

## LiNbO<sub>3</sub> 광 도파로의 전계분포 및 설계에 관한 연구

### A Study on the electric field distribution of design of LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide

강기성\*, 소대화\*\*

Ki Seong Kang\*, Dea Wha Soh\*\*

#### Abstract

BPM simulation was used in order to fabricate the LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide with optical source of He-Ne laser ( $\lambda=0.6328[\mu\text{m}]$ ). we observed electric field  $E_x$ ,  $E_y$  in the x,y-direction are simulated at the LiNbO<sub>3</sub> substrate ( $X1\ 55[\mu\text{m}]\times Z1\ 5000[\mu\text{m}]$ ), where the depth, width and buffer layer of waveguide are  $0.2[\mu\text{m}], 4[\mu\text{m}]$  and  $0.02[\mu\text{m}]$  respectively. By applying these parameters of single waveguide to simulate a X-switch, we have chosen index change of 0.002, width of  $3[\mu\text{m}]$  and angle of  $0.4^\circ\sim 0.6^\circ$  of optical waveguide and under these conditions, optical beam propagates cross-side at  $0.4^\circ$ . When applied switching voltage of 25[V], optical beam of X-switch turns cross-side to bar-side at intersection angle  $0.4^\circ$ , index change of 0.002, waveguide width of  $3[\mu\text{m}]$ , electrode gap  $2[\mu\text{m}]$ . By the above results, we can obtain design conditions of theoretical analysis of an X-switch optical waveguide.

**Key Words(중요용어):** LiNbO<sub>3</sub>, Waveguide,

#### 1. 서론

전기나 전파대신 레이저광을 이용하고자 하는 연구가 시작되면서 집적광학에 사용되는 재료로 유리(glass), 강 유전체(LiNbO<sub>3</sub>, LiTiO<sub>3</sub>) 및 반도체(GaAs, InP) 등이 널리 이용되고 있다. 현재 광 도파로 스위치 등 전기광학효과 (electrooptic effect) 영역에서는 LiNbO<sub>3</sub> 와 LiTiO<sub>3</sub> 단결정 이 주 재료로 이용되고있다. 광 손실과 변조 전압을 감소시키

며 대역폭을 향상시키기 위한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 He-Ne 레이저를 광원으로 하는 광 도파로를 BPM(Beam Propagation method) 프로그램으로 X-스위치 광 도파로 에서 광원의 전송 과정을 광 전계 등고선으로 표현하여 설명하였다. LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 설치한 평행한 두 전극에 전압을 인가한 상태에서 기판에 분포되는 전계를 기판의 깊이(y1), 전극 간격(electrode gap), 인가전압 및 버퍼층(SiO<sub>2</sub>)의 두께 등을 파라미터로 하여 x 방향 과 y 방향의 전계를 계산하였고, 각각의 파라미터를 이용하여 전압을 인가하지 않은 경우의 X-스위치 광 변조기에서 도파로 각도를 변화시켜 광 빔의 전송 과정을 관찰하였고, 여기서 얻은 결과를 이용하여 전압을 인가한 X-스위치 광 변조기를 모델링 하였

\* 강원도립대학 정보통신과

(주소: 강원도 강릉시 주문진읍 교항리 8-2  
E-mail : kskang@kangwonpu.ac.kr)

\*\*명지대학교 전기전자공학부

(E-mail : dwshoh@wh.myongji.ac.kr)

으며, 또한 전극 간격을 변화시켜 스위칭 현상을 실험하였다.

## II. 빔 전송방식 메카니즘

### 2-1. 광 도파로 및 X-스위치 광 변조기의 구조

광 스위치의 기본구조는 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 사용한 광 도파로 에서 기판의 굴절율( $n_s$ )보다 도파로에  $dn$  만큼 굴절을 변화를 주어 입사된 광원이 도파로 밖으로 복사(radiation)됨이 없이 진행 할 수 있게 만들어 준다.

X-스위치 광 변조기는 다중 모드를 도파시키는 TIR (Total Internal Reflection) 스위치에서 응용된 소자이다.<sup>[4]</sup> TIR-스위치는 도파로 폭이 수십 [ $\mu$ m] 로써 광 도파로에 입사된 광 빔이 다중 모드로 도파 되므로 전송하는 정보량이 많아짐에 따라 정보량의 처리한계를 극복하기 위하여 광 통신 시스템에서는 단일 모드를 변조시킬 수 있는 X-스위치 광 변조기가 더욱 필요하게 되었다. 그러나 단일 모드를 변조시킬 수 있는 X-스위치는 스위칭 하기가 어렵고 높은 변조 전압을 요구하는 것이 문제점으로 등장하고 있다. 단일모드 X-스위치 광 도파로의 구조를 그림 1 에 나타내었다.

TE<sub>00</sub>는 단일 모드이며, 점선 모드(TE<sub>01</sub>)는 두개의 모드를 갖는 다중 모드이다.  $\alpha$ 는 두 도파로의 각도이고, 두 도파로가 겹쳐지는 부분은  $2\Delta n$ 의 굴절을 갖는다. 도파되는 매질에서 전송 계수  $\beta$ 는

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \quad \text{또는,} \quad \beta = k_0 \Delta n \quad (1)$$

이며,  $\lambda$ 는 광원의 파장 그리고  $dn$ 은 도파로의 굴절을 변화이다. 두 도파로에서 출력되는 광<sup>[5]</sup>은

$$P_{(x)} = P_{(in)} \cos^2(\Delta \beta L/2) \quad (2)$$

$$P_{(y)} = P_{(in)} - P_{(x)} \quad (3)$$

$$L = w/\sin(\alpha/2) \quad (4)$$

이다. 여기서  $P_{(x)}$ 는 cross축으로 도파되는 광이며,  $P_{(y)}$ 는 bar축으로 도파되는 광이고,  $P_{(in)}$ 는 입력된 광이다. 그리고 cross 축으로 도파될 수 있는 파라미터 변수는 전계에 의한 굴절을 변화( $\Delta n$ )와 전달계수 변화( $\Delta \beta$ ), 두 도파로의 각도( $\alpha$ ), 교차길이(L) 그리고 도파로 폭(w)이다. 따라서 X-스위치 광 도파로에 전극을 형성하여 전압을 인가하면, 식(2)의  $\beta$ 가 변화므로 도파로가 겹쳐지는 2

$\Delta n$ 부분의 굴절율이 변화됨으로써 스위칭 작용이 발생한다.

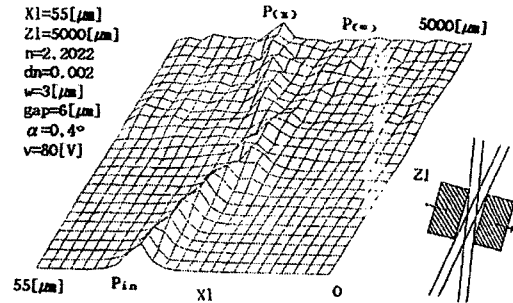


그림 1. 단일 모드 X-스위치 광 도파로의 구조

### 2-2. 빔 전송 방식 의 프로그램의 흐름도

BPM 이론<sup>[2]</sup>을 이용한 프로그램 구성은 다음과 같은 흐름도로써 그림 2 에 나타 내었다. 따라서 그림 2 과 같은 방법으로 구성된 프로그램을 이용하여 그래픽 하였다.

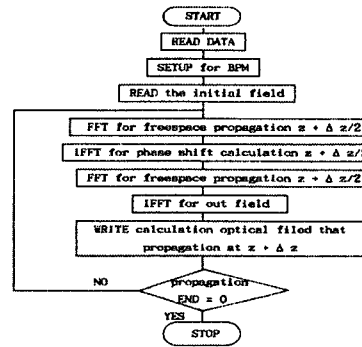


그림 2. 빔 전송방식 이론을 사용한 프로그램의 흐름도

## III. 결과 및 고찰

### 3-1. 광 도파로의 이론적 해석을 위한 시뮬레이션

BPM 이론을 이용한 광 도파로의 이론적 해석을 위한 시뮬레이션으로 LiNbO<sub>3</sub>기판에 도파로의 폭 4[ $\mu$ m], 기판의 굴절율( $n_s$ ) 2.2022, 광원의 파장 ( $\lambda=0.6328[\mu$ m]), 굴절을 변화  $dn=0.001$ 로 지정하였을 때, 도파된 최대 모드 수  $s$ 가 단일 모드에 만

족하므로 광이 도파로의 외부로 복사됨이 없이 전송되는 시뮬레이션 결과를 그림3 (a)에 나타내었다. 동일한 파라미터에서  $dn=0.01$ 일 경우는 전송되는 광의 일부가 도파로 밖으로 복사되어 손실이 발생하는 결과를 그림3 (b)에 나타내었다. 여기서  $n_s$ 는  $\text{LiNbO}_3$  기판의 굴절율이며,  $dn$ 은 Ti가 열확산된 도파로의 굴절율 변화,  $w$ 는 도파로의 폭,  $l$ 은 도파로의 길이 그리고  $X1$ 은 기판 폭을 나타낸다. 위의 결과로부터 단일 모드조건은 도파로의 폭과 도파로의 굴절율 변화와의 상호관계가 있으며, 최대 모드수  $s$ 에 따라서 도파로의 단일 모드와 다중모드 조건이 형성됨을 확인할 수 있다.

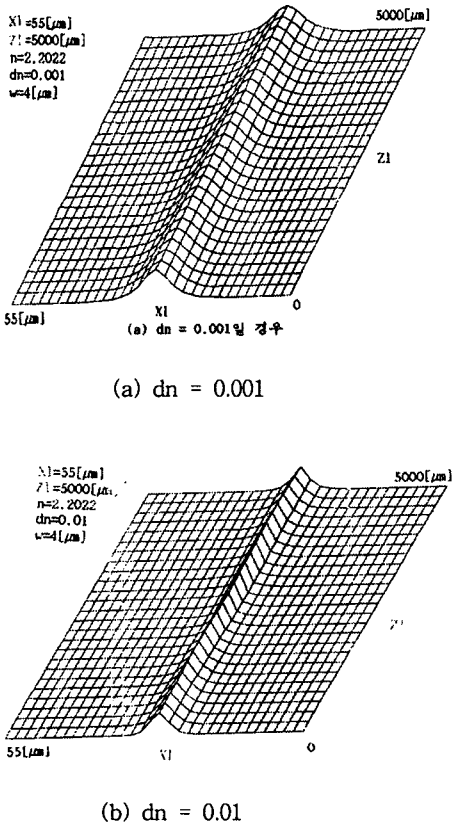
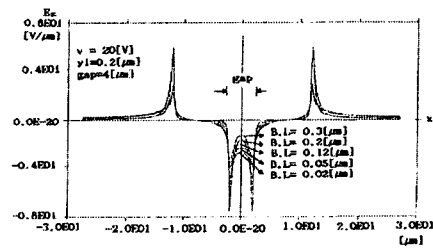


그림3. BPM 알고리즘에 의한 광 도파로의 시뮬레이션

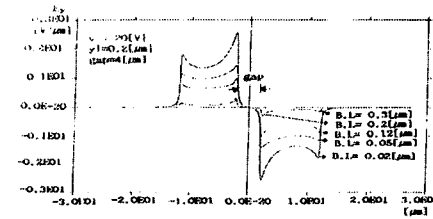
### 3-2. 광 도파로의 전계분포

전기 광학 효과를 이용하는 집적광학 소자의 시뮬레이션을 위해서는 전극 구조에 의한 기판 내부의 전계 분포 계산을 필요로 한다. 따라서 인가 전압 20[V], 기판의 계산 깊이를  $0.2[\mu\text{m}]$ , 그리고 전

극 간격을  $4[\mu\text{m}]$ 로 한 조건에서 버퍼층 두께를 각각 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2,  $0.3[\mu\text{m}]$ 로 변화시켜 시뮬레이션 한 결과 버퍼층 두께가  $0.02[\mu\text{m}]$ 보다 작은 두께에서는 프로그램의 한계로 계산할 수 없었고, 버퍼층 두께가 얇은  $0.02[\mu\text{m}]$ 에서 x, y 방향 전계가 가장 크게 분포됨을 알 수 있으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 B.L은 버퍼층의 두께를 나타낸다.



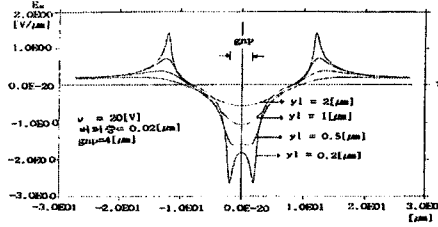
(a)  $E_x$  분포



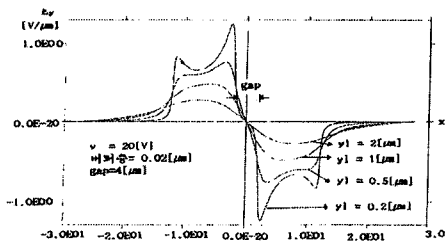
(b)  $E_y$  분포

그림 4. 버퍼층의 두께 변화에 의한 전계 분포

그림 5은 기판의 도파로층의 깊이변화에 따른 전계 분포를 시뮬레이션 하였다. 인가전압은 20[V]이고, 전극 간격은  $4[\mu\text{m}]$ 로 하였으며, 버퍼층의 두께  $0.02[\mu\text{m}]$ 인 조건에서 깊이를 각각 0.2, 0.5, 1,  $2[\mu\text{m}]$ 로 계산하여 도시한 결과 깊이가 얇을수록 전계 분포가 크며  $0.2[\mu\text{m}]$ 에서 가장 강한 전계 분포가 형성됨을 확인하였다.



(a)  $E_x$  분포



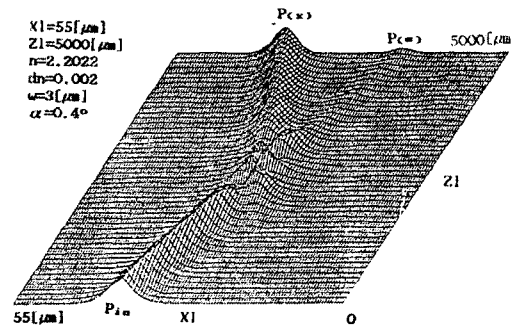
(b)  $E_y$  분포

그림 5. 기관의 깊이 변화에 따른 전기 분포

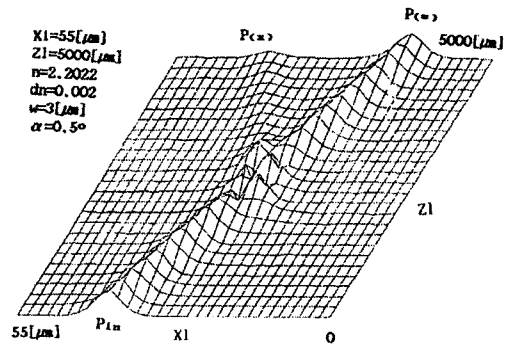
### 3-3. X-스위치 광 도파로의 이론적 해석을 위한 시뮬레이션

X-스위치 광도파로는 그림 1 와 같은 구조를 갖는 광 변조기의 일종으로써 X-스위치의 교차각 ( $\alpha$ ) 과 인가전압( $v$ )에 의하여 입사 광파의 진행 방향을 도파로의 교차점에서 전환시킬 수 있도록 구성한 광소자이다.<sup>[5]</sup> 이 절에서는 X-스위치의 교차된 두 도파로를 만족하는 각 변수에 의해서 광파의 진행과정이 어떻게 결정되는지를 규명하여 X-스위치의 최적 설계조건을 얻고자 한다. 단일 도파로 에서는 도파로 폭을  $4[\mu\text{m}]$ , 도파로의 굴절을 변화량  $dn=0.001$ 을 기본조건으로 하여 실험하였으나, X-스위치 광 도파로 에서는 광 손실을 줄이고 변조 전압을 작게 하며 아울러 Ti 농도의 조절<sup>[6]</sup>을 고려하여 도파로 폭을  $3[\mu\text{m}]$ , 굴절을 변화량을  $dn=0.002$ 로 하여 시뮬레이션 하였다. 따라서  $\text{LiNbO}_3$ 기관의 X-스위치 광 도파로에 입사된 광 파의 모드 분포를  $0.002/\cosh^2(2x/w)$ 에 의하여 결정한 다음 빔 전송방식 메카니즘에 적용하여 전압을 인가하지 않은 X-스위치 광 도파로에 입사시킬 경우, 식(1)~(4)에 의하여 도파로 각도와 도파로의 굴절을 변화에 의한 광 의 전송 방향이

cross 측 혹은 bar 측으로 전환되는 현상을 다음과 같은 조건에서 실험하였다. 즉  $dn=0.002$ , 도파로 폭  $3[\mu\text{m}]$  그리고  $\alpha=0.4^\circ$  일 때의 실험 결과는 광 빔이 cross 측으로 출력되었으며, 그림 6(a)에 나타내었다. 같은 조건에서  $\alpha=0.5^\circ$ 로 설계된 경우는 교차각( $\alpha$ )의 조건으로 인하여 입사된 빔이 bar 측으로 출력되었고, 그 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. 따라서 도파로의 교차각( $\alpha$ )이 스위칭 변수로 작용됨이 확인되었다.



(a)  $dn=0.002$ ,  $\alpha=0.4^\circ$ 일 경우

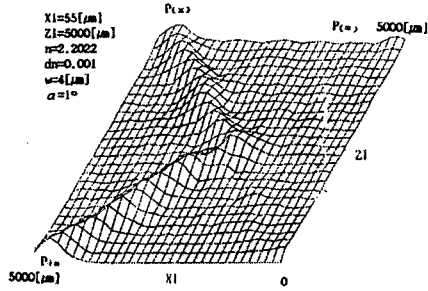


(b)  $dn=0.002$ ,  $\alpha=0.5^\circ$ 일 경우

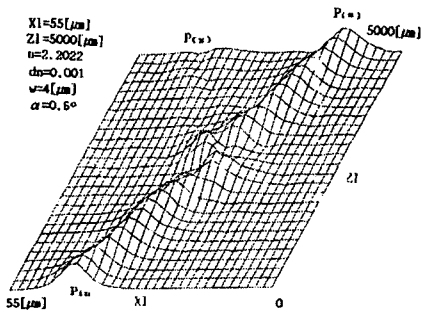
그림 6. 교차각( $\alpha$ )에 따른 X-스위치 실험결과 ( $v = 0$ )

그림 7는  $X1(55[\mu\text{m}]) \times Z1(5000[\mu\text{m}])$ 인 X-스위치 광 도파로에서 전압을 인가하지 않은 경우의 결과로써, 식(2)을 적용하여 도파로의 굴절을 변화  $dn=0.001$ , 도파로 폭  $w=4[\mu\text{m}]$ 로 하였을때 광의 진행방향이 그림 6 에 비하여 큰 교차각  $\alpha=1^\circ$ 에서 cross측으로 출력되는 경우를 나타낸 것이다. 그러

나 같은 조건에서  $\alpha=0.6^\circ$ 에서는 광이 bar 측으로 출력되는 것을 그림 7(b)에 나타내었다.



(a)  $dn=0.001$ ,  $\alpha=1^\circ$ 일 경우

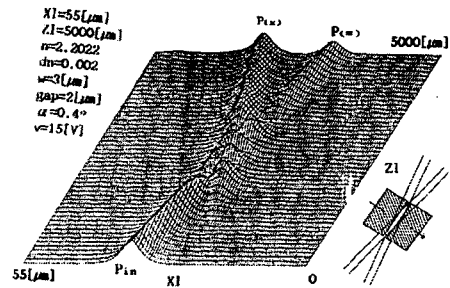


(b)  $dn=0.001$ ,  $\alpha=0.6^\circ$ 일 경우

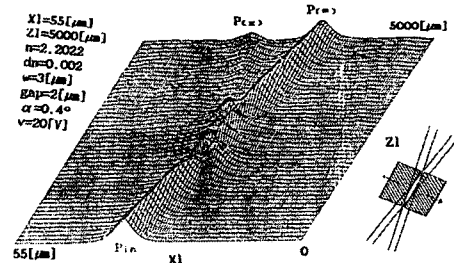
그림 7. 굴절을 변화와 교차각 변화에 따른 X-스위치 실험결과( $v=0[V]$ )

앞에서 논의된 내용은 전압을 인가하지 않은 상태에서 단일 모드를 만족하는 도파로의 폭과 교차각을 변화시켜 광파의 진행이 cross 측 또는 bar 측으로 전송됨을 고찰하였다. 여기서는 앞에서 얻어진 조건들로부터 전극 간격과 전압에 따른 광파의 스위칭 현상을 고찰하고자 한다.<sup>[7]</sup> X-스위치 구조에서 전극 간격과 인가전압에 따른 스위칭 현상을 조사하기 위하여 각각의 파라미터 조건을  $X1=55[\mu\text{m}]$ ,  $Z1=5000[\mu\text{m}]$ ,  $dn=0.002$ ,  $w=3[\mu\text{m}]$ ,  $\alpha=0.4^\circ$ ,  $gap=2[\mu\text{m}]$ 으로 한 후 스위칭 전압을 0~25[V]까지 인가하였을 때 전계에 의한 굴절을 변화로 인하여 광의 진행이 15[V]에서는 그림8(a)와 같이 cross 측으로부터 일부가 bar 측으로 양분되어 전송되었다. 그러나 15[V]의 인가전압으로는 완전한 스위칭 현상을 기대할 수 없으므로 인가전

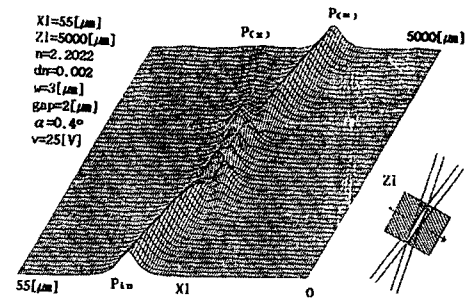
압을 증가시켜 20[V]로 가하였을 때 그림8(b)에서와 같이 광이 대부분 bar 측으로 전송되고 cross 측에 일부가 잔류되었다. 따라서 변조전압을 계속 증가시켜 25[V]를 인가한 경우는 완전히 bar 측으로 스위칭됨을 그림 8(c)에 나타냈다. 또한 동일한 조건에서 인가전압을 30[V]로 증가시킨 결과는 25[V]를 가한 경우와 거의 같은 결과를 얻었다. 따라서 본 실험결과로 적절한 스위칭 전압은 그림 8(c)와 같이 25[V]임을 확인하였다.



(a)  $dn=0.002$ 에서  $v = 15[V]$ 를 가할 경우



(b)  $dn=0.002$ 에서  $v = 20[V]$ 를 가할 경우



(c)  $dn=0.002$ 에서  $v = 25[V]$ 를 가할 경우

#### IV. 결 론

LiNbO<sub>3</sub> 광 변조기 X1(55[μm])×Z1(5000[μm])의 도파로 폭이 4[μm]인 광 도파로와 도파로 폭이 3[μm],4[μm]인 X-스위치 광 도파로에 적용하였다. BPM을 이용한 프로그램으로 시뮬레이션 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 광 도파로 폭이 4[μm]일 경우, S-파라미터에 의한 굴절율 변화 dn=0.001일때 광이 손실 없이 단일 모드로 도파 되었고, 각각 전압 20[V]를 인가한 결과 전극 간격이 2[μm]보다 4[μm]에서 전기광학 효과가 더 좋음을 확인하였다.

2) X-스위치 광 도파로 에서 전압을 인가하지 않은 경우, dn=0.002이며 도파로 폭 3[μm] 일때 입사광 이 단일 모드로 도파 되었고, α=0.4°에서 입사광 이 cross 측으로 전송되는데 반하여 α=0.5°에서는 bar 측으로 전송되었다.

#### Reference

[1] Cross, P. S and Shmidt, R. V "A1 G bit/s Integrated optical modulator", IEEE J. Quantum Electron, vol. Q E-15, pp.1415-1418, 1979.

[2] Alferness,R.C " Waveguide electro-optic modulators", IEEE. Microwave Theory Tech., vol. MTT-30, pp.1121-1137, 1982.

[3] Neyer, A Mevenkamp, W Thylen, L Lagerstrom, B" A Beam Propagation Method Annalysis of Active and Passive Waveguide Crossings", IEEE J.Lightwave Tech., LT-3, pp.635-642, 1985.

[4] Nishihara, T Haruna, M Suhara,T "Optical Integrated Circuits",Mc Graw-Hill Book Company, 294-295,1989

[5] Kubota, K. Noda, J and Mikami,O.; IEEE, J .Quantum Electron., QO-16,754- 760,(1980)

[7]Flannery,P.Teukolsky,A.Vetterling,W.:Numerical Recipes(The art of computing) Cambrige Univ, Press, 381-395 (1985)

[6] Neyer,A "Electrooptic X-switch using Single-Mode Ti:LiNbO<sub>3</sub> Channel