

# 자기정렬된 SiO<sub>2</sub> 클래딩 구조를 갖는 양자 확산 LiNbO<sub>3</sub> 광도파로의 특성

손영성, 이형재\*, 신상영  
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Characteristics of Proton-Diffused LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguides with Self-Aligned SiO<sub>2</sub>-Cladding

Yung-Sung Son, Hyung-Jae Lee and Sang-Yung Shin  
Department of Electrical Engineering, K A I S T

### ABSTRACT

The characteristics of proton-diffused LiNbO<sub>3</sub> optical waveguides with self-aligned SiO<sub>2</sub>-cladding are reported. When the proton diffusion occurs, the SiO<sub>2</sub>-cladding limits the lateral diffusion of protons by out-diffusion of protons in unclad region. Proton indiffusion in depth direction is promoted by inhibition of out-diffusion in clad region. Consequently, the mode profile in depth direction can be nearly symmetric. The extent of the proton exchange was observed by measuring the infrared absorption peak at about 3500cm<sup>-1</sup>. It is confirmed that proton diffusion with SiO<sub>2</sub>-cladding has structural excellency.

### I. 서론

강유전체인 LiNbO<sub>3</sub> 단결정 기판을 사용하는 광도파로는 전기광학효과(Electro-optic Effect)를 이용하여 광변조기/스위치를 비롯한 여러가지 능동형 광소자를 제작할 수 있어서 1970년대 이래로 널리 연구되고 있다. 제작방법으로 가장 널리 이용되고 성숙된 기술은 티타늄(titanium: Ti) 내부확산(indiffusion) 방식으로 이미 확립되어 있으나 높은 온도(약 1000°C)에서 제작해야 하는 제약조건 때문에 리튬이온이 외부확산(Li out-diffusion)되어 이상굴절률(extraordinary refractive index)을 증가시키므로 전기광학효과를 크게

얻기 위해 이상파(extraordinary wave)를 도파시킬 때 표면도파(surface guiding) 현상이 생기는 단점과 가시광선 영역에서는 광굴절효과(photorefractive effect)에 의한 광손상(optical damage)을 받아 실용화에 어려움이 있다. 1980년대에 들어 보다 낮은 온도(약 200°C)에서 화학적 반응을 이용하는 양자교환(proton exchange) 방식이 개발되어 새로운 연구가 진행되고 있다. 양자교환방식은 안식향산 용액속에 기판을 넣어 리튬 이온과 양자 불 서로 교환시켜서 굴절을 변화를 크게 얻을 수 있고 공정시간이 티타늄 내부확산방식에 비해 짧은 장점을 지니는 반면 양자교환 반응이 급격히 일어나서 제작과정에 불균일성과 제작후 시간에 따라 특성이 변하는 불안정성을 지닌다. 또한 실제 집적광학소자에 필요한 단일모드(single mode) 광도파로를 제작하기 위한 조건이 무척 까다롭다. 이러한 단점을 보완하기 위해 몇가지 방법이 연구되었다. 첫번째 방법으로 안식향산 용액을 리튬 이온으로 완충(buffering)시켜 양자교환 반응을 완회시키는 기술이 연구되었다[1]. 리튬 이온을 이용하여 반응을 완회시키는 방법으로 광도파로를 얻으려면 반응시간이 너무 길어지고, 용액속의 리튬 이온 비율에 따라 반응이 민감하게 변하므로 실용적인 방법이 못된다. 두번째로 양자교환 후 보다 높은 온도(약 350°C)에서 리튬나오베이트 결정내에 교환된 양자를 annealing시켜 표면 근처에 심하게 밀집되어 불안정한 상태로 존재하는 양자들을 외부확산시켜 결정의 특성을 안정시키는 방법이 연구되었다[2]. 저하된 도파특성과 전기광학효과를 이 방법으로 회복시키고 시간에 따른 불안정성을 제거시키는 효과를 얻는다. 그 결과 기존의 티타늄 내부확산방식을 능가하게 되어 새로운 주목을 받고 있다[3]. 그러나 이 방법에도 근본적인 한계점이 있다. 양자교환 후 높은 온도에서 annealing시키면 급격한 양자교환 반응으로 인해 과도하게

본 논문은 한국과학재단 1988년도 목적기초연구과제의 일부로 수행되었음

고환된 양자가 열에너지를 얻어 외부로 확산되어 결정 구조 내부의 압력(stress)을 완화시켜 광특성(optical quality)을 향상시키지만 양자교환 과정에서 양자수 만큼 용액속으로 빠져나간 리튬 이온은 다시 제자리로 돌아오지 못한다. 이를 극복하기 위해서는 광도파로를 형성하기 위해서 필요한 만큼 양자교환 후 표면으로 양자의 외부확산을 억제시키면서 필요한 길이 만큼 양자를 확산시키는 방법이 이상적이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 낮은 온도(150°C)에서 양자교환 후 자기정렬된 SiO<sub>2</sub> 클래딩을 형성시켜 높은 온도(400°C)에서 양자확산 하는 방법이 최근에 발표되었다[4].

본 논문은 양자교환된 채널 패턴위에 자기정렬된 SiO<sub>2</sub>클래딩(Self-Aligned SiO<sub>2</sub>-Cladding)을 형성하여 양자확산시키는 방식으로 제작된 LiNbO<sub>3</sub> 광도파로의 특성에 관한 것이다.

## II. 본 론

양자확산방식에 의한 광도파로 제작과정을 그림 1에 나타내었고 설명은 다음과 같다. 금속 마스크 채널패턴을 LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 lift-off기법으로 형성한 후, 기판과 안식향산 가루를 모래시계 모양으로 가운데 부분을 갈록하게 가공한 유리관의 위아래 부분에 각각 넣어 분리시켜 밀봉한다. 밀봉된 유리관을 노가니에 넣어 150°C로 가열한다. 설정한 온도에 도달한 후, 유리관을 뒤집어 액체상태의 안식향산에 기판을 담그어 양자교환시킨다. 일정시간(1 - 4 시간) 동안 양자교환하고 노가니에서 꺼내어 다시 뒤집어 식힌 후 기판에 포토레지스트를 입히고 기판의 아랫면에 노출을 주어 양자교환에 사용한 금속마스크를 그대로 사용하여 자기정렬된 패턴을 형성시킨다. 포토레지스트를 현상한 후 SiO<sub>2</sub>를 증착시키고 lift-off 방법으로 자기정렬된 SiO<sub>2</sub>클래딩을 형성시킨다. 형성된 SiO<sub>2</sub> 클래딩은 양자확산과정에서 양자의 외부확산을 억제시키고 내부확산을 증진시키는 마스크 역할을 한다. SiO<sub>2</sub>클래딩 패턴이 형성된 기판을 온도 400°C로 유지되는 노가니에 넣고 산소 기체 분위기에서 양자교환조건에 따라 일정시간(10 - 100 분) 동안 양자확산시켜 광도파로를 얻는다.

광도파로 제작과정에서 SiO<sub>2</sub> 클래딩의 효과는 다음과 같다. 우선 낮은 온도(150°C)에서 양자교환을 하면 리튬 이온에 의한 용액의 완충없이 안식향산에 의한 반응이 완화된 양자교환 정도의 조절이 용이하다. 기판의 아랫면에 노출을 주어 양자교환된 부분에만 SiO<sub>2</sub>클래딩을 형성하고 양자확산시키므로 양자의 외부확산을 효과적으로 억제시키고 내부확산을 효율적으로 증진시킨다. 또

한 횡방향으로 확산된 양자는 SiO<sub>2</sub>클래딩 마스크 영역을 벗어나면 기판위로 외부확산되므로 횡방향으로의 양자 농도분포가 SiO<sub>2</sub> 클래딩 영역으로만 국한되는(confined) 효과를 얻는다. 따라서 횡방향 도파모드(lateral mode)가 잘 유지되므로 구조적으로 도파모드의 복사손실(radiation loss)을 크게 줄일 수 있어서 집적도를 높일 수 있다. SiO<sub>2</sub>클래딩은 광도파로와 공기층 사이에 놓여 있으므로 광도파로 표면에서의 급격한 굴절을 변화시킬 수 있어 길이 방향으로의 도파모드를 대칭형으로 유지하는 데 기여한다. 실제로 측정된 길이 방향 모드의 intensity profile을 그림 2에 나타내었다.

그림 2(a)는 터타늄 내부확산방식에 의한 광도파로이고 (b)는 양자확산방식에 의한 광도파로이다. 그림에서 보는 바와 같이 (a)는 심한 비대칭형이고 (b)는 거의 완벽한 대칭형이다. 이러한 효과를 바탕으로 양자교환 시간, SiO<sub>2</sub>클래딩의 폭 및 양자확산 시간을 조절하여 광도파로의 도파모드 특성(모양, 크기)을 조절하여 다양한 특성의 광도파로의 제작이 가능하다. SiO<sub>2</sub> 클래딩을 이용하는 제작공정은 기재재료가 감광용 공원을 투과시킬 수 있으면 자기정렬된 패턴의 제작이 가능하므로 현재 널리 사용되고 있는 유리를 기반으로 사용하는 이온교환 광도파로 제작에 그대로 활용할 수 있다.

양자교환 및 양자확산된 LiNbO<sub>3</sub> 단결정의 특성을 적외선 투과 스펙트럼 분석(Infrared Transmission Spectroscopy)으로 관찰하였다[5]. 양자교환은 150°C에서 1, 9 시간 및 250°C에서 1시간 동안 하였다. 양자확산은 400°C에서 1시간 동안 양자교환을 150°C, 1 시간 동안 한 것만 15분, 나머지는 60분 동안 하였고 각각의 경우에 대해 SiO<sub>2</sub>클래딩이 없는 것과 있는 것을 준비하였다. 측정결과를 그림 3과 표 1에 나타내었다. 흡수 스펙트럼은 파장 3500 cm<sup>-1</sup> 부근에 나타나는 데 이는 결정 내부에서의 O-H 결합의 양에 비례하는 관계를 갖는다. 따라서 흡수율이 높으면 양자교환된 양이 많은 것으로 해석이 가능하다. 그러나 이러한 관계는 그렇게 단순하지 않다. 왜냐하면 양자교환을 하면 표면 근처에서는 반응이 심하게 이루어지므로 교환된 양자뿐 아니라 LiNbO<sub>3</sub> 격자 틈 사이에 끼어 있던 양자에 의해 파장에 따른 흡수율의 범위가 넓어지는 양상을 나타내기 때문이다. 또 리튬이온과 양자의 교환율이 15% 이상되면 서서히 결정구조가 바뀌기 시작한다. 이는 바람직하지 못한 결과로 종래에 양자교환 광도파로의 특성이 나쁜 이유도 이 때문이다. 양자교환 후 열처리하거나 안식향산 용액속에서 리튬이온을 넣어 완충시켜 반응을 완충시키는 방법이 특성을 향상시키는 이유도 결정구조의 변화를 줄여 주기 때문이다. 따라서 가장 이상적인 방법은 양자교

관율을 낮추고 길이 방향으로 양자를 고르게 분포시켜서 결정구조의 변형을 최소화하는 것이다. 표 1에서 보면 양자확산 후가 확산 전보다 그리고 SiO<sub>2</sub> 클래딩을 형성한 샘플이 클래딩이 없는 것에 비해 전반적으로 흡수율이 높은 것을 알 수 있다. 이것은 SiO<sub>2</sub>클래딩을 형성한 후의 양자확산이 탄성한계 이내에서 변형된 격자를 다시 회복시키고 양자의 내부확산을 증진시켜 얻어진 결과이다. SiO<sub>2</sub> 클래딩이 없는 경우는 150 °C에서 9 시간 동안 양자교환한 샘플을 제외하면 흡수율의 변화가 별로 없다. 따라서 단순한 양자확산은 양자의 보존능력이 약하고 표면근처에서 국립된 양자는 외부로 확산된다는 것을 알 수 있다.

### III. 결 론

자기정렬된 SiO<sub>2</sub> 클래딩 구조를 갖는 양자 확산 LiNbO<sub>3</sub>광도파로의 특성을 측정하였다. 길이방향 모드의 세기분포(intensity profile)와 적외선 투과 스펙트럼 분석으로 측정하여 양자확산에서 SiO<sub>2</sub>클래딩에 의한 효과를 관찰하였다. 측정결과 광도파로의 길이방향 모드의 세기분포는 대칭형이고 SiO<sub>2</sub>클래딩 구조를 갖는 양자확산 광도파로가 결정구조의 변형이 적어서 구조적으로 성능이 우수함을 보였다.

### References

1. J. L. Jackel, C. E. Rice, and J. J. Veselka, "Composition control in proton exchanged LiNbO<sub>3</sub>," *Electron. Lett.*, **19**, pp.387-389, 1983.
2. A. Loni, R. M. De La Rue, "Very low-loss proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides with a substantially restored electro-optic effect," in *Proc. Top. Meet. Integrated and Guided Wave Optics*, Santa Fe, New Mexico, Mar. 28-30, 1988, paper MD3.
3. P. G. Suchoski, T. K. Findakly, and F. J. Leonberger, "Stable low-loss proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguide devices with no electro-optic degradation," *Opt. Lett.*, **13**, pp.1050-1052, 1988.
4. 손영성, 김중성, 신상영, "자기정렬된 SiO<sub>2</sub> 클래딩을 이용한 LiNbO<sub>3</sub>광도파로의 제작," 제 4회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, pp.222-224, 1989.2.
5. C. Canali, A. Canera, G. DellaMea, P. Mazzoldi, S. M. Alshukri, A. C. G. Nutt, and R. M. De La Rue, "Structural characterization of proton exchanged LiNbO<sub>3</sub> optical Waveguides," *J. Appl. Phys.*, **59**, pp.2643-2649, 1986.

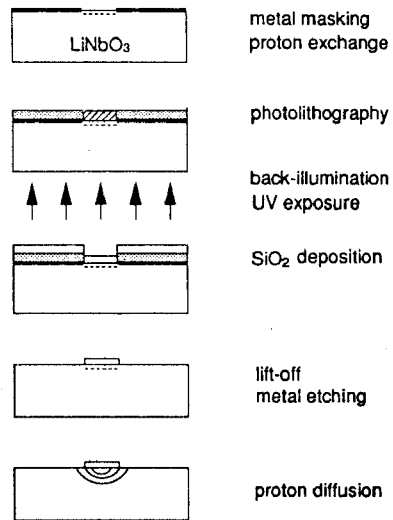
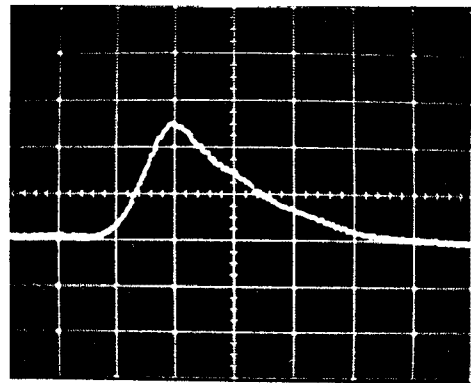
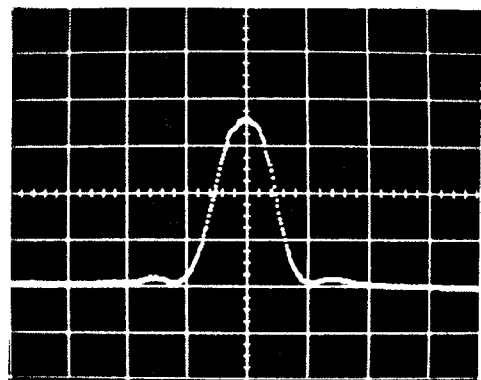


Fig.1 Fabrication procedure of proton-diffused LiNbO<sub>3</sub> waveguides with self-aligned SiO<sub>2</sub>-cladding



(a)



(b)

Fig.2 Mode intensity profile in depth direction

(a) Ti indiffusion

(b) Proton diffusion with SiO<sub>2</sub>-cladding

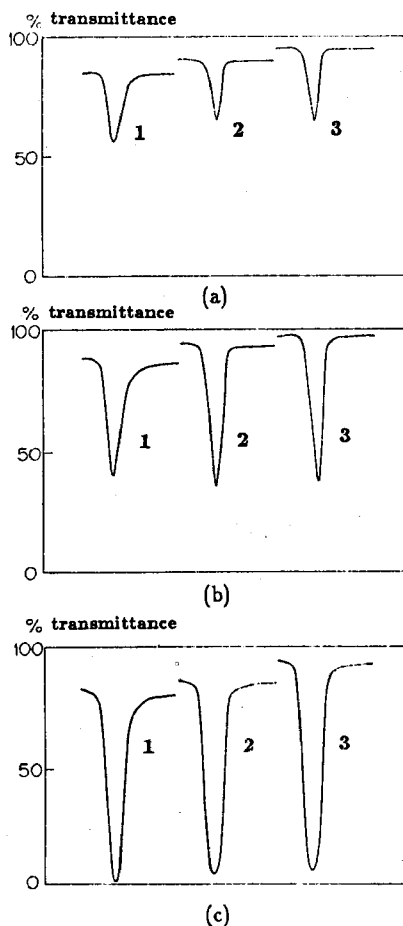


Fig.3 Infrared transmission spectra

Numbers 1, 2, and 3 in each figure denote the following :

1. PE only
2. PE ; PD without cladding
3. PE ; PD with cladding

(a) PE 1h,150°C ; PD 15min,400°C

(b) PE 9h,150°C ; PD 60min,400°C

(c) PE 1h,250°C ; PD 60min,400°C

Table 1 Infrared absorption for proton exchange rate

| Sample          | Absorption (%) | Peak wavelength(cm <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|----------------|------------------------------------|
| PE(1h,150°C)    | 29             | 3496                               |
| PD(15min,400°C) | 26             | 3480                               |
| with cladding   | 32             | 3482                               |
| PE(9h,150°C)    | 48             | 3498                               |
| PD(60min,400°C) | 60             | 3484                               |
| with cladding   | 62             | 3484                               |
| PE(1h,250°C)    | 82             | 3501                               |
| PD(60min,400°C) | 81             | 3498                               |
| with cladding   | 88             | 3497                               |