

## 고온 양자교환법으로 제작된 LiNbO<sub>3</sub> 도파로의 굴절률 분포

신명진<sup>†</sup> · 조현주 · 이재철

고등기술연구원, 포토닉스 및 RF/Microwave 센터  
☎ 449-863 경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

(2004년 7월 19일 받음, 2004년 10월 21일 수정본 받음)

저손실의 높은 편광 소멸비를 갖는 LiNbO<sub>3</sub> 도파로를 만들기 위하여 고온 양자교환 방법을 이용하였다. 이 방법으로 제작된 도파로의 굴절률 특성을 분석하기 위하여 프리즘 결합기 방법으로 도파 모드를 측정하고 IWKB(inverse WKB) 방법을 사용하여 표면 굴절률 변화와 깊이에 대한 굴절률 분포 특성을 관찰하였다. 이러한 방법으로 고온 양자교환법의 주요 인자인 양자교환 온도, LS 농도, 양자교환 시간에 대한 굴절률 변화를 분석하였다.

주제어 : HTPE, refractive index profile, prism coupling, LiNbO<sub>3</sub> waveguide

### I. 서 론

LiNbO<sub>3</sub>는 높은 전기광학 효과와 비선형성을 가지는 유전체로 집적광학 소자를 만드는 중요한 물질 중 하나이다. 일반적으로 이 물질에 광도파로를 형성하는 방법으로 Ti 내부 확산 방법과 양자교환 방법이 있다. 이 중 양자교환 방법은 LiNbO<sub>3</sub>의 특징 중 하나인 복굴절성에 대하여 이방성 증감을 하여 정상굴절률은 감소시키고, 이상굴절률은 증가시키는 특성을 지니므로 정상광선과 이상광선에 대해 60 dB 이상의 높은 편광 소멸비를 나타낸다.<sup>[1]</sup> 도파로를 제작하기 위한 일반적인 양자교환 방법은 APE(Annealed Proton Exchange)법으로 LiNbO<sub>3</sub>를 150~250℃ 사이의 벤젠산에 담가 LiNbO<sub>3</sub>의 Li<sup>+</sup>이온과 벤젠산의 H<sup>+</sup>이 교환하게 한 후, 다시 LiNbO<sub>3</sub>를 300~400℃에서 열처리하여 전단계의 과도한 양자교환을 회복시켜 준다.<sup>[2]</sup> 그러나 이렇게 제작된 도파로의 일부 영역에서 초기의 과도한 양자교환이 회복되지 못하는 문제점이 보고 되어 이에 대한 해결책으로 순수 벤젠산 대신 리튬 첨가물로 희석된 벤젠산을 사용하여 약 300℃에서 양자교환을 하는 SPE(Soft Proton Exchange)법이 개발 되었다.<sup>[3,4]</sup> 이 방법은 열처리가 따로 없는 단일 공정으로 LiNbO<sub>3</sub>의 결정상 변화 없이 손실이 작은 도파로를 형성할 수 있다. 하지만 이 방법으로 양자교환을 할 경우 속도가 매우 느려 1550 nm 광원에 대한 도파로를 형성할 경우 약 3일의 시간이 소요된다. 이러한 단점을 보완하여 개발된 방법이 325℃ 이상의 고온에서 양자교환 하는 HTPE(High Temperature Proton Exchange)법이다.<sup>[5]</sup> 이 방법은 고온에서 양자교환하기 위하여 끓는점이 249℃인 벤젠산 대신 끓는점이 374℃인 스테아르 산(Stearic acid, SA)을 사용하며 리튬 스테레이트(Lithium stearate, LS)로 산의 농도를 조절 한다.

도파로의 유효 굴절률을 비파괴적으로 측정하는 방법 중 하나가 프리즘 결합기이다. 이 방법은 도파로에 도파되는 모드의 차수에 따라 빔이 커플링 되는 각도가 다르므로 그 각도를 측정하면 각각의 차수에 대한 유효 굴절률을 측정할 수 있다. 한편, 양자교환법이나 Ti 내부확산법으로 제작된 도파로와 같이 표면으로부터 점진적으로 굴절률 감소가 일어나는 경우에는 WKB 근사를 이용하면 깊이 방향 굴절률 분포와 각 차수 모드에 대한 유효 굴절률과의 관계를 모드 방정식(modal equation)으로 표현할 수 있다. 1970년대부터 프리즘 결합기 방법으로 측정된 각 모드의 유효 굴절률로부터 도파로의 깊이 방향 굴절률 분포 함수를 구하기 위한 많은 노력이 있어 왔다. 그 중 가장 많이 사용되는 방법이 White와 Heidrich<sup>[6]</sup>에 의해 제안된 방법이다. 굴절률의 분포가 선형적으로 변한다는 가정과 중간치 정리를 사용하여 모드 방정식을 풀어 각 모드에 대한 도파 깊이와의 관계를 0차 모드로부터 순차적으로 구하고 최소자승법을 통해 최적의 0차 모드의 굴절률을 찾아 도파 모드 별 도파 깊이를 구하는 것이다. 이에 대하여 Dikaev<sup>[7]</sup> 등은 굴절률의 제곱에 대한 선형성을 가정하여 굴절률 분포를 좀 더 완만하게 만들고 다양한 확산형 도파로에 대한 맞춤을 시도하였다. 또, 이들과는 다른 접근법으로 Chiang<sup>[8]</sup>은 차수별 모드에 대한 유효 굴절률을 곡선 맞춤하여  $N(m)$ 을 구한 후 수식적인 이해로부터  $m = -0.75$  값을 표면 굴절률로 먼저 구한 후 모드 방정식을 작은 조각의 합으로 나누어 직접 계산하여  $n(x)$ 를 구하였다. 앞의 각 계산 방법에 따라 표면 굴절률이나 굴절률 분포 곡선에 약간의 차이를 나타내지만 점진적으로 변하는 굴절률 분포 분석에 대한 해답을 주고 있다.

본 논문에서는 x-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 대하여 HTPE 방법을 사용하여 도파로를 제작하였다. HTPE 방법의 도파로 제작 인자인 LS의 농도, 양자교환 온도와 양자교환 시간을 변수로 하여 각 조건 별 도파로를 제작하였으며 기술한 바와 같

<sup>†</sup> E-mail: mjshin@iae.re.kr

이 프리즘 결합기 방법으로 모드별 유효 굴절률을 측정된 후 White와 Heidrich에 의해 제안된 방법으로 제작된 도파로의 깊이에 따른 굴절률 분포를 구하고 각 제작 인자 별 경향성을 살펴보았다.

**II. HTPe 방법으로 제작된 도파로의 굴절률 분포**

Korkishko 등은  $\text{LiNbO}_3$ 가 양자교환에 의해 가질 수 있는 결정상( $H_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ )을  $\alpha, x_1, x_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 로 7 가지 상으로 나누었다.<sup>[9]</sup> 이러한 분류는  $\text{H}^+$  이온과  $\text{Li}^+$  이온의 교환 정도를 나타내는 인자인  $x$ 에 따라 나뉘어지며 각 결정상은 굴절률 분포와 굴절률 증가량, 전기광학계수, 도파 손실 등의 측면에서 뚜렷한 특징을 나타낸다. 특히,  $\alpha$  결정상은  $x$ 가 0.12 이하 범위에서 생성되는 것으로 전기광학계수 등  $\text{LiNbO}_3$ 의 특성을 거의 유지하면서 도파 손실이 작아 도파로로서 유리한 특징을 가진다. 이 결정상은 표면으로부터 굴절률이 점진적으로 증가하는 굴절률 분포를 가지며 633 nm 파장에 대하여 최대 0.03의 굴절률 증가량을 가진다.  $x$ 가 0.56 이상인 과도한 양자교환으로부터 얻어지는  $\beta$  결정상은 633 nm 파장에 대하여 0.10 이상의 굴절률 증가량을 가지고 계단 형태의 굴절률 분포를 가지며  $\text{LiNbO}_3$ 의 전기광학적 특성이 1/10 이상 감소하는 특성을 가진다.  $x$  결정상은  $\beta$  결정상이 고온의 열처리에 의해 형성될 수 있으며 전기광학적 특성이 다소 회복이 되지만 손실이 매우 큰 결정상이다. 일반적인 APE 방법은  $\beta$  결정상 형성 후 열처리에 의해  $\beta_4 \rightarrow \beta_3 \rightarrow \beta_2 \rightarrow \beta_1 \rightarrow \alpha$ 의 결정상 변화를 통해  $\alpha$  상을 형성하지만 HTPe 방법은 적정 온도와 농도 조건을 통해 상변화 없이  $\alpha$  결정상을 형성하는 것이 가능하다고 알려져 있다.

HTPe 방법으로 제작된  $\text{LiNbO}_3$ 의  $\alpha$  결정상의 도파로나 Ti 내부확산법으로 만들어진 도파로와 같이 점진적인 굴절률 분포를 갖는 도파로의 모드 방정식은 계단형 굴절률 분포를 가진 도파로와 달리 쉽게 풀리지 않으므로 WKB 근사를 사용하여 모드 방정식을 풀어야 한다. 표면에 수직인 방향을  $z$ 라고 할 때  $x$  방향으로 손실 없이 진행하는 TE 모드에 대한 파동방정식을 WKB 근사를 사용하여 간략화하면 다음과 같다.<sup>[6]</sup>

$$\frac{1}{\lambda} \int_0^{z_m} [n^2(z) - n_m^2]^{1/2} dz = \frac{4m-1}{8}, \quad m=1, 2, \dots, M \tag{1}$$

이 때  $z_m$ 은  $n(z_m) = n_m$ 으로  $m$ 차 도파모드  $n_m$ 의 도파 깊이를 의미하며,  $z_0 = 0$ 이고,  $n_0 = n(0)$ 로 표면 굴절률을 의미한다. 이와 같은 굴절률 분포를 가지는 도파로를 프리즘 결합기 방법으로 도파 모드를 측정하면 각 차수별 모드의 도파 조건이 다르므로 도파 모드( $n_m$ )의 간격이 일정하지 않게 나타난다. 이것을 깊이에 대한 식으로 나타내기 위하여 고유치 방정식의 적분항을 각 모드에 대한 조각의 합으로 바꾸고

굴절률의 깊이 방향에 대한 분포가 선형적으로 변한다는 가정과 중간값의 정리를 사용하여 방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$z_m = z_{m-1} + \left[ \lambda \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{n_{m-1} + 3n_m}{2} \right)^{-1/2} (n_{m-1} - n_m)^{-1/2} \right] \times \left\{ \left( \frac{4m-1}{8} \right) - \frac{2}{3\lambda} \sum_{k=1}^{m-1} \left( \frac{n_{k-1} + n_k}{2} + n_m \right)^{1/2} \left( \frac{z_k - z_{k-1}}{n_{k-1} - n_k} \right) \right. \\ \left. \left[ (n_{k-1} - n_m)^{3/2} - (n_k - n_m)^{3/2} \right] \right\} \tag{2}$$

$m=2, 3, \dots, M$

$$z_1 = \frac{9\lambda}{16} \left( \frac{n_0 + 3n_1}{2} \right)^{-1/2} (n_0 - n_1)^{-1/2}$$

이 때  $n_1, n_2, \dots, n_M$ 은 프리즘 결합기를 통해 측정된 값이지만  $n_0$ 는 미지의 값이 된다. 미지의  $n_0$ 를 구하기 위하여

$$\sum_{k=0}^{M-2} \left[ \frac{\frac{n_{k+2} - n_{k+1}}{z_{k+2} - z_{k+1}} - \frac{n_{k+1} - n_k}{z_{k+1} - z_k}}{\frac{z_{k+2} + z_{k+1}}{2} - \frac{z_{k+1} + z_k}{2}} \right]^2 \tag{3}$$

가 최소가 되는  $n_0$ 를 반복적 시행착오 방법을 사용하여 구하면 측정된 각 모드의 굴절률에 대한 도파 깊이가 결정된다. 이렇게 결정된  $[(n_k, z_k)]$  값들의 조합을 Nikolopoulos와 Yip에 의해 제안된 지수, Gaussian, 계단형 함수를 모두 표현할 수 있는 일반화된 Gaussian 함수<sup>[10]</sup>로 곡선 맞춤하여 제작된 도파로의 깊이에 따른 굴절률 분포의 형태를 유추하였다. 이 함수식은  $a$  값이  $a < 1$  일 때는 지수 함수 형태를  $1 < a \leq 2$  일 때는 Gaussian,  $a \geq 20$ 에서는 계단 형태 함수를 표현할 수 있다. 곡선 맞춤에 사용된 식은 아래와 같다.

$$n(x) = n_0 \exp \left( - \left( \frac{x}{d} \right)^a \right) \tag{4}$$

이 때,  $n_0$ 는 표면의 굴절률을 나타내고,  $a$ 는 함수 형태에 관계된 요소이며,  $d$ 는 유효 도파 깊이를 나타낸다. 이 중 표면 굴절률은  $n_0 = n_b + \Delta n$ 로  $\text{LiNbO}_3$  기판의 굴절률( $n_b$ )에 양자교환에 의한 굴절률 증가량을 더한 값이다.

제작된 도파로의 깊이 방향 굴절률 특성을 구하기 위하여 633 nm 광원, TE 모드에 대하여 프리즘 결합기 방법으로 평판 도파로의 도파 모드를 관찰하였다. 측정에 사용된 프리즘은 633 nm 광원, TE 모드에서의 굴절률이 2.8648인 rutile 프리즘을 사용하였다. 다중 모드가 도파되는 633 nm 광원을 사용하여 도파로의 굴절률 분포를 유추함과 더불어 실제 적용 파장인 1550 nm 광원으로 프리즘 결합하여 단일 모드의 도파를 확인하였다.

**III. 도파로 제작**

HTPe를 위한 도파로의 기판으로 Crystal Technology Inc.의 x-cut  $\text{LiNbO}_3$  기판을 사용하였고 HTPe를 위한 용기로 순수 Zr을 500°C에서 질화시켜 사용하였으며 고온 고압에서

기화된 용액이 새어 나가는 것을 막고 Cu<sup>+</sup>나 Fe<sup>2+</sup>에 의한 오염을 막기 위해 순수 Al 가스켓으로 밀폐하였다. HTPE 방법은 325℃ 이상의 고온에서만 양자교환이 이루어져야 하기 때문에 용기의 아래쪽에는 저온에서 양자교환이 일어나지 않도록 비교적 LS가 풍부한 혼합액을 두고 용기의 위쪽에는 산의 농도가 높은 혼합액을 준비한 후, 용기의 아래 부분에 양자교환 할 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 두었다. 양자교환을 위해 온도를 올린 후, 적정 온도가 되었을 때 용기를 흔들기 시작하여 위와 아래 혼합액이 섞인 상태에서 양자교환이 진행되도록 하였다. 혼합액의 LS 농도는 각 혼합물에 대한 질량의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\rho(\%) = \frac{m_{LS}}{m_{LS} + m_{SA}} \times 100 \quad (5)$$

HTPE의 온도에 따른 양자교환 특성을 관찰하기 위하여 LS 0.30% 농도에 대하여 350℃, 370℃, 390℃에서 8시간 양자교환 하였고, LS 농도에 대한 도파로의 특성 변화를 위해 390℃, 8시간에서 LS 농도를 0.60%에서 0.45%로 변화 시켜 가면서 도파로를 제작하였으며 양자교환 시간 변화에 대한 관찰을 위해 390℃, LS 0.50%에서 3.3시간, 8시간, 8.5시간, 10시간으로 변화시켜 가면서 양자교환 하였다.

#### IV. 실험 결과 및 특성 분석

##### 4.1. 양자교환 온도에 따른 굴절률 변화

양자교환 농도를 LS 0.30%와 양자교환 시간을 8시간으로 하고 양자교환 온도를 350℃부터 390℃까지 20℃씩 높여 가면서 평판 도파로를 제작하고 TE 편광 모드에 대한 도파 모드를 측정하였다. 표 1에서 보는 것과 같이 양자교환 온도가 증가할수록 표면 굴절률 증가량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 350℃의 경우 633 nm 파장에 대하여 2개의 도파 모드만이 존재하여 곡선 맞춤에 의한 굴절률 분포를 구할 수 없으므로 이와 비슷한 도파 모드를 가진 결과로부터 굴절률 증가량만을 유추하였다. 또, 390℃에서 양자교환 하였을 때 표면 굴절률 증가량이 633 nm에서 0.0937로 문헌상<sup>[9-11)]</sup>에 보고 된 x-cut LiNbO<sub>3</sub>의 α 결정상의 최대 굴절률 증가량인 0.03를 넘었을 뿐 아니라 굴절률 분포에서도 곡선 맞춤한 α 값이 18로 계단형 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 제

작된 도파로가 고온에서 과도하게 양자교환 되어 생기는 결정상인 x 상에 있음을 말해준다.<sup>[9]</sup> 또, 각 도파로에 대하여 1550 nm 파장으로 프리즘 결합한 결과로부터 온도가 증가함에 따라 단일 모드의 유효 굴절률( $N_{eff}$ )이 증가함을 알 수 있고 390℃에서 제작한 도파로의 경우 큰 굴절률 증가량과 도파 깊이로 인해 4개의 다중 모드가 도파되는 것을 관찰하였다. 이처럼 양자교환 온도가 높아질수록 표면 굴절률 증가량과 도파 깊이가 증가하는 것은 온도가 높아질수록 양자교환이 활성화되는 것으로 판단된다.

##### 4.2. LS 농도에 따른 굴절률 변화

LS 농도에 따른 굴절률 변화를 관찰하기 위하여 같은 온도 같은 시간에 대하여 LS 농도를 변화 시켜 가면서 HTPE 후 굴절률 변화를 관찰하였다. 표 2는 LS 농도 변화에 따른 표면 굴절률 증가량과 굴절률 분포 함수의 결과이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 LS 0.45% 이상 농도에서는 LS 농도가 증가할수록 양자교환에 의한 표면 굴절률 증가량이 선형적으로 감소하며 그 기울기( $\Delta n_{633nm}/LS$  농도[%])는 -0.11922로 선형 맞춤되었으며 표면 굴절률 증가량도 0.03 이하로 LiNbO<sub>3</sub>가 α 결정상에 있음을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급했듯이 LS 0.30%의 경우 급격한 굴절률 변화를 나타내고 있으며 그림 2에서 보이는 바와 같이 굴절률 증가량과 굴절률 분포 함수로부터 α 결정상을 벗어났음을 알 수 있다. 또한, 그림 2로부터 LS 0.30%의 굴절률 분포가 깊이에 따라 표면에는 계단 형태의 굴절률 분포를 보이고 있으며 4.5 μm 이상 깊이에서는 Gaussian 형태를 한 두 개의 다른 결정상을 형성하고 있는 것처럼 보인다. 이것은 도파로에 두 개의 각기 다른 결정상이 생긴 것으로 표면에는 과도한 양자교환에 의해 β 또는 x 상이 형성되고 어느 정도 깊이에서는 확산에 의한 α 상이 형성된 것으로 판단된다.

각 LS 농도 조건에 대해 1550 nm 광원으로 프리즘 결합한 결과가 그림 3에 있다. LS 0.30%에서는 높은 굴절률 증가량과 도파 깊이 때문에 다중 모드가 도파하고 LS 0.45%부터 LS 0.50% 농도까지는 완전 단일 모드가 도파하며 이보다 LS 농도가 높은 LS 0.57% 이상에서는 불완전 단일 모드가 도파한다. 이로부터 LS 농도가 증가할수록 도파로의 표면 굴절률 증가량이 감소하여 도파 모드의 유효 굴절률이 점차적으로 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 4에서 보이는

표 1. LS 0.30% 농도, 8시간에서 온도에 따른 굴절률 변화 (TE 모드)

LS conc. [%]	PE time [h]	Temp. [°C]	$\Delta n_{633nm}$	$\alpha$	$d$ [μm]	$N_{eff(1550nm)}$
0.30	8	350	<0.0029	-	-	1 mode 2.13818
0.30	8	370	0.0062	1.79	3.63	1 mode 2.13829
0.30	8	390	0.0937	18.2	4.49	4 modes 2.20403 2.18784 2.16318 2.14080

표 2. 양자교환 온도 390℃, 8시간에서 LS 농도에 따른 굴절률 변화 (TE 모드)

LS conc. [%]	PE time [h]	Temp. [°C]	$\Delta n_{633nm}$	$a$	$d$ [ $\mu m$ ]	$N_{eff}(1550nm)$
0.30	8	390	0.0936	18.2	4.50	4 modes
0.45	8	390	0.0288	1.69	1.79	2.14100
0.49	8	390	0.0229	1.45	2.16	2.14075
0.50	8	390	0.0213	1.48	2.25	2.14071
0.57	8	390	0.0129	1.67	2.69	2.13954
0.60	8	390	0.0110	1.68	2.89	2.13914

바와 같이 1550 nm 광원에서 측정된 도파 모드의 유효 굴절률과 633 nm 프리즘 결합기 방법의 측정 결과로 얻은 굴절률의 증가량과 도파 깊이의 곱, 즉 광학적 두께가 서로 유사한 경향성을 보인다.

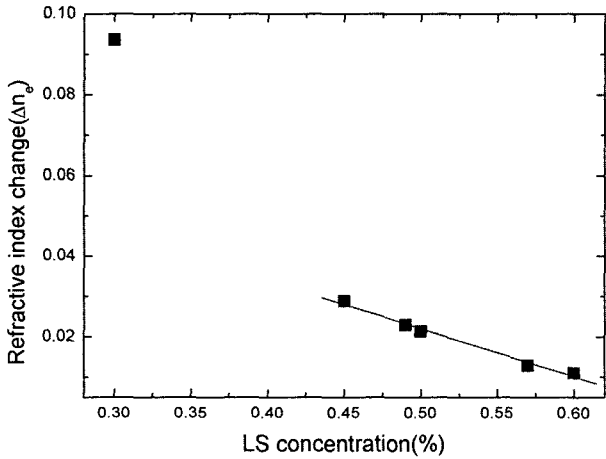


그림 1. LS 농도 변화에 따른 굴절률 증가량 (390℃, 8 시간, 633 nm, TE 모드).

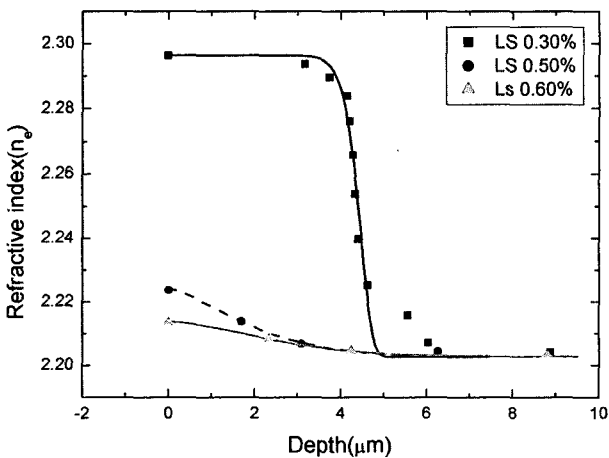


그림 2. LS 농도 변화에 따른 굴절률 분포 (390℃, 8 시간, 633 nm, TE 모드); (1) LS 0.30% :  $a=18.2$ ,  $d=4.50$ , (2) LS 0.50% :  $a=1.48$ ,  $d=2.25$ , (3) LS 0.60% :  $a=1.68$ ,  $d=2.89$

### 4.3. 양자교환 시간에 따른 굴절률 변화

LS 0.50%, 390℃ 온도에서 양자교환 시간을 변화시켜 가면서 제작된 도파로의 굴절률 분포 변화를 관찰하였다. 또, 양자교환 시간에 따른  $H^+$  이온의 확산 특성을 알기 위하여 논문<sup>[12]</sup>에 제시된 것과 같이 깊이에 따른 굴절률 분포를 재 정의하고 곡선 맞춤하여 유효 굴절률에 관한 확산상수 ( $D_n$ , [ $\mu^2/h$ ])를 구하였다. 다음은 굴절률 분포를 확산상수의 항으로 재 정의한 식이다.

$$n_e(z, t) = n_e^0 + \Delta n \exp(-z^2/4D_n t) \quad (6)$$

본 실험의 결과가 표 3에 정리되어 있다. 3.3시간 양자교환

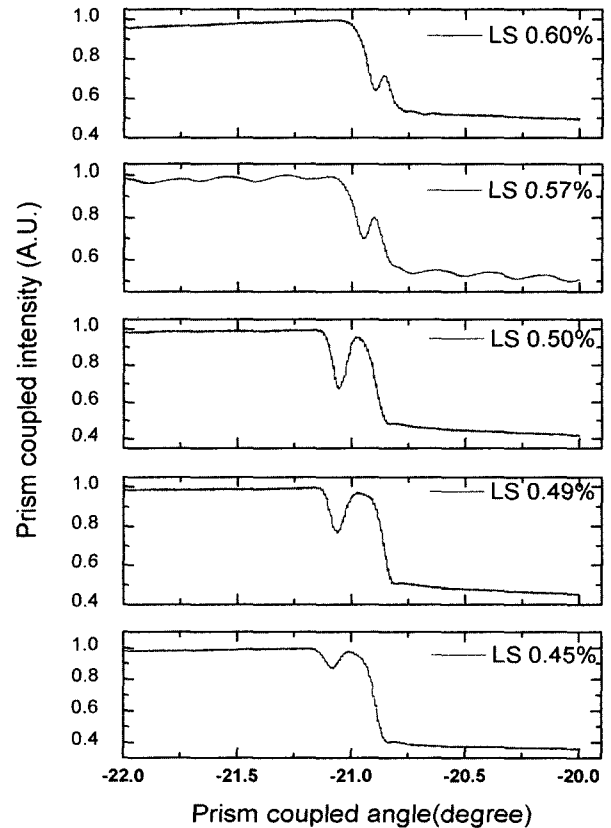


그림 3. LS 농도 증가에 따른 1550 nm 파장, TE 모드에서의 프리즘 결합.

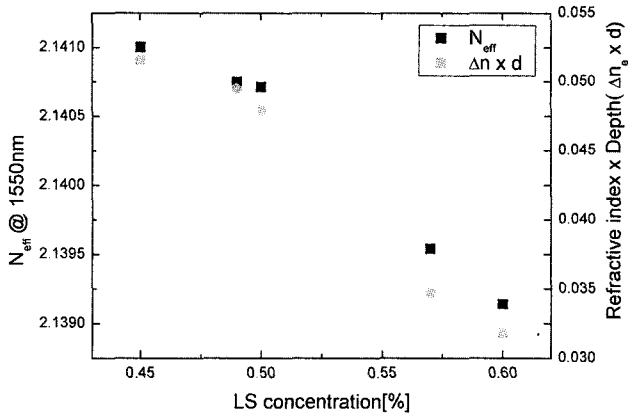


그림 4. LS 농도에 따른 유효 굴절률(1550 nm, TE 모드)과  $\Delta n_e \times d$  (633 nm, TE 모드).

의 경우 633 nm에서 1개의 모드만이 도파 되어 굴절률 맞춤을 할 수 없었고 8시간 이상에서는 시간이 증가함에 따라 도파 깊이는 증가하고 표면 굴절률은 감소하는 것을 볼 수 있다. 양자교환 시간에 따른 프리즘 결합한 결과와 이로부터 얻은 굴절률 분포 변화가 그림 5와 그림 6에 있다. 일반적으로 APE 방법으로 도파로를 만들 경우 초기 과도한 양자교환에 의해 형성된 굴절률 증가량은 시간과 온도에 관계없이 약 0.13으로 그 증가량이 매우 커서 수십 분의 양자교환으로도 쉽게 다중 모드가 도파된다. 그러나 3.3시간의 HTPE 결과는

표 3. LS 0.5%, 양자교환 온도 390°C에서 양자교환 시간에 따른 굴절률 변화 (TE 모드)

LS conc. [%]	PE time [h]	Temp. [°C]	$\Delta n_{633nm}$	$a$	$d$ [ $\mu m$ ]	$N_{eff}(1550nm)$	$D$ [ $\mu m^2/h$ ]
0.50	3.3	390	1 mode	-	-	-	-
0.50	8.0	390	0.0213	1.48	2.25	2.14071	0.159
0.50	8.5	390	0.0193	1.33	2.55	2.14113	0.177
0.50	10.0	390	0.0010	1.25	4.36	2.14107	0.472

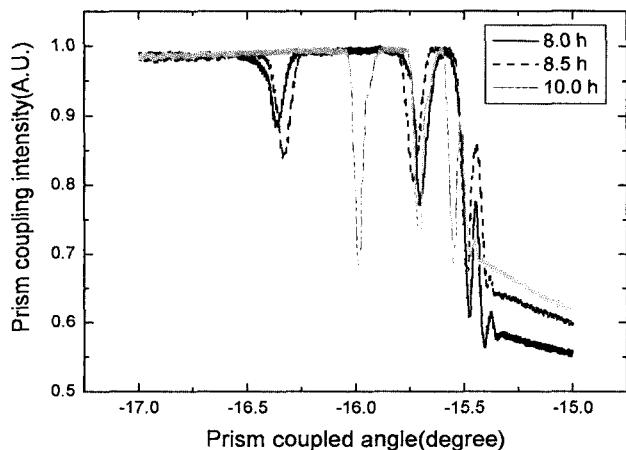


그림 5. 양자교환 시간에 따른 굴절률 분포 측정을 위한 프리즘 결합 (633 nm, TE 모드).

633nm 파장에 대한 프리즘 결합에서 단 1개의 모드만이 도파되어 과도한 굴절률 증가가 일어나지 않았음을 의미하며 이는 HTPE 과정이 APE와는 다른 메커니즘으로 양자교환 초기부터  $\alpha$  결정상을 유지하면서 도파로를 형성하는 과정임을 확인할 수 있다. 또, 표면 굴절률이 급격히 감소하고 확산상수 또한 급격히 증가한 10시간 양자교환 결과는 APE의 열처리에서 나타나는 확산 효과와 유사한 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 HTPE 과정이 일정시간 이후에는 양자교환보다 확산이 더 주요하게 영향을 미침을 추정할 수 있다.

### V. 결 론

손실이 작고 편광 소멸비가 뛰어난 LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 제작하기 위하여 HTPE 방법을 이용하였다. 기존의 APE 방법이 활발한 연구가 진행 되어온 것에 비해 HTPE 방법은 아직 그 특성이 제대로 규명되지 않은 새로운 양자교환법이다. 본 논문에서는 HTPE 방법의 특성을 결정짓는 세 가지 인자인 LS의 농도, 양자교환 온도와 시간의 조건을 변화시켜 가면서 도파로를 제작하였고 제작된 도파로의 도파 모드를 프리즘 결합기로 측정하고 점진적인 굴절률 변화를 갖는 경우에 대한 모드 방정식을 IWKB 방법으로 풀어 측정된 각 차수별 모드에 대한 도파 깊이와 표면 굴절률을 계산하고 맞춤하여 굴절률 분포를 결정하였다.

실험 결과 일정 LS 농도 이상에서는 LiNbO<sub>3</sub>의 결정상이  $\alpha$

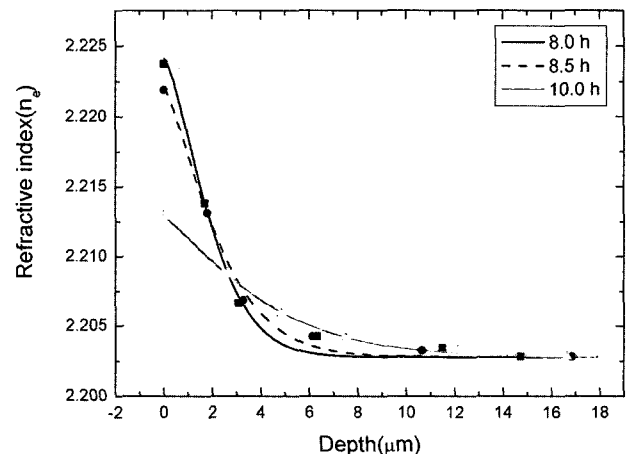


그림 6. 양자교환 시간에 따른 굴절률 분포 (LS 0.50%, 양자교환 온도 390°C, 633nm, TE 모드); (1) 8.0h :  $a=1.48$ ,  $d=2.25$ , (2) 8.5h :  $a=1.33$ ,  $d=2.55$ , (3) 10.0h :  $a=1.25$ ,  $d=4.36$ .

상에 있으며 굴절을 분포에 있어서 깊이에 따라 점진적으로 굴절률이 감소하는 Gaussian 분포를 나타내고 있었다. 또한, 양자교환 온도가 높아질수록 양자교환이 활성화되어 도파로의 표면 굴절률이 증가하고  $\alpha$  결정상에 이르는 LS 농도의 문턱값이 높아지는 특성을 얻었다. 그리고 LS 농도가 감소할수록 표면 굴절을 증가량이 선형적으로 증가하고 일정 LS 농도 이하에서는 LiNbO<sub>3</sub>의 결정상이 급격히 변화하는 것을 알 수 있었고, 양자교환 시간이 증가할수록 도파 깊이가 증가하나 일정 시간 이상에서는 표면 굴절을 역시 감소하는 특성을 얻었다. 또한 3.3시간의 양자교환으로부터 HTPE 방법이 기존의 과도한 양자교환 후 열처리에 의한 확산 과정으로 도파로를 생성하는 APE와 달리 초기 양자교환부터  $\alpha$  결정상을 형성하고 시간이 지남에 따라 양자 교환 깊이가 증가하여 도파로를 만드는 새로운 메카니즘의 방법임을 실험적으로 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 부분적으로 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며 문흥기, 유재승, 권오선 연구원의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] William K. Burns, *Optical Fiber Rotation Sensing*, (Academic Press, 1994), chap. 7.  
 [2] Janet Lehr Jackel, "Proton exchange: past, present, and future", *SPIE*, vol. 1583, pp. 54-63, 1991.  
 [3] M. L. Boltz, L. A. Eyres, and M. M. Fejer, "Depth profiling of d33 nonlinear coefficient in annealed proton exchange LiNbO<sub>3</sub> waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 2012-2014, 1993.  
 [4] L. Chanvillard, P. Aschieri, P. Baldi, M. De Micheli, D. B. Ostowsky, L. Huang, and D. J. Bamford, "Highly efficient

integrated optical parametric generator produced by soft proton exchange in PPLN", in proc. 9th European Conf integr. Opt.(ECIO '99), Turin Italy, April 13-16, pp. 513-516, 1999.  
 [5] Yuri N. Korkishko, Vyacheslav A. Fedorov, Oksana Y. Feoktistova, "LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, pp. 562-568, 2000.  
 [6] J. M. White and P. F. Heidrich, "Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis", *Appl. Opt.*, vol. 15, pp. 151-155, 1976.  
 [7] Yu. M. Dikaev, Yu. L. Kopylov, I. M. Kotelyanskii, "A simple method for Determination of profiles in diffused waveguides", *Kvantovaya Elektronika*, vol. 8, pp. 378-381, 1981.  
 [8] K. S. Chiang, "Construction of refractive-index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective index", *J. Lightwav. Tech.*, vol. LT-3, pp. 385-391, 1985.  
 [9] Yu. N. Korkishko and V.A. Fedrov, *Ion exchange in single crystal for integrated optics and optoelectrics*, (Cambridge international science publishing, 1999), pp. 97-269.  
 [10] John Nikolopoulos and Gar Lam Yip, "Accurate modeling of the index profile in annealed proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides", *SPIE*, vol. 1583, pp. 71-82, 1991.  
 [11] M. M. Howerton, W. K. Burn, P. R. Skeath, A. S Greenblatt, "Dependence of refractive index on hydrogen concentration in proton exchanged LiNbO<sub>3</sub>", *J. Quantum. Electron.*, vol. 27, pp. 593-601, 1991.  
 [12] J. M. Zavada, H. C. Casey, Chang-Ho Chen, A. Loni, "Correlation of refractive index profile with substitutional hydrogen concentrations in annealed proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 2769-2771, 1993.

## Characterization of refractive index profile in LiNbO<sub>3</sub> waveguides fabricated by high temperature proton exchange method

Myung Jin Shin<sup>†</sup>, Hyun Ju Cho, and Jae Cheul Lee

enter for Photonics and RF/Microwave, Institute for Advanced Engineering, Yongin P.O. Box 25, 449-020, Korea

<sup>†</sup>E-mail:mjshin@iae.re.kr

(Received July 19, 2004, Revised manuscript October 21, 2004)

The high temperature proton exchange (HTPE) method was used to fabricate optical waveguides based on LiNbO<sub>3</sub>, which gives rise to low propagation loss and high polarization extinction ratio. To characterize the refractive index distribution of the fabricated waveguides, the guided modes of each waveguide were observed using the prism coupling method and then the refractive index profile was calculated by the inverse WKB method with the least square fitting. Finally, we showed how the HTPE parameters such as the temperature of PE, the concentration of lithium additive, and the time of PE effect the refractive index profile.