

## LiNbO<sub>3</sub>의 스트레인광학형 광도파로를 이용한 세기 광 변조기와 광 파워 분배기

정홍식†

홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부

☉ 339-701 충남 연기군 조치원을 신안동 산 34번지

(2002년 9월 일 받음, 2002년 1월 3일 수정본 받음)

LiNbO<sub>3</sub>의 스트레인광학효과와 ~1.4 μm 두께 이상으로 증착된 Mo(molybdenum)/Pt(platinum) 금속 박막으로부터 발생하는 압축스트레인을 이용하여 채널 광도파로 제작 공정을 개발하였다. 제작된 광도파로는 단일모드로 관찰되었으며, 삽입 손실이 TE, TM 입사 편광모드 각각에 대해서 6.2, 7.7 dB/cm로 측정되었다. 전극 길이와 간격이 11 mm, 21 μm인 광변조기를 스트레인광학형 광도파로 구조를 이용하여 제작하였으며, V<sub>π</sub>=16.1 V와 100% 변조 깊이가 1.55 μm 파장 영역에서 측정되었다. 또한 1×2 광 파워 분리기를 제작한 결과 0.63 μm 파장 영역에서 on/off 특성이 ±25V에서 관찰되었다.

주제어 : strain-optic effect, LiNbO<sub>3</sub> elect-optic effect, intensity optical modulator, optical power splitter, integrated optical devices.

### I. 서 론

LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, SBN 등과 같은 ferro-electric 물질들은 일반적으로 비교적 큰 전기광학 계수들을 보유하고 있기 때문에 이 효과를 활용하기 위해서 광도파로 소자들에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다. 특히 이러한 물질들을 이용하여 다양한 형태의 광집적 소자들을 구현하기 위해서는 저 손실 단일모드 채널형 광도파로가 필요하다. 지금까지 국내외적으로 광도파로 제작과 관련된 연구의 대부분은 Ti(titanium) 확산, 이온 교환, vapor 확산 등을 이용하여 왔다. Ti 확산을 이용해서 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>에 광도파로를 제작하는 방법은 다른 방법과 비교해서 전반적으로 우수한 특성을 나타내기 때문에 매우 널리 활용되어 왔다.<sup>[1]</sup> 그러나 Ti 확산 공정은 1000°C 이상의 고온 확산에서 동반되는 Li(lithium)의 역 확산(out-diffusion) 때문에 나타나는 기생(parasite) 평면 광도파로를 억제하는데 매우 까다로운 확산 분위기 조절이 요구되고 있다. 한편 LiTaO<sub>3</sub>에 Ti 또는 Zn(zinc)-vapor 확산을 수행할 경우 확산 온도가 Curie 온도보다 훨씬 높기 때문에 poling이라는 까다로운 추가 공정이 요구된다.<sup>[2]</sup> 이온 교환 법은 200-300°C 정도의 비교적 낮은 온도에서 공정이 진행되지만, 제작된 광도파로는 이방성(extraordinary) 편광 모드만 도파시키기 때문에 TE, TM 두 편광 모드를 동시에 이용하는 광도파로 소자에는 적합하지 못하다.<sup>[3]</sup>

따라서 근래에는 기존의 제작 방법과는 달리 ferro-electric 물질들이 가지고 있는 스트레인광학효과(strain-optic effect)를 이용하여 새로운 개념의 광도파로 제작이 시도되고 있다.<sup>[4,5]</sup> LiNbO<sub>3</sub>의 열팽창 계수 값과 차가 큰 금속 박막 또는 유전체 박막을 상온보다 높은 온도에서 증착시킬 경우, 상온에서

LiNbO<sub>3</sub> 결정과 증착된 박막간의 열팽창 계수가 다르기 때문에 압축 스트레인(compressional strain)이 발생되고, 스트레인 광학효과에 의해서 스트레인 세기에 비례하여 굴절률이 증가 된다. LiNbO<sub>3</sub> 보다 20~30배 큰 전기광학 계수를 보유하고 있지만, 적합한 저 손실 광도파로 제작 방법이 없어서 널리 활용되지 못했던 SBN(strontium barium niobate) 경우에도 molybdenum(Mo) 박막과 스트레인광학효과를 이용하여 성공적으로 광도파로를 제작하였으며,<sup>[6-8]</sup> 이 스트레인광학형 광도파로를 이용하여 0.25V의 동작 전압을 갖는 세기(intensity) 광변조기가 보고되었다.<sup>[9]</sup> 이 기술의 특징은 기존의 불순물 확산법과는 달리 물질의 순수성이 유지되기 때문에 산란에 의해서 나타나는 광 손실을 최소화시킬 수 있다. 확산공정과 비교해서 제작 공정이 비교적 간단하며, 따라서 공정비용도 저렴해지고 그리고 소자의 재현성이 매우 좋은 특징을 나타낸다.

본 연구에서는 LiNbO<sub>3</sub>에 Mo/Pt(platinum) 금속 박막을 활용하여 1.55 μm, 0.63 μm 파장 대역에서는 동작하는 세기 광 변조기 그리고 광 파워 분리기(optical power splitter)를 제작 하였다. II장에서는 LiNbO<sub>3</sub>의 스트레인광학효과를 이론적으로 검토한 다음, 압축스트레인과 관련된 전산모의 실험 결과를 제시하였으며, 금속박막을 이용한 스트레인광학형 광도파로 제작 공정과 관련된 내용은 III장에서 요약하였다. IV장과 V장에서는 스트레인광학형 광도파로를 이용한 세기 광변조기와 가변형 광 파워 분배기에 관해서 서술하였으며, VI에서 끝맺음을 하였다.

### II. 스트레인광학효과

적당한 두께의 금속 박막 또는 유전체 박막을 상온보다 높은 온도에서 증착시킨 후, 그림 1과 같이 적당한 채널 폭 만큼 해당되는 박막을 식각(etching)할 경우 박막의 열 팽창 계수가

†E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

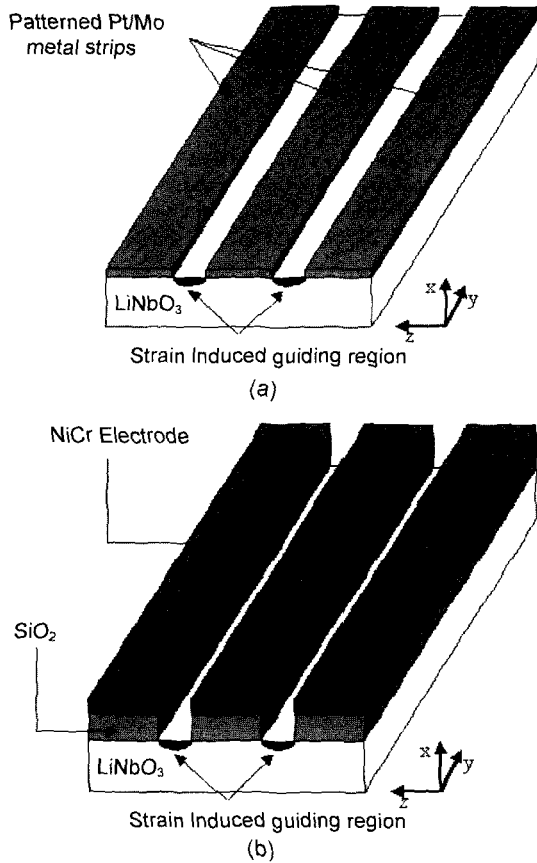


그림 1. LiNbO<sub>3</sub>에 증착된 (a)금속 박막, (b)SiO<sub>2</sub> 박막으로부터 발생하는 압축스트레인과 스트레인광학효과를 이용하여 제작된 스테리인광학형 채널 광도파로 구조.

기판의 열팽창 계수 보다 작기 때문에, 식각된 박막의 가장자리가 채널 중앙으로 팽창하면서 박막에 축적되어 있던 스트레인 에너지를 완화시키게 된다. 따라서 박막으로부터 스트레인의 완화는 식각된 채널 밑 기판에서 그림 1에서 표시된 z 방향으로 국부적인 압축 스트레인으로 나타나게 된다. LiNbO<sub>3</sub>의 6×6 스트레인광학 계수의 텐서는 식 (1)과 같으며, 그림 1과 같은 구조에서 나타난 압축 스트레인은 e<sub>3</sub>에 해당된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{13} & -P_{14} & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{31} & P_{33} & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & -P_{41} & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{14} & \frac{P_{11}-P_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 [P]는 스트레인광학 계수 텐서, [e]는 스트레인 그리고  $[\Delta B_{ij}]$ 는 relative dielectric impermeability 텐서 증가량을 의미한다. 여기서 relative dielectric impermeability, B는 유전상수 ε와 역수 관계를 갖는다. LiNbO<sub>3</sub>의 결정 축 x, y, z를 고려하면, 1→x, 2→y, 3→z, 4→yz, 5→zx, 6→xy에 대응

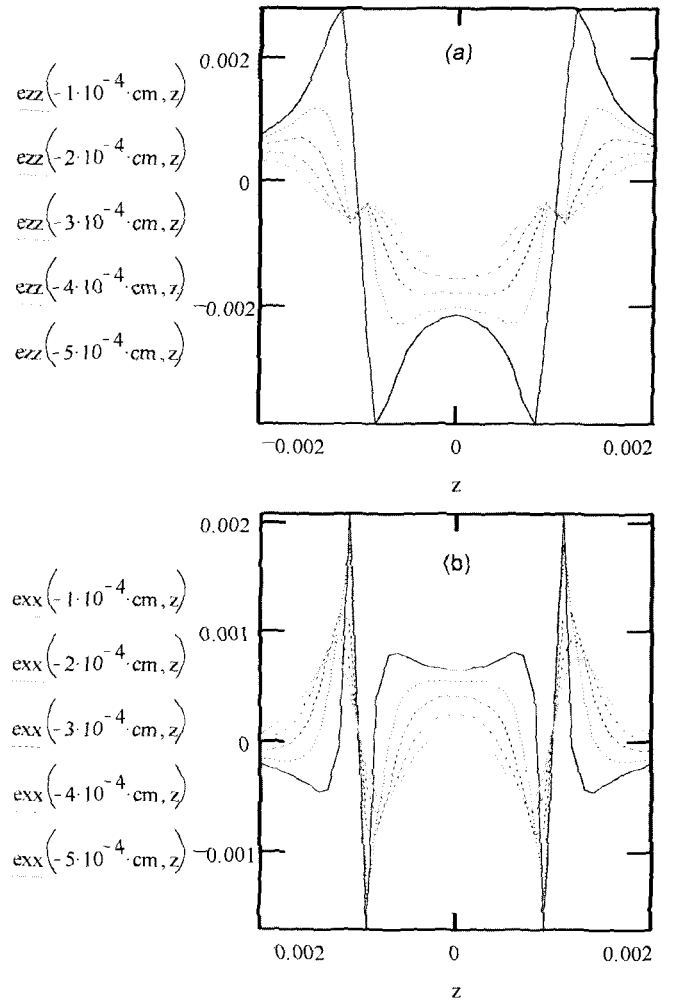


그림 2. 그림 1(b) 구조에서 기판 깊이(즉 도파로 깊이)를 파라미터로 계산된 압축스트레인 분포. (a) 수평 방향으로 계산된 압축스트레인 분포, (b) 수직 방향으로 계산된 압축스트레인 분포.

되며, 그림 1과 같은 구조에서 발생하는 압축스트레인 e<sub>xx</sub>, e<sub>zz</sub>에 의한, relative dielectric impermeability의 증가량은 아래와 같다.

$$\Delta B_x = P_{11} \cdot e_{xx} + P_{13} \cdot e_{zz} \quad (2-1)$$

$$\Delta B_z = P_{31} \cdot e_{xx} + P_{33} \cdot e_{zz} \quad (2-2)$$

본 연구에서는 참고문헌 [10]에 제시된 closed-form 공식들을 이용하여, 기판의 깊이(x 축)에 따라 수직(xx), 수평(zz) 방향의 압축스트레인을 그림 2와 같이 얻었다. e<sub>zz</sub>(-1·10<sup>-4</sup>·cm, z)는 1 μm 광도파로 깊이에서 수평 방향으로 나타난 strain 값을 의미하며, 그림 2의 x[cm] 축은 식각된 박막 폭의 임의의 위치를 나타낸다. x=0의 위치는 식각된 광도파로 폭 가운데를 의미한다. 박막이 식각된 가장자리에서 대칭적으로 스트레인이 가장 크게 계산되었으며, 깊이가 깊을수록 스트레인의 세기가 점점 약해지는 것을 알 수 있다.

Relative dielectric impermeability B는 유전상수 ε과 역수 관계이기 때문에, ΔB 증가량에 대한 유전상수 증가량 Δε는

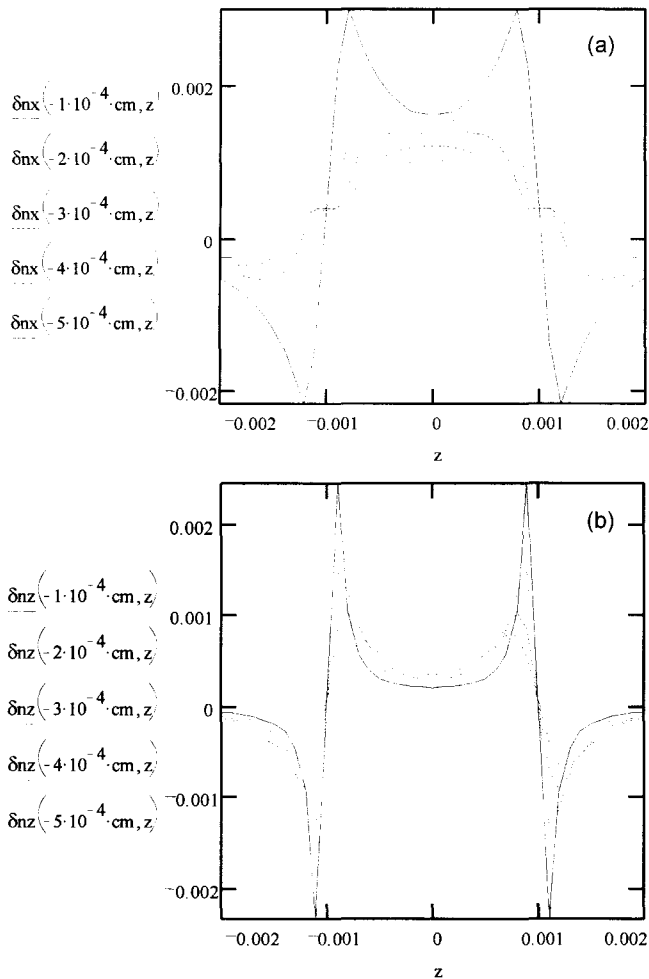


그림 3. 압축스트레인과 스트레인광학효과를 이용하여 계산된 굴절률 증가량 분포. (a) x 방향의 굴절률 증가량, (b) z 방향의 굴절률 증가량.

다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta \epsilon_m = -\epsilon_m^2 \cdot \Delta B_m \quad (m = 1, 2, \dots, 6) \tag{3}$$

또한 굴절률과 유전율의 관계,  $n = \sqrt{\epsilon}$  식 (3)에 적용할 경우, 굴절률 증가량을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta n_m = \sqrt{-\epsilon_m^2 \cdot \Delta B_m} \quad (m = 1, 2, \dots, 6) \tag{4}$$

식 (2)를 식 (4)에 대입할 경우, 압축 스트레인에 의한 x, z축 방향의 굴절률 증가량  $\Delta n_x, \Delta n_z$ 는 다음과 같다.

$$\Delta n_x = \sqrt{-\epsilon_x^2 (P_{11}e_x + P_{13}e_z)} \tag{5-1}$$

$$\Delta n_z = \sqrt{-\epsilon_z^2 (P_{31}e_x + P_{33}e_z)} \tag{5-2}$$

그림 3의 (a), (b)는 압축 스트레인에 의한 x, z축 방향의 굴절률 증가량,  $\Delta n_x, \Delta n_z$ 를 기관의 깊이에 따라 계산된 결과를 나타낸 것이다. 그림 3의 굴절률 증가량 분포는 그림 2의 스트레인 분포와 매우 유사하며, 굴절률 증가량은 스트레인 세기에

비례됨을 알 수 있다. 굴절률 분포 또한 식각된 박막 가장자리 양 안쪽에서 가장 높은 값이 계산되었으며, 기관 표면에 가까울수록 굴절률이 증가되었다. 결정 축 x 방향의 굴절률 증가량은 광도파로에서 정상(ordinary) 편광모드(그림 1 구조에서는 TM 모드)에 대한 굴절률 증가를 의미하며, z 방향의 굴절률 증가량은 이상 편광모드(그림 1 구조에서는 TE 모드)에 대한 굴절률 증가에 해당된다. 1.55 μm 파장대역의 광도파로 구조의 유효 깊이를 약 2.5-3 μm 정도이며, z=0에서 그림 3(a), (b)의 굴절률 증가량  $\Delta n_x, \Delta n_z$ 는 0.0015와 0.0005, 가장자리에서는 0.0025 이상으로 계산되었다. 한편 LiNbO<sub>3</sub>에 Ti 확산으로 제작된 광도파로의 굴절률 증가량과 스트레인광학 효과에 의한 증가량을 비교할 때, 양 수치의 범위가 비슷함을 알 수 있다. 또한 굴절률 증가량  $\Delta n_x, \Delta n_z$ 는 박막의 두께, 채널 폭, 증착 온도 그리고 박막 재료 등에 민감하게 영향을 받는다.

### III. 스트레인광학형 광도파로 제작공정

LiNbO<sub>3</sub> 기관에 스트레인을 발생시키기 위해서 금속과 SiO<sub>2</sub> 박막을 이용하여 광도파로를 제작하였다. X-cut LiNbO<sub>3</sub> 기관 위에 16~25 μm 범위의 채널 폭과 400 μm 채널 간격을 갖는 photo-resist 채널 패턴을 형성한 다음, magnetron sputter를 이용하여 1.4 μm Mo과 0.1 μm Pt을 증착하고, 이어서 lift-off 공정 기술을 이용하여 resist 위에 증착된 금속 박막을 제거하여 그림 1(a)와 같은 구조를 제작하였다. 이 구조에서는 Mo의 열팽창 계수(4.8×10<sup>-6</sup>/°C)가 LiNbO<sub>3</sub>의 열팽창 계수(7.5×10<sup>-6</sup>/°C) 보다 작기 때문에 금속 박막이 없어진 LiNbO<sub>3</sub> 기관 표면 바로 아래에서 압축 스트레인이 발생되고, 스트레인 광학효과에 의해서 굴절률이 증가되어 궁극적으로 광도파로가 형성되는 것이다. 이어서 광파와의 결합을 위해서 입사와 출력 단면을 연마하였다.<sup>[11]</sup>

두 번째 구조를 제작하기 위해서 X-cut LiNbO<sub>3</sub>에 e-beam 증착기를 이용하여 320°C 온도에서 ~4 μm 두께의 SiO<sub>2</sub>를 증착하였다. 이어서 10~20 μm 폭의 photo-resist 채널을 형성한 다음, NiCr 금속 박막을 증착한 후 lift-off 공정으로 SiO<sub>2</sub> 위에 NiCr 채널 패턴들을 형성하였다. RIE(reactive ion etcher)

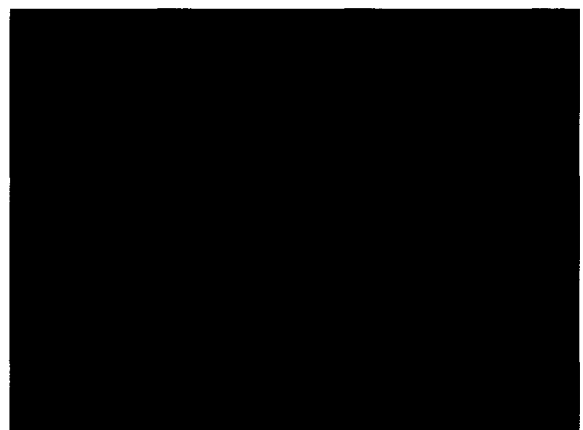


그림 4. 스트레인광학효과를 이용하여 제작된 채널형 광도파로의 near-field 모드 패턴.

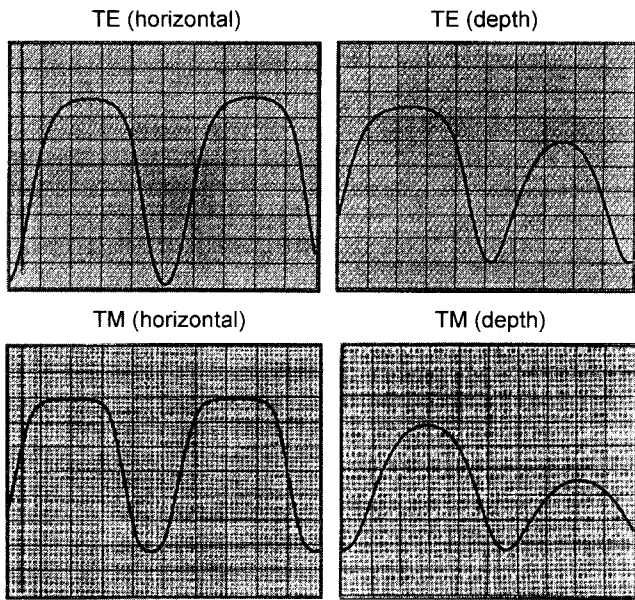


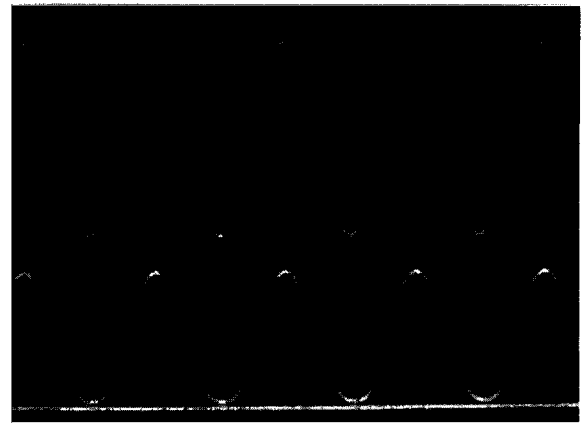
그림 5. 진동 거울을 이용하여 측정된 광도파로의 TE, TM 모드의 세기 분포.

를 이용하여 SiO<sub>2</sub>를 식각하여 그림 1(b)와 같은 구조를 얻었으며, 이 과정에서 NiCr은 SiO<sub>2</sub>가 식각되지 않도록 보호하는 mask 역할을 수행하였으며, 한편 NiCr은 광 변조기의 전극으로도 활용된다.

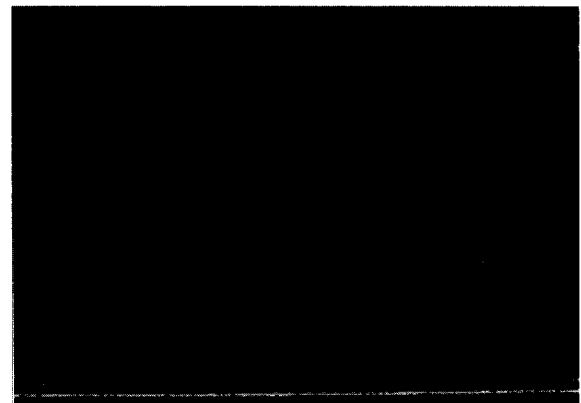
제작된 소자들은 1.55 μm DFB-LD와 더불어 butt 결합시스템을 이용하여 광도파로 특성과 광 변조기 성능을 검증하였다. Mo/Pt 박막으로 스트레인을 발생시킨 그림 1(a)의 소자는 TE, TM 입사 편광모드에 대해서 단일모드 특성을 나타내었으며, 6.2, 7.7 dB/cm의 삽입 손실이 각각 측정되었다. 그림 4는 CCD 카메라를 이용하여 측정된 near-field 모드 패턴이며, 그림 5는 진동(vibrating) 거울을 이용하여 광도파로의 TE, TM 모드의 세기 분포를 수평, 수직 방향으로 측정한 것이다. 광도파로의 폭, 깊이에 따라 측정된 각각의 세기 분포에서 아래 방향으로 한 개의 peak 만 측정되었기 때문에 TE, TM 각각에 대해서 단일 모드임을 알 수 있다.

#### IV. 세기 광변조기

그림 1(a) 구조와 같이 Mo/Pt 박막으로 제작된 스트레인광학형 광도파로는 세기 광변조기로 활용할 수 있었다. 입사 광파를 z 결정 축에 대해서 45° 회전시키고, 입사 광파에 대해서 90° 회전시킨 편광기(polarizer)를 출력 단에 배열시킬 경우 세기 광 변조 특성을 얻을 수 있었다. 전극 길이와 간격이 11 mm, 21 μm인 소자에 대해서 그림 6(a) 같이 V<sub>π</sub>=16.1V와 100% 변조 깊이(modulation depth)가 측정되었다. 한편 그림 1(b)와 같이 전극 길이와 간격이 10 mm, 19 μm이며, 유전체 박막을 이용한 소자는 그림 6(b)와 같이 77V의 V<sub>π</sub> 전압과 94%의 변조 깊이가 측정되었다. SiO<sub>2</sub> 유전체 박막을 이용한 소자의 경우 전극에 인가된 전압 대부분이 SiO<sub>2</sub> 박막에 나타나고 일부분만이 전극에 인가되기 때문에 Mo/Pt 박막을 사용



(a)



(b)

그림 6. (a) 금속박막과 (b) SiO<sub>2</sub>를 이용하여 제작된 광 변조기의 변조 특성. 각 그림의 위 파형은 인가된 전기신호. (a) 5V/div, (b) 20V/div. 아래 파형은 광 신호.

표 1. 금속박막과 SiO<sub>2</sub>로 제작된 스트레인광학 광 변조기의 성능 비교

Strain inducing film material	Metal film	SiO <sub>2</sub> film
V <sub>π</sub> [V]	16.1	77
Modulation depth [%]	100	94
Channel width [μm]	21	19
Interaction length [mm]	11	10

한 소자와 비교해서 매우 큰 V<sub>π</sub> 전압이 필요하다. 제작 공정 측면에서도 금속 박막을 이용하는 경우가 훨씬 단순하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 제작비용도 대폭 줄일 수 있으리라 기대된다. 제작된 두 소자의 측정 결과를 표 1에 요약하였다.

#### V. 1×2 가변형 광 파워 분배기

광 전송시스템이 가입자망 또는 대내 망까지 파급됨에 따라 광 파워의 출력을 가변적으로 조절할 수 있는 광 파워 분배기의 필요성이 나날이 높아지고 있다. 지금까지 이와 같은 기능을 갖는 소자는 주로 광섬유, 실리카, 폴리머, Ti:LiNbO<sub>3</sub> 등을 이용하여 구현되어 왔으며, 특히 융착(fusion) 기술을 이용

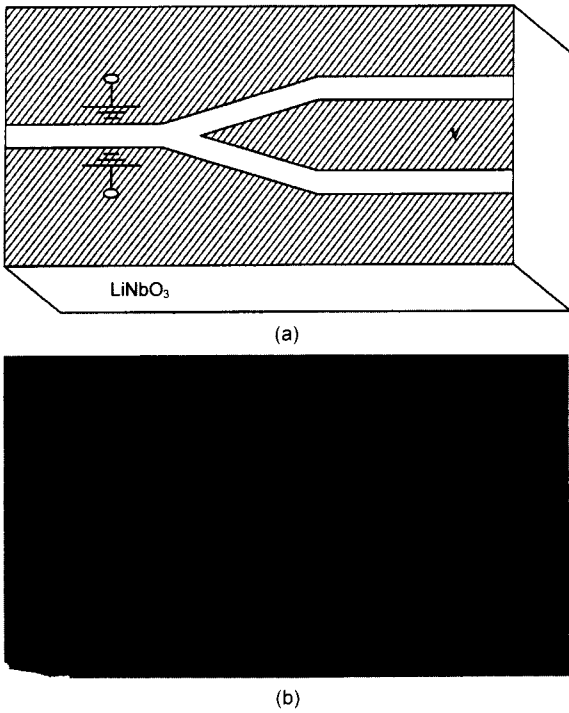


그림 7. (a) 1×2 on/off 광 파워 분배기의 구조 및 인가 전압, (b) 제작된 광 분배기의 표면 확대 사진.

한 광섬유 소자들을 많이 사용하여 왔다. 본 연구에서는 앞서 논의되었던 LiNbO<sub>3</sub> 스트레인광학효과를 이용하여 1×2 광 파워 분배기를 구현하였으며, 또한 LiNbO<sub>3</sub>의 전기광학효과를 이용할 경우, 전계(즉 전압)에 의해서 출력되는 광 파워의 세기를 조절할 수 있는 기능을 얻을 수 있었다.

그림 7은 1×2 광 파워 분배기의 photo-mask 레이아웃을 나타낸 것이다. 0.55°, 0.58° 두 분기 각도 각각에 대해서, 8 μm~22 μm 채널 폭을 패턴들을 연속적으로 배열시킨 형태로 마스크를 설계하였다. 광 파워 분배기는 III절에서 논의되었던 금속박막 스트레인광학형 광도파로 공정으로 제작하였다. 금속박막과 기판 사이에 형성되는 압축 스트레인과 LiNbO<sub>3</sub>의 스트레인광학효과에 의해서 식각된 금속박막 밑 기판 부분의 굴절률이 증가되어 광도파로가 형성되는 것이다. 따라서 전압이 인가되지 않을 경우, 입사 광 파워가 똑같이 분배되어 출력된다. 그림 7(b)는 제작된 소자의 현미경 표면 확대 사진이며, 가운데 췌기 모양이 광도파로가 분기되는 부분을 나타내고 있다.

Butt 결합시스템을 이용하여 동작 특성을 측정하였으며, 그림 8(a)는 두 출력 단으로 나오는 near-field 모드 패턴을 나타낸 것이다. 그림 7과 같이 이러한 두 분기 광도파로의 좌·우측 금속 박막을 접지(ground)한 조건에서 가운데 박막에 적절한 양(+) 전압을 인가하면, 서로 반대 방향의 전계(electric field)가 두 광도파로에 형성된다. 분기된 두 광도파로 중 한쪽은 전기광학효과에 의해서 굴절률 증가량이 “+Δn<sub>e</sub>”로 나타나 광도파로를 계속 유지시키면서 광파를 출력시키지만, 반대쪽 분기 광도파로의 굴절률 증가량은 전자와 반대되는 전계 방향 때문에 “-Δn<sub>e</sub>”로 나타나 궁극적으로 스트레인광학 효과에 의한 증가량(+Δn<sub>e</sub>)과 상쇄되어 광도파로가 소멸되며, 따라서 광

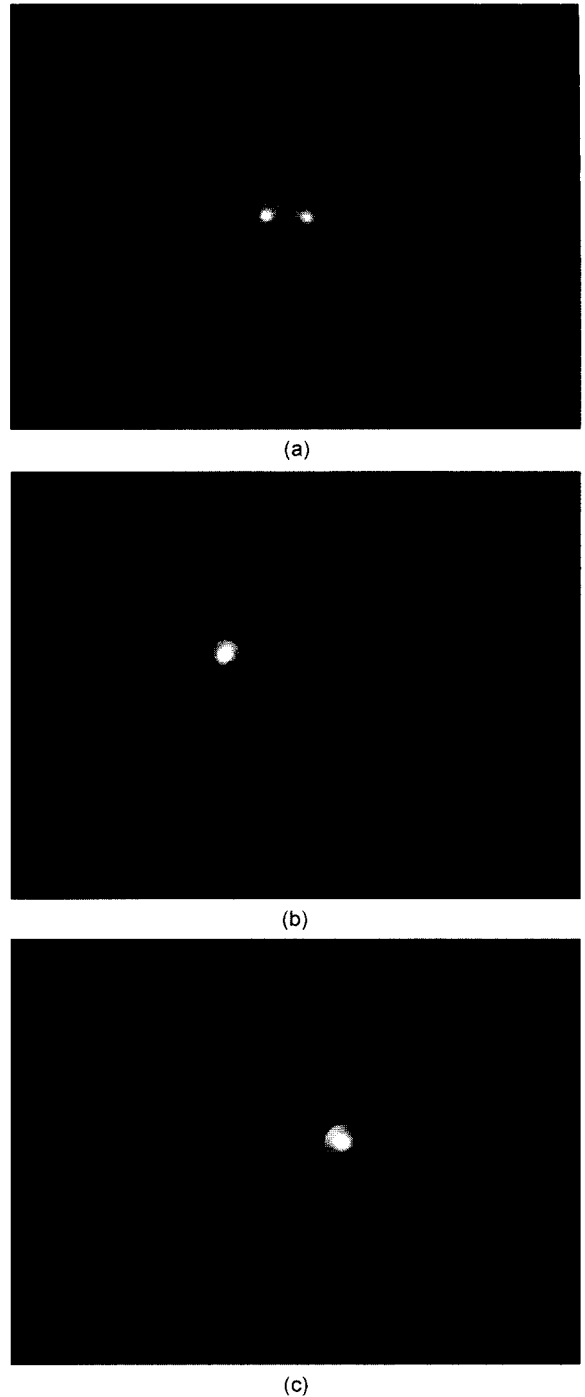


그림 8. 인가 전압에 따른 출력 광의 near-field 모드 패턴 (a) 0 V, (b) +25 V (c) -25 V.

파가 진행하지 못하게 된다. 한편 부(-) 전압을 인가시키면 광파가 출력되는 광도파로가 바뀌게 된다. 그림 8은 ±25 V 전압을 인가시킨 상태에서 출력 모드의 near-field 패턴을 나타낸 것이다. 0 V를 인가한 상태에서는 그림 8(a)와 같이 거의 똑같은 파워의 두 모드가 예상한대로 출력되었으며, +25 V 또는 -25 V를 인가한 경우에는 한쪽에서만 출력됨을 그림 8(b), (c)에서와 같이 관찰되었다.

VI. 결 론

LiNbO<sub>3</sub>의 스트레인광학효과와 ~1.4 μm Mo/Pt 금속 박막으로부터 생성되는 압축스트레인을 이용하여 채널 광도파로 제작 공정을 국내에서는 처음으로 개발하였으며, 스트레인광학형 채널 광도파로를 세기 광변조기와 광 파워 분리기 구현에 응용하였다. 채널형 광도파로의 경우 TE, TM 입사 편광모드에 대해서 6.2, 7.7 dB/cm의 삽입 손실이 각각 측정되었으며, 단일 모드 특성이 관찰되었다. 전극 길이와 간격을 11 mm, 21 μm로 설계하여 제작된 세기 광 변조기 경우, 1.55 μm 파장 영역에서 V<sub>π</sub>=16.1V와 100% 변조 깊이가 측정되었다. 또한 스트레인광학형 광도파로를 이용하여 광 파워 분리를 설계, 제작하였으며, 0.63 μm 파장 영역에서 ±25 V에서 on/off 특성이 관찰되었다. 이 특성을 활용할 경우 두 출력으로 분기되는 광 파워의 양을 조절할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 우수신기술사업(2000년 3차) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] M. Fukuma, J. Noda, and H. Iwasaki, "Optical properties in titanium-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguide," *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 7, pp. 3693-3698, Jul. 1978.  
 [2] H. S. Jung, O. Eknoyan, and H. F. Taylor, "Enhancement of refractive index in Ti:LiTaO<sub>3</sub> optical waveguide by Zn vapor diffusion," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-7, no. 2, pp.

390-392, Feb. 1989.  
 [3] Manhar L. Shah, "Optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub> by ion exchange technique," *Applied Physics Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 652-653, June 1975.  
 [4] O. Eknoyan, H. F. Taylor, Z. Tang, V. P. Swenson, and J. M. Marx, "Strain induced optical waveguides in lithium niobate, lithium tantalate, and barium titanate," *Appl. Phys. Lett.* vol. 60, no. 4, pp. 407-409, 1992.  
 [5] J. M. Marx, O. Eknoyan, H. F. Taylor, and R. R. Neurogaonkar, "GHz-bandwidth optical intensity modulation in self-poled waveguides in strontium barium niobate (SBN)," *IEEE Photonics Technol. Lett.* vol. 8, no. 8, 1024-1025, 1996.  
 [6] M. A. Fardad, "SBN photonic devices," *Proc. SPIE 3728*, pp. 238-244, 1998.  
 [7] J. M. Marx, O. Eknoyan, H. F. Taylor, and Z. Tang, "Electro-optic modulation and self-poling in strain-induced waveguides in barium strontium niobate," *Appl. Phys. Lett.* vol. 67, no. 10, pp. 1381-1383, 1995.  
 [8] J. M. Marx, Z. Tang, O. Eknoyan, H. F. Taylor, and R. R. Neurogaonkar, "Low-loss straininduced optical waveguide in strontium barium niobate (Sr<sub>0.6</sub>Ba<sub>0.4</sub>Nb<sub>2</sub>) at 1.3 μm wavelength," *Appl. Phys. Lett.* 66, pp. 274-276, 1995.  
 [9] O. Kwon, O. Eknoyan, H. F. Taylor, and R. R. Neurogaonkar, "Low-voltage electro-optic modulator in SBN:60," *Electron. Lett.* vol. 35, no. 3, pp. 219-210, 1999.  
 [10] P. A. Kirkby and P. R. Selway, "Photoelastic waveguides and their effect on strip geometry GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As lasers," *J. Appl. Phys.* vol. 50, no. 7, pp. 4567-4579, July 1979.  
 [11] H. S. Jung, O. Eknoyan, and H. F. Taylor, "Electro-optic intensity modulators at λ = 1.55 μm utilizing strain-optic effects in LiNbO<sub>3</sub>," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 1499-1501, Aug. 2001.

Optical power splitters and optical intensity modulators utilizing strain-optic waveguides of LiNbO<sub>3</sub>

Hong-Sik Jung<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

(Received September 9, 2002, Revised manuscript December 3, 2002)

Fabrication process of strain-induced channel waveguides in LiNbO<sub>3</sub> was developed using strain-optic effect and compressional strain due to ~1.4 μm surface Mo/Pt metal film. Characterization of the channel waveguides revealed a single transverse and depth mode in both TE and TM polarizations. Measurements showed total insertion loss of 6.2 and 7.7 dB/cm for TM and TE polarizations, respectively. Electro-optic intensity modulators with 11 mm long electrode length and 21 μm electrode gap at λ = 1.55 μm have been produced in LiNbO<sub>3</sub> substrates using strain-induced channel waveguides. Modulation depth of 100% at π-radian voltage of 16.1V has been demonstrated. Also, 1×2 on/off power splitters at λ = 0.63 μm have been produced using strain-induced channel waveguides. On/off voltage of ±25V has been demonstrated.

Classification code : OE010.