

광 변조기 제작을 위한 양자 확산 및 자기정렬 방식에 관한 연구

A study of proton diffusion and self-aligned method for optical modulator fabricatio

강기성*, 채기병**, 소대화***

(Ki-Sung Kang, Kee-Byung Chae, Dae-Wha Soh)

요 약

본 연구에서는 단일 광 변조기를 양자교환과 자기정렬 방식을 이용하여 X-cut LiNbO₃ 기판에 제작하였다. 여기에서 어닐링 처리 효과는 단일 광 변조기에서 도파로의 굴절을 변화 특성을 나타냈으며, 특히 어닐링 처리 시간의 조절에 의해서 단일 광 도파로가 광범위하게 변화된다는 것을 알았다. 이것을 기초로 하여 광 변조기는 어닐링 공정 및 자기 정렬방식에 의한 최적화와 간단화를 제작 공정에 응용 할 수 있었다.

Abstract

In this paper, a single optical modulator which is fabricated on X-cut LiNbO₃ substrate by using proton exchange method and self-aligned method described. It is well known that the annealing effect characterize by index change of the single optical modulator. As a results, it is found that the single optical waveguide varied widely with controlling annealing time. Based on the fact, the annealing process was used to optimize the fabrication of the single optical modulator. On the other hand, the self-aligned method was to provide another performance improvement because it reduced the fabrication process.

* : 상지 전문대학 전임강사

** : 명지대학교 전자공학과

***: 명지대학교 전자공학과

1. 서론

차세대의 반도체 레이저 및 광전자 공학의 핵심 소자에 대한 연구가 70년대 이후 기초 연구로 수행되면서, 빛의 양에 따라 출력 광의 상태가 Digital화 되므로써 고속 광신호의 전달에 한계성을 극복하기 위한 노력이 계속 진행되고 있다.

따라서 90년대 중반 이후는 정보 통신 기

술이 광 전자 공학 기술에 근거한 고속화, 대량화에 따른 고속 광신호의 전달 수단으로 photo diode를 이용한 광신호의 전기적 신호 변환, 그리고 laser diode를 이용한 광신호의 변환등 광범위한 주파수대역 및 광 신호의 특유한 장점들이 광 소자 및 집적회로와 광 시스템 개발로써 구현되게 되어지고 있다.

또한 laser diode를 이용한 광 신호의 재현의 단계를 거치는 방법과 광 스위치를 이용

한 스위칭 방법등이 있어, 이들 경우를 비교해보면 신호의 변환 과정이 필요없는 광 스위치를 이용한 직접적인 스위칭이 유리함을 알 수 있다.¹⁾ 집적 광학 소자를 만들기 위해서는 광파의 전계에 대한 영향을 나타내는 전기 광학 상수(electro-optic coefficient)가 큰 물질이 유리하다. 따라서 uniaxial ferroelectric crystal인 리튬나이오베이트(LiNbO₃)는 이러한 조건을 만족시키며 도파 손실이 낮은 광 도파로를 만들기에 적합하다. LiNbO₃ 기판위에 단일 광도파로를 만들고 전극을 통하여 전계를 인가하면 전기 광학 효과에 의해서 광 도파로의 굴절률에 변화를 줄 수 있다.²⁾ 광 변조기는 이러한 굴절률 변화를 이용하여 입력 광을 변조(modulation) 또는 스위칭 시킬 수 있으며, 방향성 결합(directional coupling) 현상을 이용한 광 스위치, intersecting waveguides 형(x-type) 광 스위치,³⁾ 그리고 마하젠더 간섭계형 변조기(mach-zehnder interferometric modulator)⁴⁾ 등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다. 본 논문에서는 양자교환(proton exchange) 방법에 의해 광 도파로가 형성되는 과정에서 어닐링 효과와 자기 정렬 전극(self aligned electrode)을 이용한 X-cut LiNbO₃ 기판위에 제작된 단일 광 변조기에 대하여 연구 하였다.

2. 실험 방법

2-1. 양자 교환

LiNbO₃ 기판위의 굴절률을 증가시켜서 손실이 적은 광도파로를 만드는 방법으로는 그림 1)에서와 같이 타이타늄 내부 확산(titanium indiffusion)과 그림 2)에서 양자교환(proton exchange) 공정을 대표적으로 들 수 있다.⁵⁾ Titanium-indiffusion 공정은 광 도파로를 만들려는 부분에 Ti를 필름 형식으로 올려두고 고온에서 수시간 동안 표면 확산 시키면 깊이 방향으로 확산되어 들어간다. 따라서 굴절률이 증가되고 광 도파로가 형성하게 된다.⁶⁾ 이때 Ti 두께와 폭, 내부 확산 시간과 온도, 그리고 확산시키는 방향에 따라 광 도파로의 굴절률 분포가 결정 된다. 양자교환 공정은 LiNbO₃ 기판위에 광 도파로를 만들려는 부분만 열려있도록 금속 마스크를 만들고, 다음 LiNbO₃ 기판을 산이나 수화물 속에 담궈서 가열하면 LiNbO₃의 Li⁺ 이온과 산이나 수화물에서 공급되는 H⁺ 이온이 양자 교환을 일으키게 되고 반응이 일어난 표면의 굴절률이 증가

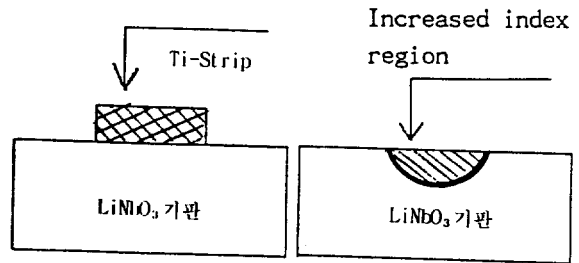


그림 1. Ti 내부 확산 방법
Fig. 1. Titanium-indiffusion method.

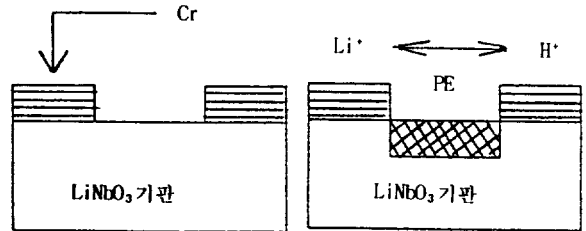


그림 2. 양자교환
Fig. 2. Proton exchange.

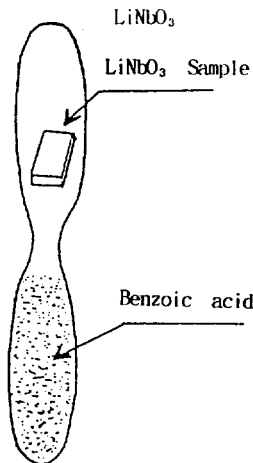
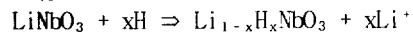


그림 3. 양자교환을 위한 Ampoule
Fig. 3. Ampoule for proton exchange.

하게 된다. 양자 교환의 화학 반응식은 다음과 같다.



본 실험에서는 benzoic-acid 를 사용하였으며 양자교환을 위해 필요한 온도는 150°C 에서 250°C 이하 이다.

2-2 양자 교환 및 폴리싱, 어닐링

양자교환에 필요한 Ampoule을 제작하기 위하여 내경이 10mm인 pyrex tube를 torch로 가공하여 LiNbO₃ 시편과 벤젠산(C₆H₅COOH)을 넣어서 아래 그림 3)과 같이 가공한다. Ampoule을 150℃ 전기로속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 Ampoule을 뒤집어서 40 - 60분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자교환이 일어난다. 그 다음 Ampoule을 식힌후 LiNbO₃ 시편을 꺼내어 입 출력단의 단면을 사포(*1500)로 갈아낸후 약 0.3μm 입자 굵기를 갖는 polishing pad에 갈아서 깨끗하게 만든다. 표면에 밀집 되어있는 양자(H⁺)들을 깊이 방향으로 확산하기 위하여 어닐링을 한후, 형성된 광 도파로의 굴절률 분포를 결정하게 된다.

2-3 자기 정열방식을 이용한 LiNbO₃ 기판의 Patterning

Diamond saw를 이용하여 시편을 10 x 6mm 정도 되게 자른후 TCE, Acetone 및 Methanol에 순차적으로 담귀서 끓이고 표면을 면봉으로 닦아 내었다. 그리고 sputter를 이용하여 100Å 정도의 Cr을 코팅 한후 양자 교환이 이루어질 도파로를 형성 하기위하여 PR 작업을 거친후 레이저 리소그래픽 방식으로 도파로 부분의 PR을 제거한후 Cr-7(Cr etchant)을 이용하여 광 도파로를 그림 4)와 같이 patterning 하였다. 본 실험에서 이용한 자기정열방식은 기존의 방식과는 달리 도파로 형성을 위한 마스크 제작과정이 필요없다. 양자교환을 하기위하여 이용된 Cr 패턴을 직접 전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 align 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극형성과정의 단점은 도파로의 edge 부분이 정확히 align 되지않으므로 전체의 효율이 아주적게 나타났다. 그러나 자기정열 방식은 이러한 align 과정이 요구되지않으므로 전극으로 이용되는 Cr이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높이는데 매우 적절한 방식이다.

2-4 Image Reversal 공정

양자교환 및 양자확산을 하기 위하여 자기정열방식을 Cr패턴 전극으로 이용하므로써 전체효율이 적게 나타났다. 따라서, 본 실험에서 자기 정열방식으로 Cr이 광 도파로와

최대로 밀착되어 전체의 효율을 높여주었으며, 도전성의 향상을 위하여 Cr전극위에 Au를 코팅하는 Image Reversal 공정을 수행하였다. Cr전극 위에 Au를 올리기 위한 Image Reversal 공정방식은 LiNbO₃기판이 투명하므로 Back Illumination방식을 이용하여 Cr위에 Au로 sputtering 한후 Lift-off하는 공정방법으로 전극을 형성하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Annealing의 효과

광 도파로의 최종적인 굴절률 분포는 공정의 마지막 단계인 열처리(annealing)를 이용하여 넓은 범위에서 조절 할수있다. 어닐링처리를 수행함으로써 H⁺가 깊이 방향과 좌우로 확산되면, 이에 따라 광 도파로가 넓어지

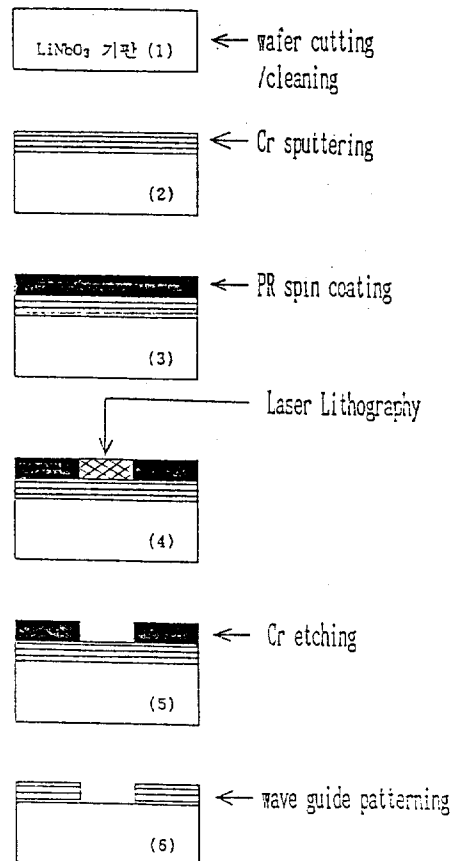


그림 4. 양자교환을 위한 광 도파로 patterning 제작 공정
Fig. 4. Fabrication process of optical waveguide for proton exchange.

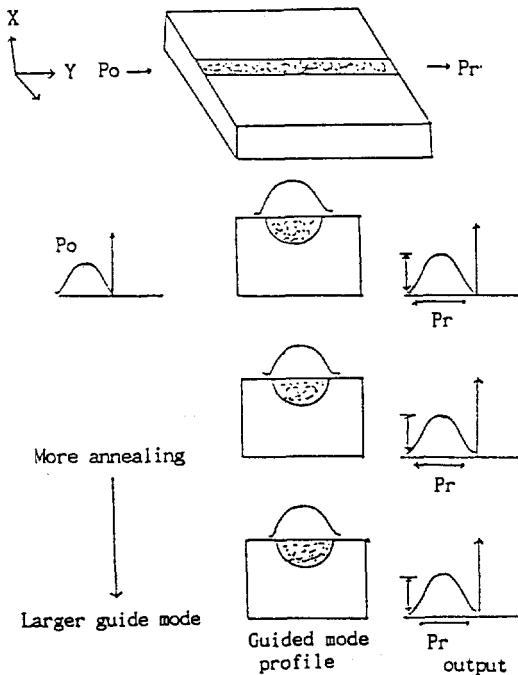


그림 5. 단일 광 변조기의 어닐링 효과
 Fig. 5. Annealing effect of single optical modulator.

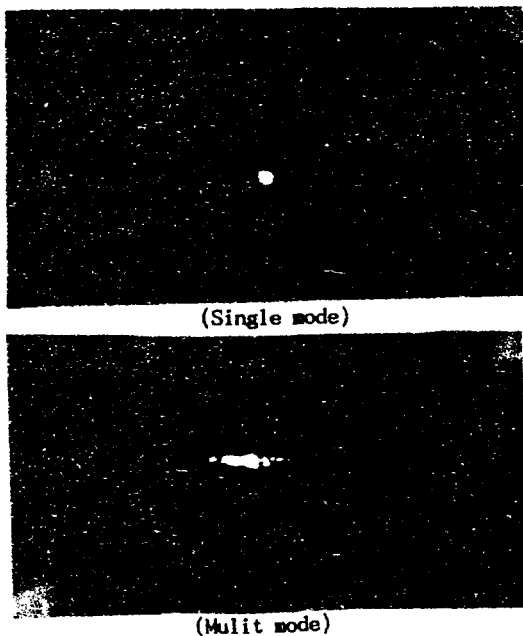


그림 6. 어닐링 시간에 의한 단일/다중 모드
 의 출력 형태
 Fig. 6. Output patterns of single/multi
 mode by annealing time.

광 변조기 제작을 위한 양자 확산 및 자기
 정렬 방식에 관한 연구

면서 도파로에 존재하는 모드도 또한 변하게 된다. 이로인해 광 파워 (transferred optical power)가 증가 하게 된다. 그림 5)는 단일 광 변조기에서의 어닐링 효과를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 단일 광 도파로를 제작 및 설계하기 위하여 simulation한 결과⁸⁾ 도파로 폭이 $4\mu\text{m}$ 일때 on-off 현상이 나타남을 알 수 있었다. 이러한 simulation 결과를 이용하여 단일 광 변조기를 제작한 결과 어닐링 시간에 따라 광 도파로의 굴절을 분포가 변화됨에 따라 single mode와 multi mode가 나타난 것을 그림 6)에 표시 하였다.

3-2 단일 광 도파로의 특성 측정

Annealing에 의해 도파로가 넓어지면 도파 모드가 커지는 현상을 살펴 보기위해 LiNbO_3 시편위에 전극을 올리지 않은 상태에서 어닐링 시간에 의해 도파 모드의 변화를 조사하였다.⁷⁾ 그림 6)은 광 도파로의 폭이 $4\mu\text{m}$ 인 것으로 어닐링 처리시간에 따라서 도파 광의 출력이 변화하는 것을 나타낸 것이다. 제작된 LiNbO_3 시편 중 3개를 선택하여 어닐링 시간을 30 - 260분으로 순차적으로 변화시켰을때의 단일 도파로에서의 Transferred Power ratio를 측정 한 값을 표1)에 작성 하였고, 이 값을 5차 다항식으로 처리하여 곡선화 하였다. 그림 7)에서 어닐링을 수행함으로써 시간에 따라서 출력이 증가하다 떨어지는 것을 볼 수 있다. 여기에서 각각 3개의 단일 광 도파로에 대해서 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 출력이 99%까지 증가 하다가 감소하는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 어닐링 처리시간에 의하여 양자 밀도 변화에 따른 도파로 굴절율변화와 광 도파로 폭의 변화로 인한 위상 부정합(phase mismatch)에 기인된 때문이다.⁸⁾

일반적으로 광 변조기의 전극은 광 도파로를 완전히 제작한후에 전계의 효율을 고려하여 적당한 위치에 정렬하여 만들게 된다. 이 경우 수 μm 의 폭과 수 mm의 길이를 갖는 전극을 정확한 위치에 만들기가 매우 어려우며 이러한 현상에 의해 전계의 효율도 감소 한다. 따라서 이러한 문제점을 보완 하기위하여 본 실험에서는 반복되어지는 마스크 정렬 작업을 하지않고 양자 교환을 하기위하여 사용한 Cr을 자기 정렬전극으로 이용 하였으며 image reversal 공정을 통하여 Cr 위에 Au를 증착하여 전극을 형성 하였다. 자기정렬로 제작된 전극은 광 도파로와 최대한으로 밀착

표 1. 어닐링 효과의 데이터

Table 1. The effect of annealing on data.

(시편 1)	annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
	Pr(%)	0.5	0.7	1.2	1.5	1.7	2.0	3.5	7.5
	annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
	Pr(%)	8.9	9.5	10.2	11.5	12.3	15.0	17.0	17.8
(시편 2)	annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
	Pr(%)	20.5	25.5	30.7	39.2	50.2	45.2	43.8	40.4
	annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
	Pr(%)	1.2	1.7	2.0	4.8	7.5	9.72	10.8	12.5
(시편 3)	annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
	Pr(%)	13.8	14.5	25.2	27.2	30.5	39.5	40.5	50.2
	annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
	Pr(%)	62.8	72.7	80.2	99.8	97.6	99.5	96.9	95.4
(시편 3)	annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
	Pr(%)	0.7	0.9	1.0	1.9	1.4	5.0	7.4	11.0
	annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
	Pr(%)	18.7	22.7	40.2	53.1	62.8	72.3	84.0	53.0
(시편 3)	annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
	Pr(%)	97.6	99.5	98.7	93.1	80.6	70.0	30.0	28.4

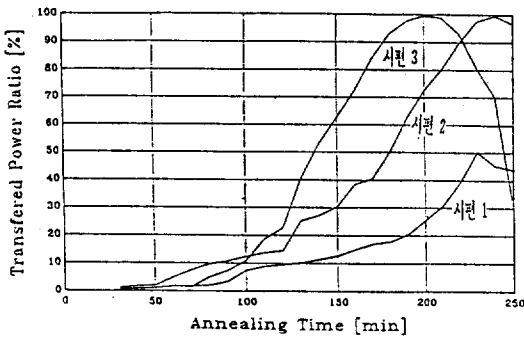


그림 7. 전달전력비에 따른 어닐링 효과
Fig. 7. The effect of annealing on transferred power.

되므로 전계의 효율 면에서도 상당히 높게 나타나게 된다. 자기 정렬 방식으로 전극을 형성하여 방향성 결합기나, 마하 켄더 간섭 계형 변조기, X-switch형 변조기에 적용하면 crosstalk을 줄이는 방법으로 매우 큰 효과가 있을 것으로 기대 된다.

그림 8) α -step은 제작되어진 광 도파로의 도파로 형성 과정과 확산깊이를 확인하기 위

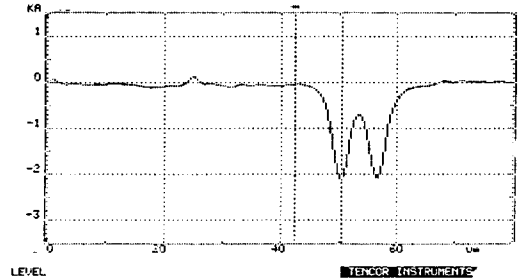


그림 8. α -step을 이용한 도파로 깊이
Fig. 8. Waveguide depth profile using α -step.

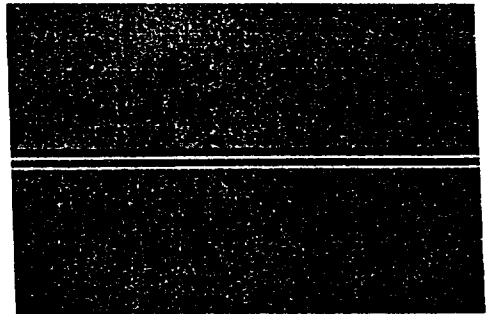


그림 9. 도파로의 사진(X750)
Fig. 9. Picture of waveguide(X750)

하여 α -step으로 확인 한 결과 양자교환에 의한 양자확산 되어진 확산깊이를 확인 하였다. 또한 그림 8)에서 채널폭이 4 μ m 정도를 형성된 것을 확인 할 수 있다. 양자확산공정에 의해 제작되어진 광 도파로에 전극을 형성하여 인가전압($V\pi$)을 8V를 가했을때 2 주기 다중위상변조 상태가 나타났다. 그림 9)에서는 양자확산된 광 도파로의 폭이 4 μ m



그림 10. 단일 광 변조기의 다중모드 출력 상태
Fig. 10. Multi mode output of single optical modulator.

참고 문헌

인 그림으로 균일하게 도파로가 형성된 것을 볼수있다.

그림 10)은 단일 광 변조기의 출력 모드를 투명막(screen)에 비춰서 찍은 사진이다. 어닐링 시간에 의해서 광 도파로의 폭이 변함으로써 출력 광의 형태가 단일 모드에서 다중 모드로 변하는것을 알 수 있다. 어닐링에 의한 도파로 폭 조절은 정확한 온도와 시간을 제어하는 것으로 이루어질수 있는데 전기로내에서의 온도와 시간 조절은 비교적 잘되지만, 시편을 넣고 꺼내는 과정에서 온도의 변화 속도가 굴절율의 변화 및 폭에 미치는 영향에 대해서는 조사하기 어려웠다.

4. 결 론

본 실험에서는 X-cut LiNbO₃ 기판으로 자기 정렬 방식을 적용하여 양자 교환 공정을 이용한 단일 광 도파로를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 어닐링 시간에 의해 광 도파로의 특성에 영향을 미치며, 이에 따라 굴절율과 출력이 변화 하였으며, 단일 모드로부터 멀티 모드로 변화되는것을 확인 하였다.

2) 자기 정렬 방법을 제작공정에 적용함으로써 기존방식에 비하여 마스크 공정을 줄일 수 있으므로 간단화된 공정방식을 채택 하였다.

3) 자기 정렬 방식으로 제작된 전극은 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전극과 전계의 효율을 최적화 하였다.

4) 양자교환을 한후 양자확산을 함으로써 매우 적은 광손실을 갖고 양자 밀도의 변화에 따른 도파로 굴절율 변화를 조절할 수 있다.

따라서, LiNbO₃ 기판을 이용한 방향성 결합기, 마하젠더 간섭계형 변조기 및 X-Switch 형 광 변조기 등의 제작에 응용함으로써 공정 과정과 전극의 정렬 과정을 더욱 효율적이며 간단하게 제작할수 있을것으로 기대 된다.

1. L. Mccaughan, "Low-loss Polarization-independent electrooptical switches at $\lambda = 1.3$ micron, " J. Lightwave Technol., Vol LT-2, PP. 51-52, 1984
2. A. L. Dawar, S. M. Al-shukri, and R. M. De La Rue, "Guided-wave acoustooptic interaction in proton-exchanged Y-cut LiNbO₃, " Appl. Phys. Lett., Vol. 48, pp. 1579-1581, 1986
3. Lar Thylem, "Integrated optics in LiNbO₃ :Recent developments in devices for telecommunications" J Lightwave Technol., Vol, 6, pp, 847-861, 1988.
4. V. Ramaswamy, M. D. Divino, and R. D. standly, "Balanced bridge modulator switch using Ti-diffused LiNbO₃ strip waveguide, "Appl Phys, Lett., Vol, 32, pp, 664-646, 1978.
5. R. V. schmidt and I-P. Kaminow, "Metal diffused optical waveguie in LiNbO₃, " Appl. Phys, Lett, Vol 25, pp, 458-460, 1974.
6. Neyer, W. Mevemkamp, L. Thylem, and B. Lagers-tram, "A beam propagation method analysis of active and passive waveguide crossing, " J. lightwave Technol., +Vol LT-3 pp, 635-642, 1985.
7. 강기성, 박정철, 장용용, 소대화: "X-스위치 광 도파로의 이론적 해석", 한국통신 학회 학술 발표회 논문집 Vol. 10, No. 2 pp. 296-302, 1991.
8. 소대화, 강기성, 채기병, 장용용: "X-스위치 광 변조기의 설계 및 분석", 한국 전기 전자 재료 학회 논문집, Vol. 4권 3호, pp 249-258, 1991.

(1992년 6월 29일 접수)