

확산방식에 의한 Ti : LiNbO₃ 광도파로의 제작 및 특성측정

(Fabrication and Characterization of Ti : LiNbO₃ Optical Waveguides)

孫 英 成*, 姜 元 求*, 申 相 永*, 權 寧 世*

(Yung Sung Son, Won Gu Kang, Sang Yung Shin and Young Se Kwon)

要 約

평면 광도파로를 Ti 내부확산방식으로 Y-cut LiNbO₃ 단결정 기판위에 제작하고, 유효굴절율을 밝은 모드선 검사법으로 측정하였다. 이 결과로부터 광도파로의 굴절율분포를 WKB 근사방식을 이용하여 추출하였다. 또한, 레이저 직접기록방식을 사용하여 도파로 패턴을 제작한 후 -자형, X자 교차형 및 Y자형 스트립 광도파로를 X-cut LiNbO₃ 단결정 기판위에 제작하였다. 그리고 제작한 스트립 광도파로의 한 쪽 단면에 빛을 결합시켜 다른 쪽 단면에서의 near-field intensity profile 을 관찰하였다.

Abstract

Planar optical waveguides are fabricated on a Y-cut LiNbO₃ single crystal substrate by Ti indiffusion method. From data measured by the bright M-line spectroscopy, refractive index profiles are reconstructed by WKB approximation method. Then, single strip, X-crossing strip, and Y-branch strip optical waveguides are fabricated on X-cut LiNbO₃ single crystal substrate, with waveguide patterns made by the laser beam direct writing method. And their near-field intensity profiles are observed after coupling the light to the waveguide edges.

I. 서 론

1960년대에 레이저가 개발된 이래 신호의 전송 및 처리에 전기신호대신 광신호의 이용 가능성이 열리게 되었으며, 그동안 이 분야의 활발한 연구는 1970년대 후반에 광통신 시스템의 실용화를 가능하게 하였다. 이에 따라 앞으로 광을 이용하는 신호처리 영역은 점점 넓어질 전망이다. 레이저광을 이용하면 신호를 고속으로 처리할 수 있으나, 레이저광을 신호

처리에 이용하기 위해서는 프리즘, 렌즈, 거울, 전기광학변조기와 광검출기 등 여러가지 광학소자를 이용하여 까다로운 정렬을 해야하는 불편한 점이 있다. 이러한 어려움을 극복하고자 하는 노력으로 집적광학이라는 개념이 대두되어 박막도파로 기술을 기초로 소형화된 광집적회로의 연구가 진행되고 있다. 박막도파로에 사용되는 재료는 유리, 반도체, 강유전체(ferroelectric material)로 나눌 수 있다.¹⁾ 유리를 이용한 도파로는 손실이 가장 적고 제작이 간단한 장점을 지니고 있으나 주로 수동소자의 제작만이 가능하므로 그 응용이 제한된다. 이에 반해 반도체와 강유전체는 전기광학효과(electrooptic effect)를 가지고 있어서 집적광학 소자로의 응용이 가능하다. GaAs나 InP 등의 반도체를 이용한 광도파로는 전기광

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1987年 8月 20日

(※본 연구의 일부는 한국전자통신연구소의 지원으로 수행된 것임.)

학효과가 강유전체에 비해 작으나 하나의 기관위에 레이저다이오드나 광검출기를 함께 제작할 수 있는 장점때문에 많은 관심이 기울어지고 있다. 강유전체에 금속을 화산시켜 만드는 광도파로는 작은 손실과 우수한 전기광학 효과를 지니고 있어서 박막도파로를 모체로 하는 빛을 제어하는 목적의 집적광학 소자에 적합하다. 특히 전기광학효과, 음향광학효과(acoustooptic effect)가 큰 리튬나오베이트(LiNbO₃) 단결정에 티타늄(Titanium)을 내부화산시켜 제작한 광도파로는 도파손실(propagation loss)이 작아서 과거 10여년 동안 활발히 인구가 진행되어 광도파로를 이용한 스위치, 변조기 등이 상용화되고 있다.¹⁾

본 논문에서는 Y-cut LiNbO₃ 단결정 기관위에 Ti를 내부화산시켜 광도파로를 제작하고 밝은 모드선 측정방법(bright M-line spectroscopy)으로 He-Ne 레이저 파장(633 nm)에서 TE모드에 대한 유효굴절율을 측정하고, 이 결과로부터 기관 내부의 굴절율 분포를 WKB(wentzel kramers brillouin) 근사방식을 이용하여 산정하였다. 굴절율분포를 Gaussian분포로 가정하여 Ti 링을 두께와 굴절율분포의 관계를 고찰하였다. 또, 레이저 직접기록방식(laser beam direct writing method)²⁾을 사용하여 집적광학소자에 응용하기 위한 -자형, X자 교차형 및 Y자형 스트립 광도파로를 X-cut LiNbO₃ 기관위에 제작하고, 도파되는 빛의 near-field intensity profile을 관찰하였다.

II. LiNbO₃ 광도파로

1. LiNbO₃ 결정의 특성

LiNbO₃ 결정은 1200°C 이상의 높은 Curie 온도를 갖는 강유전체로 커다란 비선형광학계수, 큰 복굴절(birefringence), 강한 압전(piezoelectric) 효과, 우수한 음향광학특성과 큰 전기광학효과를 가지고 있다. 본 실험에는 미국의 Crystal Technology사로부터 구입한 acoustic grade Y-cut LiNbO₃ 단결정을 사용하였다. Crystal Technology사 자료에 따르면 상온인 20°C에서 파장이 633nm일 때 정상굴절율(ordinary index) No = 2.287 ± 0.001이고, 이상굴절율(extraordinary index) Ne = 2.202 ± 0.001이다. 따라서 이 때 굴절율 차(Ne-No)은 -0.085이다.

2. LiNbO₃ 광도파로 제작 방법

LiNbO₃ 단결정 기관으로 광도파로를 제작하는 지금까지 알려진 방법으로는 외부화산, Ti 내부화산, 이온교환, 양자교환 방법등이 있다. 이들 방법 중 현재 광범위하게 사용되는 방법은 Ti 내부화산 방법과 양자교환 방법이다.

먼저 외부화산 방법은 다음과 같다. LiNbO₃는 (Li₂O)_ν(Nb₂O₅)_{1-ν}로 표현되는 약간의 nonstoichiometric form으로 결정되며 ν는 0.48에서 0.50사이의 값을 갖는다. 정상굴절율 No는 ν에 무관하지만 이상굴절율 Ne는 dNe/dν = -1.63의 관계를 갖고 변화한다. 따라서 Ne를 크게 하려면 Nb₂O₅를 표면에 내부화산시키거나 Li₂O를 기관표면으로부터 외부화산시키는 방법을 생각할 수 있다. 크기가 작은 Li이 Nb보다 화산이 더 잘 될 것이므로 진공속에서 높은 온도로 가열하여 Li이 외부화산되도록 하므로써 광도파로를 제작하는 것이 외부화산 방법이다.⁴⁾ 이렇게 제작된 광도파로는 매우 적은 (< 1 dB/cm)도파손실을 갖지만 굴절율 변화가 Ne에서만 발생하므로 소자 응용에 제약을 받고 3 차원 광도파로를 제작하기 위해서는 도파로 패턴이 필요하므로 선택적인 외부화산이 어려운 단점이 있다.⁵⁾

이온 교환 방법은 AgNO₃ granule 과 연마(polishing)된 X-cut LiNbO₃를 비이커에 담아 약 360°C로 가열하여 광도파로를 제작하는 기법으로 1975년 Shah는 ΔNe = 0.12인 광도파로를 제작하였는데 도파손실이 6dB/cm로 큰 편이다.⁶⁾ Ag 이온과 Li 이온, 또는 Ag 이온과 Li 이온 자리 사이에 이온교환이 일어나 광도파로가 형성되는 것으로 알려져 있다.

Ti 내부화산 방법은 J. M. Hammer 와 W. Phillips 가 처음으로 LiTaO₃를 이용하여 실험하였으며,⁷⁾ LiNbO₃를 이용한 것은 R. V. Schmidt 와 I. P. Kaminow에 의해서 1974년에 시작되었다.⁸⁾ 원리는 수백 Å의 얇은 Ti 필름을 결정위에 증착시킨 후 높은 온도(약 1000°C)에서 가열하므로써 Ti를 결정내로 화산시키는 것이다. 이 방법은 정상굴절율과 이상굴절율을 모두 증가시키며 매우 작은 도파손실(< 1 dB/cm)을 갖고 결정체에서와 같은 정도로 좋은 전기광학 특성을 나타낸다. 또한 3 차원 구조를 만들기 위해서는 일반적인 포토리토그래피(photolithography)를 써서 금속패턴만 적절히 형성시키면 된다.

양자 교환 방법은 LiNbO₃ 단결정의 Li 이온을 양자(proton) 교환시키는 방법으로 1981년도에 미국의 Bell 연구소에서 처음으로 사용하였다.⁹⁾ 제작 방법은 약 200°C 정도로 가열된 안식향산(benzoic acid) 용액속에 LiNbO₃ 기관을 넣어 기관 내부의 Li 이온과 안식향산 용액속의 양자를 치환시킨다. 양자교환된 부분은 ΔNe = 0.12, ΔNo = -0.04 정도 변화된다. 따라서 이 방법으로 제작한 광도파로는 이상파(extraordinary wave)만을 도파시키는 특성을 지닌다. 초창기에는 도파손실이 크고 전기광학 효과를 감소시키는 등의 단점을 가지고 있었으나 최근에는 제작방법

이 크게 개선되어 관심을 모으고 있다.

3. Ti : LiNbO₃ 광도파로

1974년에 미국 Bell Lab. 의 R. V. Schmidt와 I. P. Kaminow는 여러가지 금속(Ti, V, Ni, Nb, Au, Fe, Co, Ge 등) 박막을 LiNbO₃와 LiTaO₃ 결정위에 증착하고 확산시켜 그 특성을 조사하였다.¹⁰⁾ 그 결과 Ti에 의한 굴절을 변화가 가장 크고 확산깊이가 작아서 1 μ m 정도의 깊이에서 도파되는 단일모드 광도파로의 제작이 가능하다고 발표하였다. LiTaO₃ 광도파로는 LiTaO₃의 Curie 온도가 600 $^{\circ}$ C로 확산온도보다 낮기 때문에 확산시킨 후 다시 poling을 시켜주어야 한다. 그런데 도파로 표면에 손상을 주지않고 poling시키는 것은 어렵고 번거로운 작업이다. 따라서 LiNbO₃가 LiTaO₃보다 광손상(optical damage)이 크지만 Curie 온도가 1200 $^{\circ}$ C 이상인 LiNbO₃가 1000 $^{\circ}$ C 정도에서 이루어지는 확산방식에 의한 광도파로 제작에 적합하다. 1970년대 중반 이후부터 Ti : LiNbO₃ 광도파로 제작연구는 활발히 이루어져 왔으며 현재는 이 방법에 입각하여 제작된 집적광학소자가 상용화되고 있다.

Ti : LiNbO₃ 광도파로 제작에는 Li₂O 외부확산(out-diffusion)에 의한 문제점이 있다. Ti을 LiNbO₃ 기판 내부로 확산시키는 동안 Li 이온의 외부확산이 동시에 일어나 LiNbO₃ 기판표면 부근에서 산소와 결합하여 Li₂O를 생성시킨다. 생성된 Li₂O는 기판표면 부근의 이상굴절율을 증가시켜 도파모드를 형성한다. 외부확산에 의한 도파모드는 단일모드 광도파로의 제작을 어렵게 하고 방향성 결합기를 비롯한 소자의 누화(crosstalk)를 증가시킨다. 따라서 이러한 외부확산은 제거되어야 하며 여러가지 해결방안이 다음과 같이 제안되었다. Li₂O가 풍부한 분위기에서 확산시키는 방법은 Li₂O조각을 Ti : LiNbO₃ 광도파로 기판과 함께 도가니 안에 넣고 아르곤 기체 분위기속에서 확산시키고 산소 기체 분위기에서 냉각시키는 방법이다. 이것은 LiNbO₃ 기판 주위의 Li₂O 증기압을 기판 내부에서 생성되는 Li₂O 증기압보다 크게하여 Li₂O의 외부확산을 억제하는 효과가 있다.¹¹⁾ Ti 확산 전이나 확산 과정 중에 LiNbO₃ 분말을 넣은 분위기에서 LiNbO₃ 기판을 annealing 하는 방법도 Li₂O 외부확산을 제거하는 원리는 Li₂O가 풍부한 분위기에서 확산시키는 방법과 마찬가지로이다. 여기에서는 LiNbO₃ 분말이 LiNbO₃ 기판보다 분위기 기체와의 접촉면적이 넓으므로 Li₂O의 외부확산이 기판에서 보다 쉽게 이루어져서 기판 주위의 Li₂O 증기압을 기판 내부로부터의 증기압보다 크게 하는 작용을 한다.¹²⁾ 수증기를 함유한 기체 분위기에서 Ti을 확산시키는 방법은 별

도의 첨가물 없이 도가니 안으로 들어가는 분위기 기체(Ar, O₂)를 bubbler를 통과시켜 수증기를 함유하게 하는 방법이다. 이 방법의 장점은 무엇보다 방법이 간단하고 확산시킨 후 LiNbO₃ 표면의 상태가 나빠지는 것을 방지하는 효과도 함께 얻는 점이다. 이 방법의 원리는 정확히 밝혀지지 않았으나 수증기에서 생성된 수소가 LiNbO₃ 결정 내부에 있는 Li 이온의 이동도(mobility)에 영향을 주어 외부확산을 억제하는 것으로 알려져 있다.¹²⁾

4. Ti : LiNbO₃ 광도파로 제작과정

실험에 사용한 광도파로 기판 재료는 미국의 Crystal Technology사에서 구입한 Y-cut LiNbO₃ 단결정을 사용하였으며, 광도파로의 제작과정은 다음과 같다.^{13,14)} 준비된 LiNbO₃ 기판위에 Ti 필름을 sputtering 방식으로 증착시킨다. 7mtorr의 아르곤 기체 분위기, RF power 300W의 조건에서 증착시간으로 Ti 필름의 두께를 조절한다. Ti 필름이 증착된 기판을 고온도가니에 넣어 1000 $^{\circ}$ C에서 내부확산시킨다. LiNbO₃ 단결정은 열적 충격에 무척 약하므로 상온에서 넣고 서서히 온도를 올려준다. 분위기 기체는 Li 이온의 외부확산과 광 손상을 줄이기 위해 증류수가 담긴 bubbler를 통과하여 수증기를 함유하도록 한다.¹²⁾ 먼저 아르곤 기체 분위기(0.21/min)에서 Ti 필름의 두께에 따라 1.5-10시간 동안 확산을 계속한다. 그리고 나서 아르곤을 산소로 바꾸고 0.5-5시간 동안 계속 확산시킨 후 도가니를 끄고 서서히 냉각시킨다. Li₂O와 TiO₂가 기판표면에 형성되는 것을 방지하기 위해 산소 기체 분위기를 형성시켜준다.¹⁴⁾

III. Ti : LiNbO₃ 광도파로의 특성 측정

1. 도파특성 실험 및 밝은 모드선 관측

내부확산을 시켜서 제작한 Ti : LiNbO₃ 광도파로를 rutile(TiO₂) 프리즘 결합기를 이용하여 광도파현상을 관찰하였다. 광원은 파장이 633nm이고 출력이 5mW 정도인 He-Ne레이저를 사용하였다. Ti : LiNbO₃ 광도파로는 이상굴절율의 변화가 Ti 필름 두께에 비례하여 증가하므로 이상굴절율의 변화에 의한 도파모드를 측정하기 위해 Y-cut Ti : LiNbO₃ 광도파로의 X축을 따라 전파하는 TE모드를 여기서시켰다. 도파되는 모습은 그림 1에 나타내었다. 빛을 입력 프리즘으로 광도파로에 결합시키면 광도파로의 도파모드로 전파되는 성분들이 출력프리즘으로 결합되어 스크린 위에 밝은 모드선을 나타낸다. 스크린에 나타난 밝은 모드선 수는 도파모드의 수를 나타낸다. 그림 2

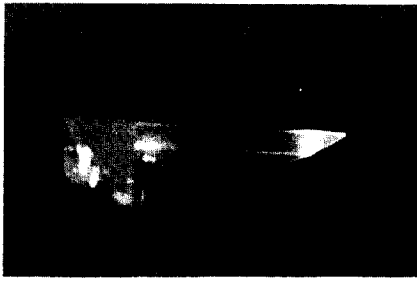
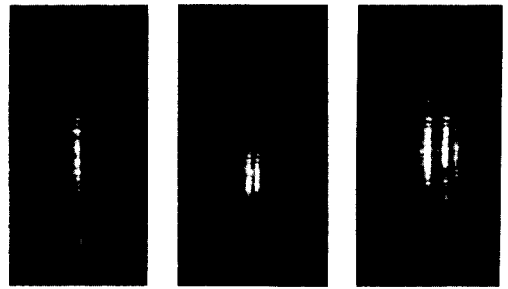
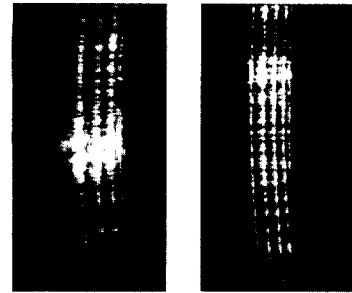


그림 1. 프리즘 결합으로 도파되는 모습
Fig. 1. Waveguiding picture by prism coupling.



(a) (b) (c)



(d) (e)

그림 3. Ti 두께에 따른 밝은 모드선 수
(a) 140 Å, (b) 280 Å, (c) 350 Å,
(d) 630 Å, (e) 840 Å

Fig. 3. Number of bright M-lines for Ti film thickness.

(a) 140 Å, (b) 280 Å, (c) 350 Å,
(d) 630 Å, (e) 840 Å.

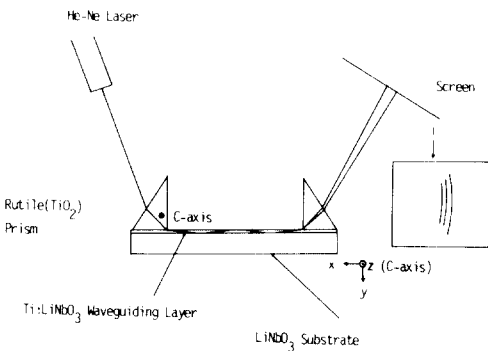


그림 2. 측정장치
Fig. 2. Measurement set-up.

에 사용한 실험장치를 나타내었다. 밝은 모드선은 Ti 필름 두께에 따라 광도파로의 굴절율변화가 증가하여 도파모드 수가 증가하는 것을 그림 3에 나타내었다.^[14] 도파모드 수는 확산시간에도 의존하지만 실험에서는 Ti 이 충분히 확산될 수 있도록 하여 이의 영향은 고려하지 않았다. Ti의 확산 여부는 확산 후 도파로의 표면상태를 현미경으로 관찰하여 판단하였다. 실제로 확산이 제대로 이루어지지 않았을 경우에는 표면의 상태가 고르지 않고 불투명하므로 구별이 가능하다. Ti 필름 두께가 140 Å이고 확산시간이 2시간일 때 단일모드 광도파로를 얻었으며, 다중모드 Ti : LiNbO₃ 광도파로의 제작조건은 표 1에 나타내었다. Ti 필름의 두께가 충분히 두꺼운 경우에는 도파모드 수가 확산깊이와 관계를 가지지만 도파모드 수가 적은 경우, 즉 Ti 필름의 두께가 상대적으로 얇은 경우에는 확산깊이에 의한 변화를 기대하기 어렵다. 따라서 몇 개의 도파모드 및 단일모드 도파로를 얻기 위해서 Ti 필름의 두께를 변수로 사용하고 나머지 조건들을 이에 따라 적절히 맞추는 방법으로 관계를 찾았다.

표 1. 도파로의 제작조건
Table 1. Fabrication condition of the waveguides.

광도파로	Ti 필름 두께 (Å)	확산시간(h)		
		Ar	O ₂	합 계
S1	140	1.5	0.5	2.0
S2	280	3.0	2.0	5.0
S3	350	6.0	3.0	9.0
S4	630	7.5	3.0	10.5
S5	840	10.0	5.0	15.0

확산온도 : 1000°C

분위기기체 (0.2 l/min; wet) : Ar, O₂

2. 유효굴절율(effective index)의 측정
광도파로의 특성을 측정하는 방법으로는 직접 확산된 광도파로 구성 성분의 양을 측정하는 직접적인

측정방법과 프리즘결합기를 이용한 간접적인 측정방법으로 나눌 수 있다.^{16,17)} 프리즘결합기를 이용한 측정방법은 도파모드의 입사각만을 측정하므로 간편하고 높은 정확도를 가진다. 또, 2개 이상의 도파모드를 가질 경우 도파로 내부의 굴절률분포를 산출할 수 있다. 그러나 측정을 위해서는 도파로와 프리즘에 기계적인 충격이 가해지므로 주의를 요한다. 도파모드의 유효굴절률 N_m 은 도파모드의 전파정수(propagation constant) β_m 을 자유공간에서의 파수(wavenumber) k_0 로 규격화한 양 즉 $N_m = \beta_m/k_0$ 이다. 프리즘결합기를 이용하여 프리즘에 입사하는 각 θ_m 에 따른 도파모드의 유효굴절률 N_m 은 다음 식으로 구할 수 있다.¹⁷⁾

$$N_m = \sin \theta_m \cdot \cos \alpha + (N_p^2 - \sin^2 \theta_m)^{1/2} \sin \alpha \quad (1)$$

단 α 는 그림 2에서 보면 프리즘의 각이며, N_p 는 프리즘의 이상굴절률이다. rutile의 굴절률은 파장이 633nm일 때 정상굴절률(ordinary index) $N_o = 2.584$ 이고, 이상굴절률(extraordinary index) $N_e = 2.872$ 이다. 그림 2에서 보면 입력빔의 전계방향과 프리즘의 광축이 평행하므로 본 실험에서는 이상굴절률이 사용되었다. 프리즘결합기로 도파모드를 여기시킬 때 도파모드의 입사각을 측정하여 식 (1)로부터 각 모드에 대한 유효굴절률을 구하였다. Ti 필름 두께에 따른 유효굴절률을 그림 4에 나타내었다. 동일한 Ti 필름 두께에 대한 실험결과가 아니므로 확산깊이에 대한 관계는 고려하지 않았다.

3. 굴절률분포(refractive index profile)의 산출
일반적으로 Ti : LiNbO₃ 광도파로의 이상굴절률 분포는 다음 식으로 나타낸다.¹⁸⁾

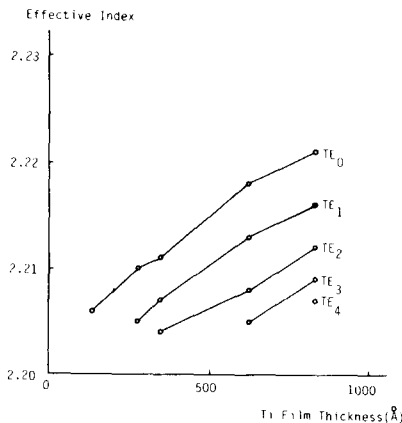


그림 4. 측정된 유효굴절률
Fig. 4. Measured effective index.

$$N(y) = N_b + \Delta N_e \cdot f(y/D) \quad (2)$$

여기서 N_b 는 LiNbO₃ 기판의 이상굴절률, ΔN_e 는 Ti : LiNbO₃ 광도파로 표면에서의 이상굴절률 변화이며, D 는 확산깊이(도파로의 두께)이다. 함수 $f(y/D)$ 는 확산에 의해 생긴 굴절률변화를 나타내며 y 값에 따라 1에서 0사이의 값을 갖는다. 확산시간이 짧으면 Ti이온 농도의 분포는 complementary error function인 $\text{erfc}(y/D)$ 형태를 갖고, 충분히 길면 Gaussian 분포인 $\exp(-y^2/D^2)$ 형태를 갖는 것으로 알려져 있다. 실제로 $f(y/D)$ 를 Gaussian 분포로 가정하는 것이 측정결과와 잘 일치된다고 여러 논문에서 발표되었다.^{18,19)} 따라서 본 논문에서는 $f(y/D)$ 를 Gaussian 분포로 가정하여 도파로의 이상굴절률 분포를 다음 식으로 나타내었다.

$$N(y) = N_b + (N_s - N_b) \cdot \exp(-y^2/D^2) \quad (3)$$

단 y 는 도파로 표면으로부터의 깊이이며, N_s 는 도파로 표면의 이상굴절률이다.

Ti이온에 의한 Ti : LiNbO₃ 광도파로 내부의 굴절률변화를 WKB 근사방법을 이용하여 구하였다. 각 도파모드에 대해 측정된 유효굴절률 값을 다음 식에 대입하였다.²⁰⁾

$$\int_0^{ym} [N(y)^2 - N_m^2]^{1/2} dy = (4m-1)/8 \quad (4)$$

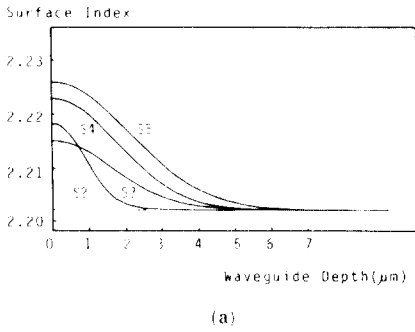
여기서 m 은 모드번호를 나타내는 자연수로 1부터 값을 갖는다. ym 은 $N(ym) = N_m$ 으로 얻어진다. TE₀, TE₁ 모드에 대해 산출한 유효굴절률 N_1, N_2 값으로부터 식 (4)를 만족하는 도파로 표면의 굴절률 N_s 와 확산깊이 D 를 최소자승오차(least square error) 방식으로 구하여 굴절률분포 $N(y)$ 를 구하였다. 굴절률의 허용오차는 10⁻⁴ 자리로 계산하였다. Ti 필름 두께를 다르게 하여 제작한 Ti : LiNbO₃ 광도파로에 대해 산출한 굴절률분포를 그림 5(a)에 나타내었다. 여기서 샘플번호는 도파로의 도파모드 수를 나타낸다.

4. 검토

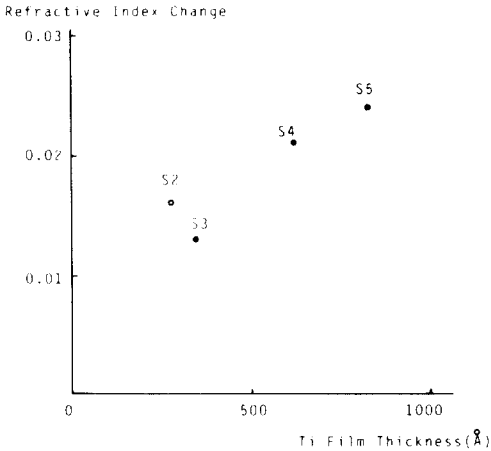
일반적으로 확산에 의한 Ti이온의 농도 $C(y, t)$ 는 Gaussian 분포 특성을 가지며 다음 식으로 나타낼 수 있다.²¹⁾

$$C(y, t) = 2nT/(\sqrt{\pi}D) \exp(-y^2/D^2) \quad (5)$$

단 n 은 Ti 필름의 원자밀도, t 는 확산시간이며, T 는 Ti 필름의 두께이다. 확산깊이 D 는 $D = \sqrt{4Dyt}$ 로 나타내어지며 Dy 는 확산계수이다. 산출한 확산깊이 D 로부터 확산계수 Dy 를 구하여 여러가지 매개변수와 함께 표 2에 나타내었다. 광도파로 표면에서의 Ti



(a)



(b)

그림 5. (a) 산출한 굴절율분포(TE 모드)
(b) Ti 필름 두께에 따른 굴절율변화

Fig. 5. (a) Evaluated refractive index profile (TE mode).
(b) Refractive index change for Ti film thickness.

이온 농도 $C(o, t)$ 는 $C(o, t) = 2nT / (\sqrt{\pi}D)$ 로 나타내어지며 식 (2)에서 굴절율변화 ΔNe 에 해당하는 양이 된다. 따라서 도파로 표면에서의 굴절율변화 ΔNe 는 도파로 표면에서의 Ti 이온 농도 $C(o, t)$ 에 비례한다. 즉 확산온도가 일정할 때 ΔNe 는 T/D 에 비례하게 되고 $D = \sqrt{4Dyt}$ 로부터 ΔNe 는 T/\sqrt{t} 에도 비례한다. 그러므로 ΔNe 를 T/\sqrt{t} 로 나눈 값 $\Delta Ne \sqrt{t}/T$ 는 상수가 되어야 한다.

ΔNe 와 T/\sqrt{t} , $\Delta Ne \sqrt{t}/T$ 값을 구하여 표 2에 나타내었고, 굴절율변화 ΔNe 를 그림 5(b)에 나타내었다. 표 2에서 보면 확산계수 Dy 가 S3, S4, S5의 경우는 거의 일치하지만 S2의 경우에는 1/2 정도로 큰 차이를 나타낸다. S2는 도파로 표면에서의 굴절율변화도 S3보다 큰 값을 나타내어 굴절율변화 ΔNe 값이 Ti 필름 두께 T에 비례하는 관계를 만족

표 2. 산출한 매개변수

Table 2. Evaluated parameters.

샘플	표면굴절율 N _s	굴절율변화 ΔNe	확산깊이 (μm)	확산계수 ($10^{10} cm^2/s$)	T/\sqrt{t} ($\text{\AA}/\sqrt{h}$)	$\Delta Ne \sqrt{t}/T$ $10^{-4} \sqrt{h}/\text{\AA}$
S2	2.218	0.016	1.3	2.2	125	1.28
S3	2.215	0.013	2.5	4.9	117	1.11
S4	2.223	0.021	2.7	4.8	194	1.08
S5	2.226	0.024	3.2	4.9	217	1.11

하지 않는다. 하지만 ΔNe 에 비례하는 T/\sqrt{t} 값을 보면 S2가 S3보다 큰 값을 가지므로 S2의 ΔNe 가 큰 것은 타당하다. 상수값을 가져야 하는 $\Delta Ne \sqrt{t}/T$ 값을 보면 S3, S4, S5의 경우는 거의 일치하고 S2의 경우에만 차이를 보인다. 확산계수와 함께 생각해 보면 확산시간이 충분하지 않을 때 굴절율분포를 Gaussian 분포로 가정하는 것이 적당하지 않음을 간접적으로 나타낸다.^[11] 따라서 S2는 확산시간이 충분하지 못하므로 다른 샘플과 다른 것으로 여겨진다.

IV. Ti:LiNbO₃ 스트립 광도파로

내부확산방식에 의한 Ti:LiNbO₃ 광도파로를 집적 광학 소자로 응용하기 위해서는 여러가지 미세패턴을 가진 3차원 광도파로를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 Ti:LiNbO₃ 스트립 광도파로를 제작하고 광도파로특성을 관측하였다. 제작방법은 근본적으로 Ti:LiNbO₃ 광도파로 제작과정과 같으나 LiNbO₃ 기판 위에 스트립패턴을 형성하기 위해 리토그래피 과정이 추가된다. 일반적인 포토리토그래피 방식으로는 긴 길이와 좁은 너비를 가진 스트립패턴의 균일한 축소가 어려워서 균질의 패턴형성이 불가능하다. 따라서 이를 극복하는 방법으로 레이저 직접기록방식^[3,22]을 채택하여 레이저 빔을 이용하여 마스크없이 기판 위에 직접 스트립패턴을 형성하였다. LiNbO₃ 기판을 스텝모터로 구동되는 translational stage 위에 놓고 일정한 속도로 움직여가며 집속된 아르곤 이온 레이저 빔을 쬐어 감광시키는 방법으로 패턴을 형성하였다. 이렇게 하여 12.5 μm , 8 μm 의 너비를 가진 스트립패턴을 제작하였다. 스트립패턴의 너비는 레이저 빔의 세기를 바꾸어 조절한다. 스트립패턴이 형성된 LiNbO₃ 기판을 sputtering으로 약 900 \AA 두께의 Ti 필름을 증착하였다. Ti 필름이 증착된 기판을 아세트 용액에 넣어 끓인 후 lift-off 하였다. 이러한 방법으로 -자형 스트립패턴을 제작하고 이를 기판으로 rotational stage를 사용하여 X자 교차형패턴과 Y자형 스트립패턴을 형성하였다. 형성된 X자 교차형

스트립패턴을 그림 6에 나타내었다. 교차형패턴의 경우 교차각은 약 40분으로 무척 작아서 교차되는 부분의 모습은 X와 Y자형에 따른 차이가 거의 없다. Ti필름 스트립패턴이 형성된 LiNbO₃ 기판을 고온도 가니에 넣고 1000°C 에서 10시간 동안 확산시켰다. 분위기 기체는 수증기를 함유한 아르곤(0.2 l/min)과 산소(0.1 l/min)를 함께 사용하였다. 확산시킨 광도파로는 광도파 특성을 관측하기 위하여 양쪽 모서리를 연마(polishing)하였다. 이 작업은 광도파로의 입출력 결합을 위해서 중요하고 조심스러운 일이다. 견직(silk)으로 된 연마용 천으로 1 μm 와 0.3 μm 의 알루미나 가루를 사용하여 연마하였다. 현미경으로 관찰하여 모서리 부분이 깨끗하게 연마되었을 때 작업을 마친다.

제작한 Ti : LiNbO₃ 스트립 광도파로의 광도파특성을 측정하기 위한 실험장치를 그림 7에 나타내었다. 광원은 파장이 633nm인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 입력결합은 NA(numerical aperture)가 0.1인 대물렌즈를 사용하였다. 그림 8은 입력결합하여 광도 파

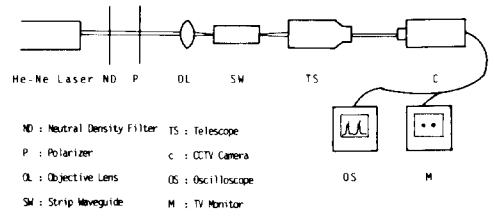


그림 7. 실험장치
 Fig. 7. Experimental set-up.

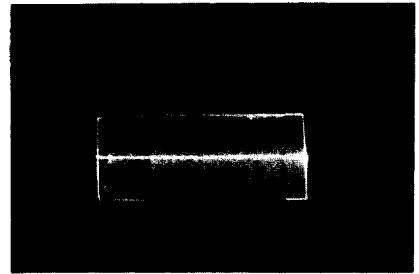
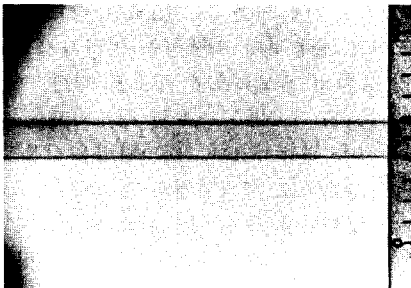
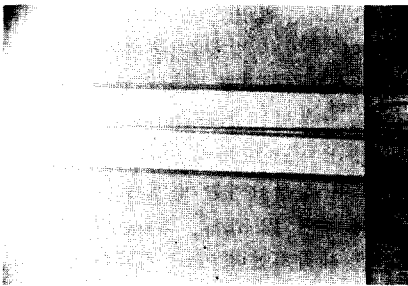


그림 8. 도파로에 입력결합하여 도파되는 모습
 Fig. 8. Waveguiding picture by end-fire coupling.



(a)



(b)

그림 6. 스트립패턴
 (a) -자형 스트립
 (b) X자 교차형 스트립

Fig. 6. Strip pattern.
 (a) Single strip.
 (b) X-crossing strip.

로에 도파되는 모습을 나타낸 것이다. 출력은 close-up 렌즈를 부착한 망원경을 사용하여 확대한 후 CCTV 카메라를 사용하여 near-field 패턴을 관측하였다. 그리고 CCTV 카메라에서 나오는 영상신호를 오실로스코프에 연결하여 near-field intensity profile을 관측하였다.²³⁾ 그림 9는 각각 -자형, X자 교차형 및 Y자형 스트립 광도파로의 near-field 패턴이다. X자 교차형 스트립 광도파로는 한쪽 부분에만 입력 결합시켰다. 그림 10(a)은 X자 교차형 스트립 광도파로의 intensity profile으로 그림에서 보면 밝은 쪽과 어두운 쪽의 세기(intensity)의 비가 약 4 : 1로 나타났다. 출력 세기의 비는 교차각, 스트립 폭과 어긋나기 시키는 도파모드에 따라 차이를 나타낸다. 그러므로 4 : 1이라는 값에 특별한 의미는 없다. 그림 10(b)는 Y자형 스트립 광도파로의 intensity profile을 나타낸 것으로 그림에서 보면 강도가 약 1 : 1의 비를 이루고 있음을 알 수 있다. 따라서 제작된 Y자형 광도파로는 power divider로 활용이 가능하다. 도파모드의 크기(mode size)는 단일모드의 경우에 광섬유와의 결합을 위해 의미를 갖지만 다중모드의 경우 별다른 의미가 없고 측정을 위해서는 별도의 장치가 필요하므로 측정하지 않았다.

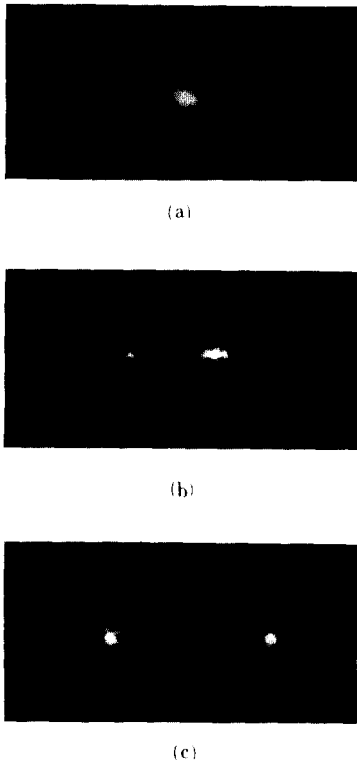


그림 9. 스트립 광도파로의 Near-field 패턴
(a) -자형 스트립
(b) X자 교차형 스트립
(c) Y자형 스트립

Fig. 9. Near-field patterns of strip optical waveguide.
(a) Single strip.
(b) X-crossing strip.
(c) Y-branch strip.

V. 결 론

Y-cut LiNbO₃ 단결정 기판위에 Ti을 확산시켜 광도파로를 제작하였다. 제작한 광도파로는 프리즘결합기를 이용하여 도파실험을 하고 밝은 모드선 측정 방법(bright M-line spectroscopy)을 사용하여 광도파로의 특성을 측정하였다. 프리즘으로 입사되는 빛의 입사각으로 He-Ne 레이저(파장 633nm)에서의 TE모드에 대한 유효굴절율을 측정하고 기판 내부의 굴절율변화를 WKB 근사방식으로 구하였다. 도파모드수에 따른 굴절율분포 곡선을 Gaussian 분포로 가정하여 나타내었다. 그리고 Ti필름 두께와 굴절율분포의 관계를 고찰하였다. 따라서 도파모드수와 유효굴절율을 Ti 필름 두께로 조절이 가능함을 확인하였다.

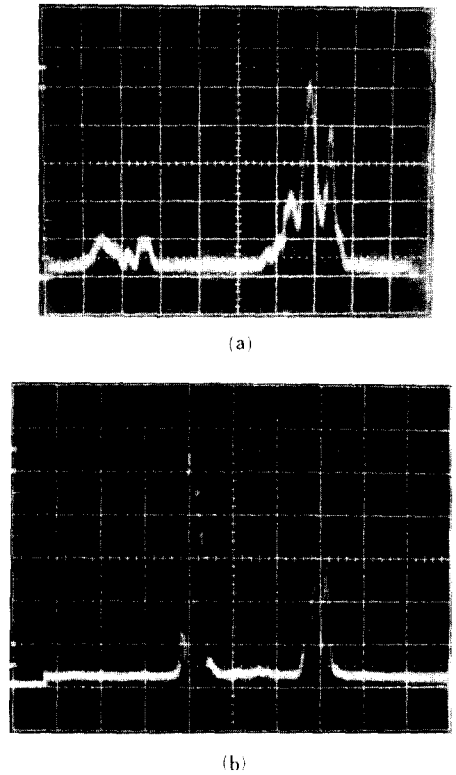


그림 10. 스트립 광도파로의 Near-field intensity profile
(a) X자 교차형 스트립
(b) Y자형 스트립

Fig. 10. Near-field intensity profiles of strip optical waveguide.
(a) X-crossing strip.
(b) Y-branch strip.

레이저 직접기록방식에 의한 리토그래피를 이용하여 -자형 스트립, X자 교차형 스트립 및 Y자형 스트립 패턴을 형성하고, Ti:LiNbO₃ 스트립 광도파로를 제작하였다. 제작한 스트립 광도파로의 near-field intensity profile을 관찰하였다.

参 考 文 献

[1] R.V. Schmidt, "Guided wave devices in ferroelectrics," *Digest of Topical Meeting on Integrated and Guided Wave Optics*, TuA1, 1978.
[2] R.C. Alferness, "Guided-wave devices for optical communication," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 6, pp. 946-959, 1981.

- [3] R.A. Becker, B.L. Sopori and W.S.C. Chang, "Focused laser lithographic system," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 7, pp. 1069-1071, 1978.
- [4] I.P. Kaminow and J.R. Carruthers, "Optical waveguiding layers in LiNbO_3 and LiTaO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 326-328, 1973.
- [5] Juichi Noda and Masaharu Fukuma, "Fabrication of optical waveguide in LiNbO_3 and LiTaO_3 ," *Digest of International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, pp. 575-577, 1977.
- [6] Mannhar L. Shah, "Optical waveguides in LiNbO_3 by ion exchange techniques," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 11, pp. 652-653, 1975.
- [7] J.M. Hammer and W. Phillips, "Low-loss single-mode optical waveguides and efficient high-speed modulator of $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ on LiTaO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 545-547, 1974.
- [8] R.V. Schmidt and I.P. Kaminow, "Metal-diffused optical waveguides in LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 458-460, 1974.
- [9] J.L. Jackel, C.E. Rice and J.J. Veselka, "Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 41, no. 7, pp. 607-608, 1982.
- [10] T.R. Ranganath and S. Wang, "Suppression of Li_2O out-diffusion from ti-diffused LiNbO_3 optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, no. 8, pp. 376-379, 1977.
- [11] B.U. Chen and A.C. Pastor, "Elimination of Li_2O outdiffusion waveguide in LiNbO_3 and LiTaO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, no. 11, pp. 570-571, 1977.
- [12] J.L. Jackel, D.L. Olson and A.M. Glass, "Optical damage resistance of monovalent ion diffused LiNbO_3 and LiTaO_3 ," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 7, pp. 4855-4856, 1981.
- [13] 권기영, Titanium-확산 LiNbO_3 waveguide 제작, 한국과학기술원 석사논문, 1983.
- [14] 손영성, 확산방식에 의한 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 광도파로의 제작 및 특성측정, 한국과학기술원 석사논문, 1986.
- [15] J.L. Jackel, V. Ramaswamy and S.P. Lyman, "Elimination of out-diffused surface guiding in titanium-diffused LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 7, pp. 509-511, 1981.
- [16] P.K. Tien, S. Riva-Sanseverino, R.J. Martin, A.A. Ballman and H. Brown, "Optical waveguide modes in single-crystalline LiNbO_3 - LiTaO_3 solid-solution films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 503-506, 1974.
- [17] R. Ulrich and R. Torge, "Measurement of thin film parameters with a prism coupler," *Appl. Opt.*, vol. 12, no. 12, pp. 2901-2908, 1973.
- [18] H. Nator, M. Nunoshita and T. Nakayama, "Mode control of Ti-diffused LiNbO_3 slab optical waveguide," *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 9, pp. 2546-2549, 1977.
- [19] G.J. Griffiths and R.J. Esdaile, "Analysis of titanium diffused planar optical waveguides in lithium niobate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-20, no. 2, pp. 149-159, 1984.
- [20] J.M. White and P.F. Heidrich, "Optical waveguide refractive index profile determined from measurement of mode indices: a simple analysis," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 1, pp. 151-155, 1976.
- [21] W.K. Burns, P.H. Klein and E.J. West, "Ti diffusion in Ti: LiNbO_3 planar and channel optical waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 10, pp. 6175-6182, 1979.
- [22] K.E. Wilson, C.T. Mueller and E.M. Gamire, "Laser writing of masks for integrated optical circuits," *IEEE Trans. Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 202-204, 1982.
- [23] 강원구, 레이저 lithography를 이용한 광도파로 제작, 한국과학기술원 석사논문, 1987.