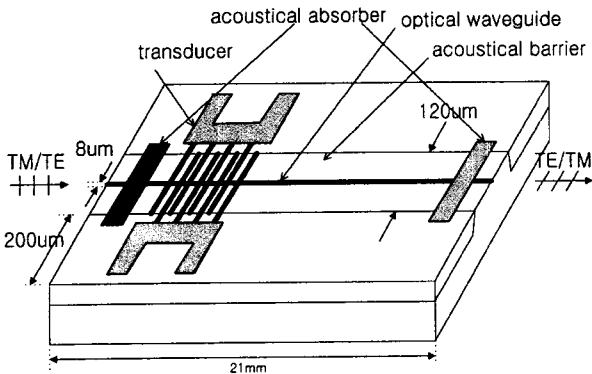


그림 1. 음향파 장벽 구조를 갖는 AOTF의 개략도

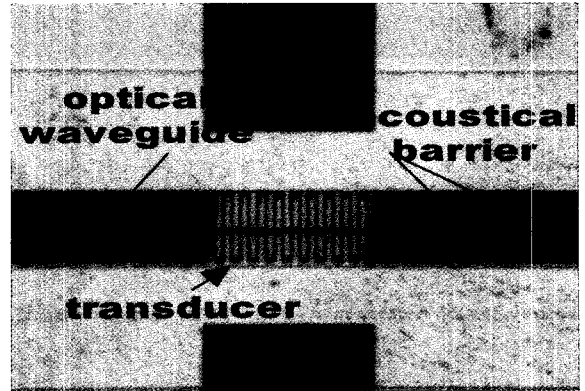


그림 2. 제작된 AOTF의 현미경 표면 확대 사진.

턴을 형성한 다음, 1050°C, 습식 산소 분위기에서 8시간 확산하여 그림 1과 같이 음향파 장벽 중간에 광도파로를 형성하였다. 광파와의 결합을 위해서 입사 및 출력 단면을 optical grade 수준으로 연마하였다. 최종적으로 주기 개수 N=10, 20, 50, 개구면 폭 120 μm, 주기 21.2 μm 구조를 갖는 IDT를 NiCr으로 제작하였다. 그림 2는 음향파 장벽을 이용하여 제작된 AOTF의 현미경 확대사진이다. 두 번의 고온 확산 공정동안 일어날 수 있는 out-diffusion에 의한 기생(parasite) 광도파로를 막기 위해서, 습식 산소 분위기에서 확산을 수행하였으며, 관찰 결과 1550 nm 파장영역에서는 거의 관찰되지 않았다.

IV. 측정결과 및 검토

제작된 AOTF의 특성을 측정하기 위해서 그림 3과 같이 Butt 결합시스템을 구성하였다. 입사 편광모드를 바꿀 수 있도록 편광조절기를 사용하였으며, 출력단에 편광분석기를 설치하여 특정 편광모드만 선택할 수 있도록 하였다. 또한, 실시간 측정을 위해서 DAQ 카드와 LabView 프로그램을 활용하였다. 소자를 측정하기전에 IDT에 의해서 구동된 SAW가 입·출력면에서 반사되는 것을 억제하기 위해서 입·출력단 전후에 scotch tape을 이용하여 absorber를 형성하였다. 모드변환을 측정하기 전에 음향파 장벽사이에 형성된 채널형 광도파로의 TE, TM 모드를 진동거울(vibration mirror)을 이용하여 분석하였다. TE, TM 모두 단일모드 특성임을 보여주었으며, 다만

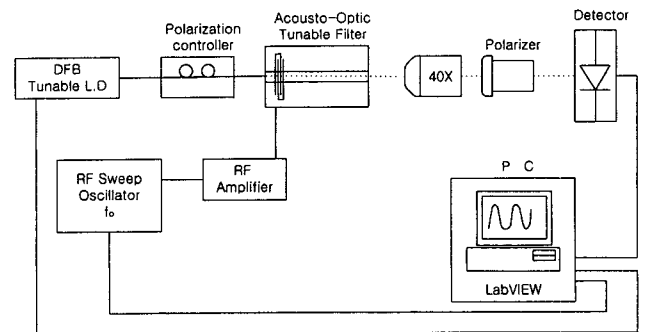


그림 3. 실시간 측정을 위한 Butt 결합 측정 시스템

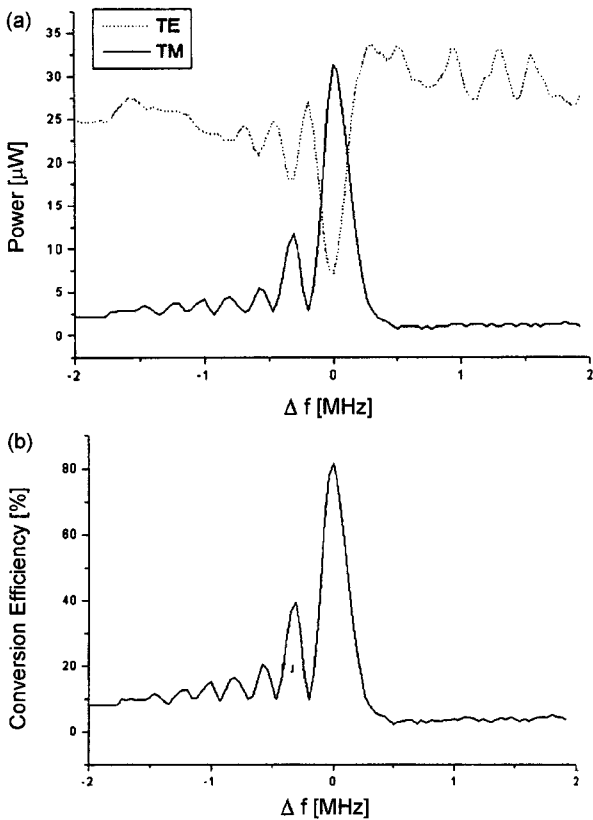


그림 4. 1551.6 nm 파장의 TE 입사모드에 대해서 10.97 mW의 RF 구동 주파수를 변화시키면서 측정된 (a) TE, TM 모드 파워와 (b) 변환효율.

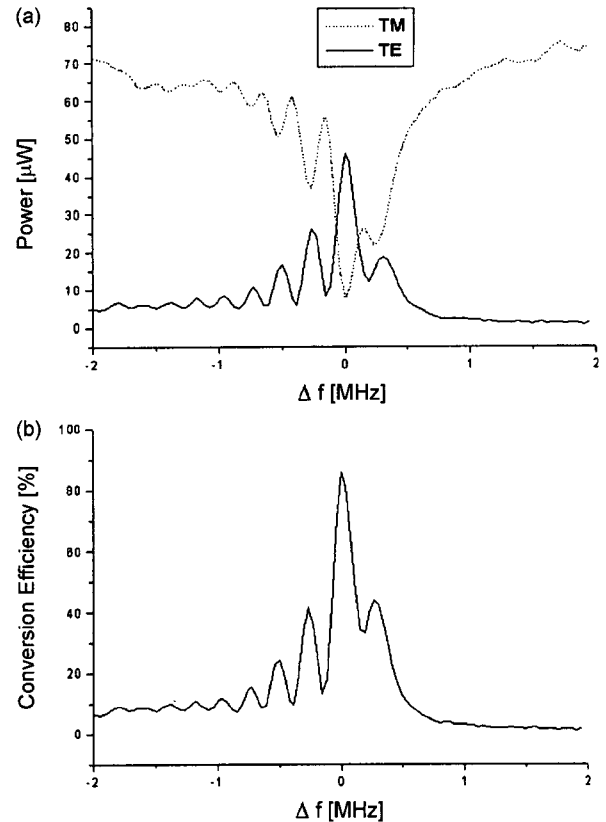


그림 5. 1551.6 nm 파장의 TM 입사모드에 대해서 10.97 mW의 RF 구동 주파수를 변화시키면서 측정된 (a) TE, TM 모드 파워와 (b) 변환효율.

수직(vertical) 세기 분포만이 비대칭 특성을 나타내었는데 이는 광도파로의 아래, 위 매질이 서로 다르기 때문에 나타나는 것으로 해석된다.

주기 개수 $N=20$, 개구면 폭 $W=120\mu\text{m}$, 길이 $L=18\text{mm}$ (두 absorber간의 간격)와 음향파 장벽 구조를 갖는 AOTF를 측정하였다. 모드변환이 최대가 되는 RF 구동 주파수로부터 $\pm 2\text{MHz}$ 범위의 주파수를 변화시키면서, 1551.6 nm 파장을 갖는 DFB 레이저다이오드의 TE, TM 입사 편광모드 각각에 대해서 모드파워의 세기를 그림 4, 5와 같이 측정하였다. 이 측정에서 편광모드 변환이 최대로 일어나는 주파수는 TE, TM 각각에 대해서 173.07 MHz, 173.05 MHz로 측정되었으며, 인가된 RF 구동파워와 변환효율은 10.97 mW에서 각각 81.5%, 85.8%로 측정되었다. 또한 첫 번째 부 모드의 최대 값은 중심 주파수로부터 -4.26dB , -3.89dB , 통과대역폭(FWHW)은 240 kHz (2.15 nm), 190 kHz (1.7 nm)로 각각 측정되었다.

이어서 파장가변형 반도체레이저를 이용하여 모드변환이 최대가 되는 중심 파장1551.6 nm로부터 $\pm 20\text{nm}$ 파장대역을 가변시키면서, TM 입사모드에 대해서 변환된 TE 모드의 세기를 그림 6과 같이 측정하였다. RF 구동 신호의 중심 주파수 173.054 MHz, 10.97 mW 구동파워에서 1.89 nm의 통과대역폭과 88.1%의 변환효율이 측정되었으며, 식 (3)으로부터 계산된 1.83 nm와 매우 가깝게 일치됨을 확인하였다.

그림 4-6에서 알 수 있듯이 부 모드들이 중심으로부터 비대

칭적인 특성을 보이고 있는데, 이것에 대한 원인을 다음 2가지 면에서 해석할 수 있다. LiNbO₃ 기판의 복굴절은 온도에 따라 $d(\Delta n)/dT = -3.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 정도로 변하는 것으로 알려져 있다.^[9] 한편 IDT에서 발생된 SAW는 absorber에 의해, 입·출력면에서 흡수되기 때문에 absorber가 부착된 부분의 온도가 올라가게 된다. 즉 소자의 가운데로부터 멀어질수록 온도가 상승되어 복굴절 Δn 이 감소 되는 현상을 초래하게 되며, 이로 인하여 광파가 진행하는 동안 위상정합 조건이 달라져서, 부 모드가 비대칭적으로 나타나게 된다. 심한 경우에는 부 모드가 매우 크게 나타나기도 한다. 또 하나의 원인은 광도파로 제작 시 Ti 채널의 두께, 폭등이 매우 균일해야 되는데, 공정 과정에서 오차가 존재할 경우, Δn 이 변해 이로 인하여 부 모드가 비대칭적으로 나타날 수 있다. 본 측정에서는 두 가지 원인이 복합적으로 존재하여, 부 모드의 비대칭과 비교적 큰 레벨이 발생된 것으로 분석된다. 모드변환 효율을 높이려면 RF 구동파워를 증가시킬 수 있으나, 상대적으로 증가되는 SAW 파워 때문에 온도가 상승되어 absorber가 녹는 현상이 발생하였으며, 이로 인하여 부 모드가 더 비대칭적으로 커지는 현상이 관찰되었다. 따라서 본 측정에서는 80~90% 정도의 변환효율을 얻을 수 있도록 구동 RF의 세기를 제한하였다.^[10,11] SAW의 구동 주파수를 가변 시키면서 모드 변환이 최대가 일어나는 파장의 변화율을 그림 7과 같이 측정하였다. 이 측정에서 파장 변화율은 8.2 nm/MHz로 측정되었고, 이 값은 발표된 참

표 1. 음향파 장벽을 이용한 AOTF와 단순한 구조의 AOTF와의 성능 비교

비교항목 부품	입사모드→ 출력모드	RF 주파수 (MHz)	RF 파워 (mW)	변환효율 (%)	부모드레벨 (dB)	FWHM (kHz)
AOTF with Acoustic Barrier	TE→TM	173.07	10.97	81.5	-4.26	240
	TM→TE	173.05	10.97	85.5	-3.89	190
AOTF without Acoustic Barrier	TE→TM	174.0	92.04	91.8	-4.72	540

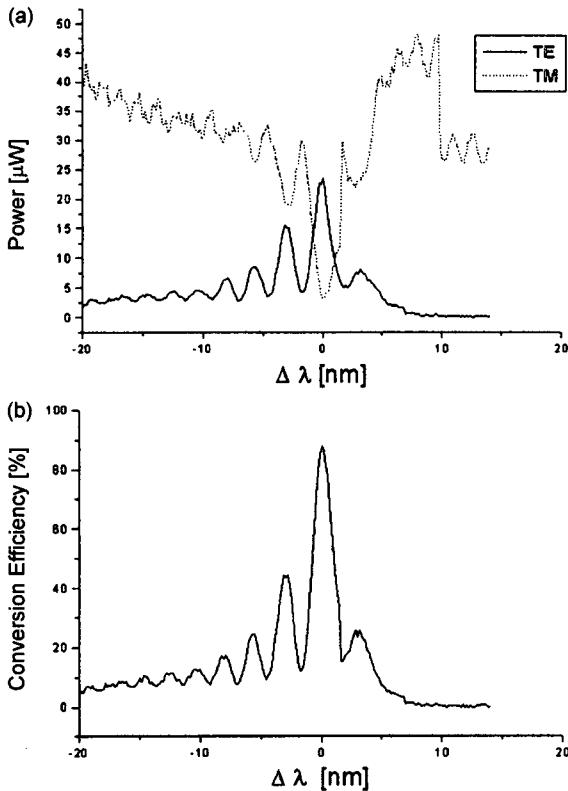


그림 6. 173.05 kHz, 10.97 mW의 RF 구동 신호에 대해서 TM 입사모드의 파장을 변화시키면서 측정된 (a) TE, TM 모드 파워와 (b) 변환효율.

고문헌의 값과 매우 잘 일치되었다.^[12]

음향파 장벽 구조를 갖는 AOTF의 측정 실험 결과들을 음향파 장벽 구조 없이 동일한 공정 조건과 제원으로 제작된 AOTF의 측정 결과와 비교하기 위해서 표 1과 같이 요약하였다. 전자의 경우에 구동파워는 10.97 mW로서 음향파 장벽이 없는 후자와 비교해서 90% 가까이 줄일 수 있었으며, 통과 대역폭 또한 50% 정도 줄일 수 있었다.

V. 결 론

SAW 구동파워를 줄이기 위하여, 이중 Ti 확산공정을 이용하여 음향파 장벽 구조를 갖는 AOTF를 제작하였다. 1551.6 nm 파장의 TE, TM 입사 편광모드에 대해서 173.07 MHz, 173.05 MHz의 RF 중심 주파수에서 81% 이상의 변환효율과 ~200 kHz(~1.83 nm)의 통과대역폭을 얻었으며, 이 경우에 구동파워는 10.97 mW로서 음향파 장벽이 없는 AOTF와 비교해

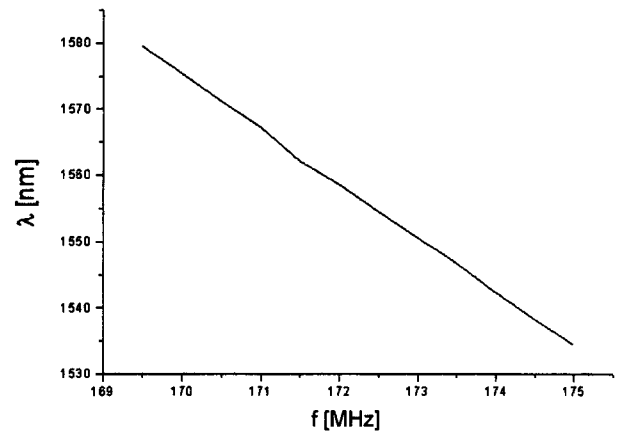


그림 7. TM 입사모드에 대해서 RF 주파수 변화에 따라 모드변환이 최대가 되는 파장의 변화.

서 90% 가까이 줄일 수 있었다. 그러나 부 모드의 최대 값이 이론 치의 절반에 해당되는 ~4 dB를 나타내었다. 한편 측정 시 기판에 나타나는 온도 변화와 광도파로 제작 시 Ti 채널의 두께 및 폭이 균일하지 못해서 부 모드가 비대칭적으로 측정되었다. 특히 absorber가 부착된 입·출력 부근에서 온도가 높기 때문에 기판 가운데를 중심으로 온도를 비슷한 수준으로 상승시킬 경우에 부 모드의 비대칭적 구조를 해결할 수 있으리라 생각된다. 또한 SAW와 광파간의 결합 정도를 서서히 증가시키고, 감소시키는 가중결합(weighted coupling) 방법을 이용할 경우 부 모드의 레벨을 상당히 감소시킬 수 있으리라 생각된다.^[13]

감사의 글

본 연구는 1998년도 정보통신부의 대학기초연구비(2차년도)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake, and K. Mori, LEOS Newsletter, 7 (1999).
- [2] F. Heismann, L. Buhl, and R. C. Alferness, Electron. Lett. **23**, 572 (1987).
- [3] Z. Tang, O. Eknoyan, H. F. Taylor, and V. P. Swenson, Electron. Lett. **30**, 1758 (1994).
- [4] H. S. Jung, O. Eknoyan, and H. F. Taylor, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, L1406 (1999).
- [5] D. A. Smith, J. E. Baran, J. J. Johnson, and K. W. Cheung,

- IEEE J. Select. Area Commun. **6**, 1151 (1990).
- [6] 송석호, 정홍식, 한국통신학회논문지, **23**(9B), 2623 (1998).
- [7] R. V. Schmit, Appl. Phys. Lett. **27**(1), 8 (1975).
- [8] J. F. Weller, J. D. Crowley, and T. G. Giallorenzi, Appl. Phys. Lett. **31**(3), 146 (1977).
- [9] R. C. Booth, B. E. Daymond-John, P. E. Sturges, and M. G. F. Wilson, Electron. Lett. **20**, 1045 (1984).
- [10] D. A. Smith, A. d'Alessandro, and J. E. Baran, Appl. Phys. Lett. **62**(8), 814 (1993).
- [11] W. R. Trutna, D. W. Dolfi, and C. A. Flory, Optics Lett. **18**, 28 (1993).
- [12] J. Frangen, H. Herrmann, R. Ricken, H. Seibert, W. Sohler, and E. Strake, Electron. Lett. **25**, 1583 (1989).
- [13] D. A. Smith and J. J. Johnson, Appl. Phys. Lett. **61**(9), 1025 (1992).

A study of polarized mode convertible, wavelength tunable optical filter utilizing acoustic barrier and acousto-optic effect in LiNbO₃

Kyunghoon Lim and Hongsik Jung

Department of Electronics and Computer Engineering, Graduate School, Hong-Ik University, 121-791, Korea

(Received February 22, 2000, Revised manuscript received May 30, 2000)

A polarized mode convertible, wavelength tunable optical filters with acoustic barriers and acousto-optic effect have been produced in LiNbO₃ substrate utilizing the Ti double diffusion technique. Polarization conversion in excess of 81% and a spectral width of ~200 kHz (~1.83 nm) were achieved at a wavelength of 1551.6 nm and RF frequencies of 173.07 kHz and 173.05 kHz for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) input polarizations, respectively. The electrical driving power was 10.97 mW and reduced to about 10% of one for an optical filter without an acoustic barrier. A linear tuning rate of 8.2 nm/MHz and sidelobe intensity of -4 dB was demonstrated.

OCIS codes : 130.0130, 160.1190.