전기전자재료학회지 제4권 3호. 1991년 9월

X-스위치 광변조기의 설계 및 분석

Design and analysis of an X-switch optical modulator

소 대 화*·강 기 성*·채 기 병*·장 용 웅*

Dae-Hha Soh · Ki-Sung Kang · Kee-Byung Chae · Yong-Ung Jang

요 약

He-Ne레이저(λ=0.6328[μm])를 광원으로 사용하는 y-cut $LiNbO_3$ 기판의 광 도파로 형성 과정을 빔 전송방식 메카니즘을 이용하여 광 도파로에서 광파의 전계 변화 및 전계 분포에 대하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 Xl(55[μm])×Zl(5000[μm])인 $LiNbO_3$ 기판의 광 도파로 폭을 4[μm], 버퍼층을 0.02[μm]로 하였을때, 도파로 층의 깊이가 0.2[μm]인 지점에서 인가전압에 대한 x방향의 전계(E_x)와 y방향의 전계(E_y)분포를 관찰 하였다. 또한 단일도파로의 파라미터 조건을 적용하여 X-스위치를 구성하였을때 전계를 인가하지 않은 상태에서 굴절율 변화(dn) 0.002, 도파로 폭(w) 3[μm]로 하여 도파로의 교차각(α)을 0.4°~0.6°로 변화시킨 경우, α=0.5°와 0.6°일 때는 광빔이 bar측으로 출력되었고, α=0.4°에서는 광빔이 cross측으로 출력 됨을 확인하였다. 따라서 위에서 확인된 도파로의 교차각 α=0.4°인 경우, 전극 간격(gap)이 2[μm]인 조건에서 스위칭 전압을 인가하였을 때 25[V]에서 전기광학 효과에 의하여 광빔이 cross측에서 bar측으로 변조됨을 확인함으로써 X-스위치 광변조기의 기본적인 설계조건을 구현하였다.

ABSTRACT

In this paper, we calculate refractive index change of optical waveguide and electric field to simulate y-cut $LiNbO_3$ optical waveguide at He-Ne laser(λ=0.6328[μm]) by BPM mechanism. At waveguide width of 4[μm], buffer layer of 0.02[μm] of $LiNbO_3$ substrate(Xl 55[μm]×Zl 5000[μm]), we observed electric field E_x, E_y in the x,y-direction. By applying these parameters of single waveguide to simulate a X-switch, we have chosen index change of 0.002, width of 3[μm] and angle of 0.4°~0.6° of optical waveguide and under these conditions, optical beam propagates cross-side at 0.4°. When applied switching voltage of 25[V], optical beam of X-switch turns cross-side to bar-side at intersection angle 0.4°, index change of 0.002, waveguide width of 3[μm], electrode gap of 2[μm]. By the above results, we can obtain the basic design conditions of X-switch optical modulator.

* 명지대학교 전자공학과

1. 서 론

1960년대 레이저의 개발과 1970년대 광통신 시스템의 실용화에 따라 광 신호처리를 위해 집적광학 소자의 필요성이 증대되었고, 1980년대에 들어와서 미국 Bell 연구소에서는 광 도파로 제작기술에 획기적인 진보를 보였다. 현재는 광 손실과 변조 전압을 감소시키며 대역 폭을 향상시키기 위한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 y-cut $LiNbO_3$기판을 이용한 단일 광 도파로 와 X-스위치 광 도파로[1,2]를 제작하기 위한 전 단계로서 이들에 대하여 사뮬레이션방법으로 아래의 내용을 연구하였다.

첫째, $LiNbO_3$기판상의 단일 광 도파로에서 전계를 가하지 않은 경우와 전계를 가한 경우의 굴절율 변화를 빔전송방식(Beam Propagation Method ; BPM)의 알고리즘[3]을 이용한 프로그램을 작성하여 조사하였고, 단일 광 도파로와 X-스위치 광 도파로에서 광원의 전송 과정을 광 전계 등고선으로 표현하여 설명하였다.

둘째, $LiNbO_3$ 기판 위에 설치한 평행한 두 전극에 전압을 인가한 상태에서 기판에 분포되는 전계를 기판의 깊이(yl), 전극 간격(electrode gap), 인가전압 및 버퍼층(SiO_2)의 두께 등을 파라미터로 하여 x방향 과 y방향의 전계[4,5]를 계산하였고, 전압을 인가하지 않은 경우의 X-스위치 광 변조기를 모델링하였다. 또한 전극 간격을 변화시켜 스위칭 현상을 조사함으로써 X-스위치 광 변조기의 설계조건을 실험적으로 구현하였다.

2. 광 도파로 구조및 빔전송방식 메카니즘

2-1. 광 도파로 구조 및 빔 전송방식 메카니즘

광 변조기의 기본 구조인 y-cut $LiNbO_3$ 기판에 단일 도파로는 기판의 굴절율(n_s)보다 dn만큼 도파로에 굴절율 변화를 주어 입사된 광원이 도파로 밖으로 복사(radiation)가 없이 진행을 할 수 있게 만들어 준다. 여기서 단일 도파로 구조를 그림 2-1에 나타내었으며, X1은 기판 폭, Z1은 도파로의 길이, w는 도파로 폭 그리고 z방향은 광파의 진행방향, y방향은 $LiNbO_3$기판의 절단 방향이다.

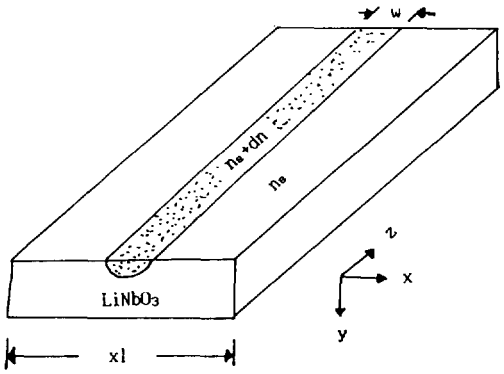


그림 2-1. 단일 광 도파로의 구조
Fig.2-1. Structure of single optical waveguide.

빔 전송방식을 이용한 시뮬레이션을 그림 2-1과 같은 도파로 구조에서 설명하면 빛의 전파방향이 z축 방향일 때 도파로의 굴절율은

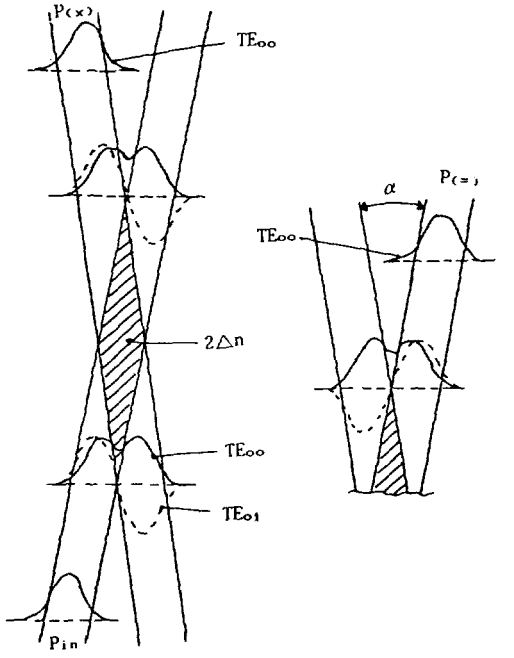
$$n = n_s^2 + dn(x, z) \cdots\cdots (2.1)$$

로 나타낸다. 여리서 n_s는 기판의 굴절율, dn은 도파로 굴절율 변화이며, 광파의 전계분포는 파동 방정식으로 가장 많이 사용되는 $\cosh^{-2}(2x/w)$형태를 사용하였다.[6]

2-2. X-스위치 광 도파로

X-스위치 광 변조기는 다중 모드를 도파시키는 TIR(Total Internal Reflection)스위치[7]에서 응용된 소자이다. TIR-스위치는

도파로 쪽이 수십 마이크로로써 광 도파로에 입사된 광 빔이 다중 모드로 도파되므로 전송하는 정보량이 많아짐에 정보량의 처리 한계를 극복하기 위하여 광 통신 시스템 에서는 단일 모드를 변조시킬 수 있는 X-스위치 광 변조기가 더욱 필요하게 되었다. 그러나 단일 모드를 변조시킬수 있는 X-스위치는 스위칭하기가 어렵고 높은 변조전압을 요구하는 것이 문제점으로 등장하고 있다. 즉 도파로의 폭이 20[㎛], 전극 간격 4[㎛] 그리고 광과 전계의 오버랩 상수가 Γ =0.5인 경우 TIR-스위치에서는 스위칭 전압이 수[V]인 반면에 도파로의 폭이 3~4[㎛], 전극 간격 4[㎛] 그리고 Γ=0.5인 단일 모드를 변조시킬 수 있는 X-스위치 광 변조기는 스위칭 전압이 40~50[V]정



(a) cross측으로 도파되는 경우　　(b) bar측으로 도파되는 경우

그림 2-2. 단일 모드 X-스위치 광 도파로의 구조

Fig.2-2 Structure of single mode X-switch optical waveguide.

도가 요구된다[8]. 따라서 X-스위치 광 변조기의 구조를 그림 2-2에 나타내었다. 여기에서 TE_{00}은 단일 모드이며, 점선 모드(TE_{01})는 두 개의 모드를 갖는 다중 모드이다. α는 두 도파로의 각도이고, 두 도파로가 겹쳐지는 부분은 2△n의 굴절율을 갖는다.

이때 두 도파로로 출력되는 광은

$$P_{(x)}=P_{(in)}\cos^2(\triangle\beta L/2) \quad \cdots\cdots (2.2)$$

$$P_{(=)}=P_{(in)}-P_{(x)} \quad \cdots\cdots (2.2)$$

$$L = w/\sin(\alpha/2) \quad \cdots\cdots (2.4)$$

이다. 여기서 $P_{(x)}$는 cross측으로 도파되는 광이며, $P_{(=)}$는 bar측으로 도파되는 광이고, $P_{(in)}$는 입력된 광 이다. 그리고 cross측으로 도파될 수 있는 파라미터 변수는 전계에 의한 굴절율 변화(△n)와 전달계수 변화(△β), 두 도파로의 각도(α), 교차길이(L) 그리고 도파로 폭(w)이다. 따라서 X-스위치 광 도파로에 전극을 형성하여 전압을 인가하면, 식(2.2)의 β가 변하므로 도파로가 겹쳐지는 2△n부분의 굴절율이 변화됨으로써 스위칭 작용이 발생한다.

2-3. 빔 전송방식 알고리즘을 이용한 프로그램의 흐름도

빔 전송방식 이론을 이용한 프로그램 흐름도는 그림 2-3에 나타냈다. 빔 전송방식 알고리즘은 전계의 Fourier변환과 역 Fourier변환을 반복적으로 수행한다. 즉 평면파가 균일한 매질을 $z_o+\triangle z/2$만큼 진행할때는 Fourier변환을 하며, 위상 변화를 할때는 역 Fourier변환을 하고 다시 균일한 매질을 $z_o+\triangle z/2$만큼 진행하는 방식으로 계속 반복하게 되어 있다. 즉 전계의 Fourier 변환 과 역 Fourier변환을 부호 1과 −1로 구분하여 FFT-subroutine[8]을 이용하여 계산하였다.

따라서 빔 전송방식은 z=o에서 시작된 광파를 알면, $z=z_o+\triangle z$까지 진행한 광파를 구할 수 있으므로 이러한 알고리즘을 반복하면 계속적으로 진행하는 파의 전계분포를 렌즈가 반복 되는 현상과 같은 메카니즘으로 적용하여 광파의 전계 분포를 구할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 방법으로 구성된 프로그램을 RC-3240에서 실행시켜 data file을 얻은 다음 SUN 3/80과 7445A-plotter를 이용하여 그래픽하였다.

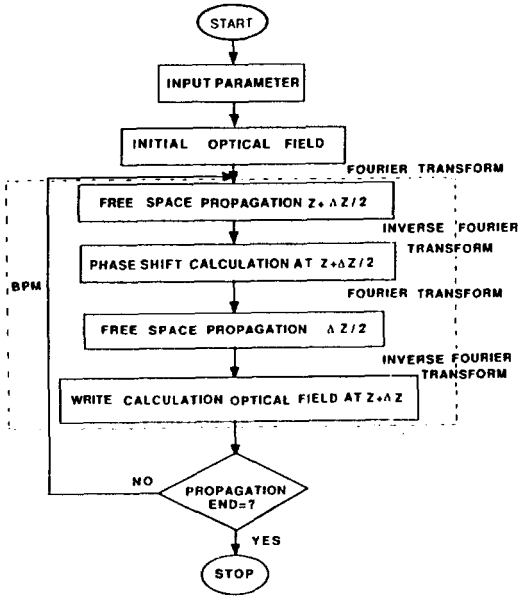


그림 2-3. 빔전송방식 이론을 사용한 프로그램의 흐름도

Fig.2-3. Flow chart of program using

3. 결과 및 고찰

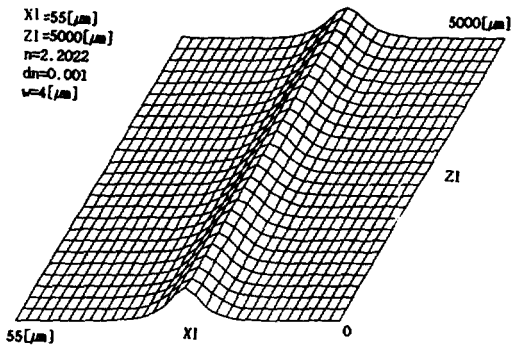
3-1. 단일 광 도파로에 대한 시뮬레이션

빔 전송방식(BPM)이론을 이용한 단일 광 도파로에 대한 시뮬레이션으로 y-cut $LiNbO_3$기판에 도파로의 폭 4[㎛], 기판의 굴절율(n_s) 2.2022, 파장(λ) 0.6328[㎛], 굴절율 변화 dn=0.001로 지정하였을때, 도파된 최대 모드 수 s가 단일 모드에 만족하므로 도파로의 외부로 복사 없이 전송되는 시뮬레이션 결과를 그림 3-1(a)에 나타내었다. 그 밖에 동일한 파라미터에서 dn=0.002와 dn=0.005 그리고 dn=0.01일 경우는 전송되는 광의 일부가 도파로 밖으로 복사되어 손실이 발생된 결과로서 그림 3-1(b), (c), (d)에 나타내었다. 여기서 n_s는 $LiNbO_3$기판의 굴절율, dn은 Ti가 열확산된 도파로의 굴절율 변화이며, w는 도파로의 폭, Z1은 도파로의 길이 그리고 X1은 기판 폭을 나타낸다. 위의 결과로부터 단일 모드 조건은 도파로의 폭과 도파로의 굴절율 변화와의 상호관계가 있으며, 최대 모드수 s에 따라서 도파로의 단일 모드와 다중모드 조건이 형성됨을 확인할 수 있다.

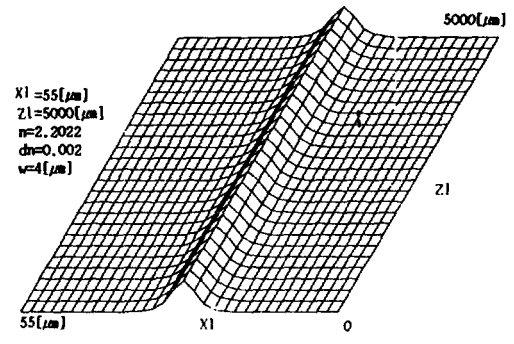
다음은 단일 광 도파로에 입사된 광파의 모드 분포 $0.001/\cosh^2(2x/w)$의 형태를 빔 전송방식 알고리즘을 이용한 프로그램에서 얻은 데이타를 등고선도로 나타내었다. 이 등고선도를 사용하므로 광 빔의 전송을 나타낸 그림 3-1보다 더 정확하게 굴절율 변화를 나타낼 수 있다. 그림 3-2에서는 그림 3-1(a)의 광파의 전계 등고선도를 나타낸 것으로서, 광파의 전계는 o.f로 표시하며, 광파의 전계 크기는 0.1[V/㎛]에서 1.0[V/㎛]까지의 등고선으로 나타냈다. 가장자리 등고선이 0.1[V/㎛]이고, 중앙에서 첫번째 등고선이 1.0[V/㎛]이다. 여기서는 전계를 가하지 않았기 때문에 도파로상의 등고선이 변함없이 균일하게 진행됨을 알 수 있다.

3-2. 단일 광 도파로의 전계 분포

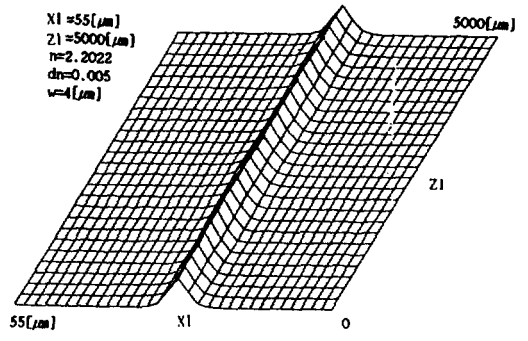
단일 광 도파로에서 전기 광학 효과를 이용하는 집적광학 소자의 시뮬레이션을 위해서는 전극 구조에 의한 기판 내부의 전계 계산을 필요로 한다. 따라서 인가 전압 20[V], 기판의 계산 깊이를 0.2[㎛]. 그리고 전극 간격을 4[㎛]로 한 조건에서 버퍼층 두께를 각각 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3[㎛]



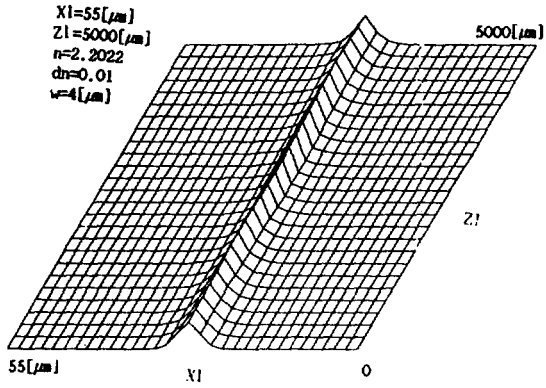
(a) dn=0.001일 경우



(b) dn=0.002일 경우



(c) dn=0.005일 경우



(d) dn=0.01일 경우

그림 3-1. 빔 전송방식 알고리즘에 의한 단일 도파로의 시뮬레이션

Fig.3-1. Simulation of single waveguide by BPM algorithm.

로 변화시켜 시뮬레이션한 결과 버퍼층 두께 0.02[μm]보다 작은 두께에서는 프로그램의 한계로 계산할 수 없었고, 버퍼층 두께가 얇은 0.02[μm]에서 x, y방향 전계가 가장 크게 분포됨을 알 수 있으며, 그 결과를 그림 3-3에 나타냈다. 그림에서 B.L은 버퍼층의 두께를 나타낸다.

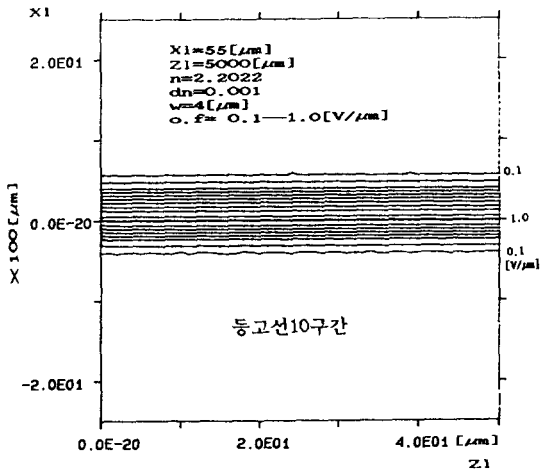
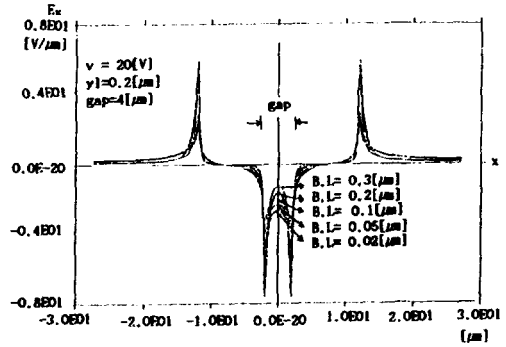
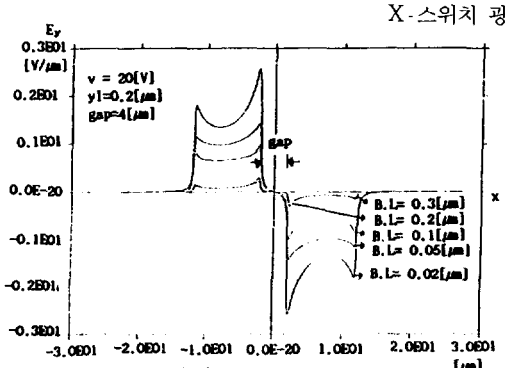


그림 3-2. 단일 도파로의 광 전계 등고선도 (v=0[V])

Fig. 3-2. Optical field contour plot of single waveguide(v=0[V]).



(a) Ex분포

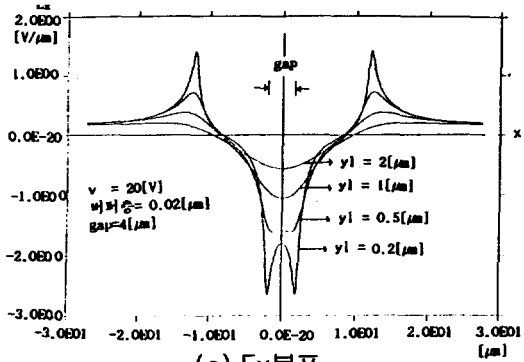


(b) Ey분포

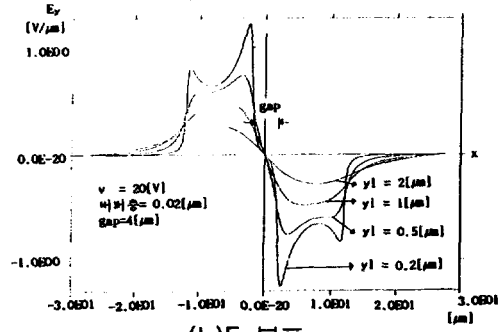
그림 3-3. 버퍼층 변화에 의한 전계분포

Fig.3-3. Electric field distribution by buffer layer change.

그림 3-4는 기판의 깊이 변화에 따른 전계분포를 시뮬레이션하였다. 인가전압은 20[V]이고, 전극 간격은 4[μm]로 하였으며, 버퍼층 두께 0.02[μm]인 조건에서 깊이를 각각 0.2, 0.5, 1, 2[μm]로 계산하여 도시한 결과 깊이가 얇을수록 전계 분포가 강하



(a) Ex분포,



(b)Ey분포

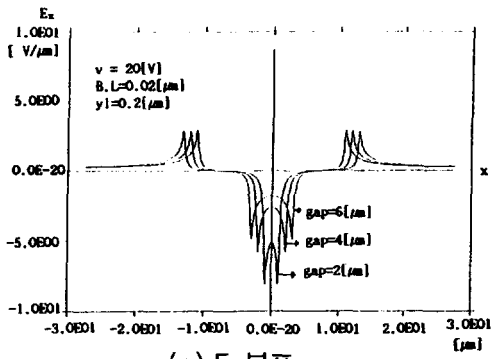
그림 3-4. 기판의 깊이(0.2, 0.5, 1, 2[μm]) 변화에 따른 전계 분포

Fig.3-4. Electric field distribution by substrate depth(0.2, 0.5, 1, 2[μm]).

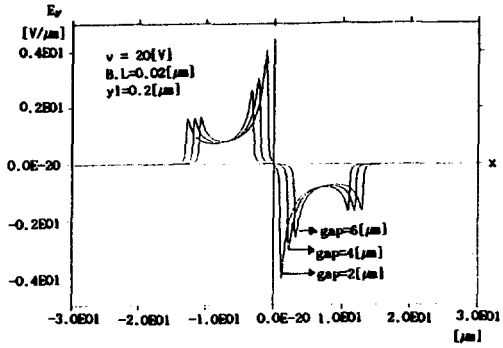
며 0.2[μm]에서 가장 강한 전계 분포가 형성됨을 확인하였다.

그림 3-5는 전극 간격을 변화시켰을 때의 전계 분포이다. 전극 간격에 의한 전계분포를 나타낸 결과에서 전계분포 역시 전극 간격이 적을수록 강한 전계분포가 형성됨을 알 수 있다. 본 연구의 경우 전극간격은 전계분포가 가장 큰 경우의 2[μm]와 광측과 평행한 전계가 요구되는 y-cut 단일 도파로에서는 전극 간격을 4[μm]로 선정하여 단일 광 도파로와 X-스위치에 적용하였다.

이상과 같이 조사된 결과로부터 버퍼층



(a) Ex분포,



(b)Ey분포

그림 3-5. 전극 간격에 따른 전계분포

Fig.3-5. Electric field distribution by electrode gap.

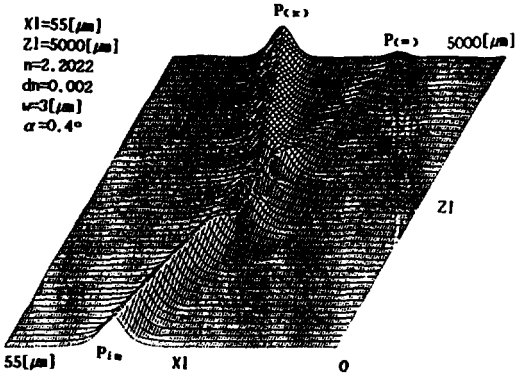
두께(B.L)가 얇을수록, 기판의 측정깊이(yl)가 적을수록, 그리고 전극 간격(gap)이 좁을수록 도파로 주변에 분포된 전계가 강하게 형성됨을 시뮬레이션의 결과로 확인하였다.

3-3. 인가한 전압에 따른 X-스위치 광도파로

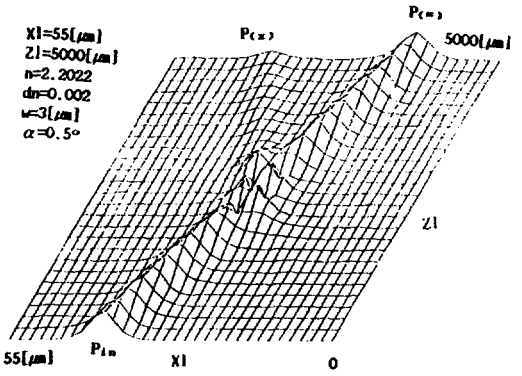
$LiNbO_3$기판의 X-스위치 광 도파로에 입사된 광파의 모드 분포 $0.002/\cosh^2(2x/w)$의 형태를 빔 전송방식 메카니즘에 적용하여 전압을 인가하지 않은 X-스위치 광 도파로에 입사시킬 경우, 도파로 각도와 도파로의 굴절율 변화에 의한 광 빔의 전송방향이 cross측 혹은 bar측으로 전환되는 현상을 다음과 같은 조건에서 실험하였다. 즉 dn=0.002, 도파로 폭 3[㎛] 그리고 α =0.4°일때의 실험결과는 광 빔이 cross측으로 출력되었으며, 그림 3-6(a)에 나타내었다. 같은 조건에서 α=0.5°로 설계된 경우는 교차각(α)의 조건으로 인하여 입사된 빔이 bar측으로 출력되었고, 그 결과를 그림 3-6(b)에 나타내었다. 따라서 식 (2·2), (2·4)에서와 같이 도파로의 교차각(α)이 스위칭 현상의 변수로 중요한 변수임을 확인하였다. 또한 도파로의 교차각(α)에 의한 스위칭 작용이 굴절율 변화에 의한 스위칭 작용보다 민감하므로 최근에는 전압을 인가하는 방식에 따라서 도파로의 각도를 변화시키는 것과 같은 효과를 낼 수 있는 연구가 진행되고 있다.

또한 그림 3-6(a)의 결과에 대하여 광파의 전계 등고선도를 이용한 X-스위치의 광파의 진행과정을 확인하기 위하여 그 결과를 그림 3-7에 나타내었다. 광파의 전계 등고선도로부터 광파의 거의 전부가 cross측으로 도파됨을 보다 명확히 구분할 수 있다. 여기서 o.f는 광파의 10구간의 전계 등고선으로서 0.1[V/㎛]에서 1.0[V/㎛]까지 분포하고 있다.

전압을 인가하지 않은 상태에서 단일 모드를 만족하는 도파로의 폭과 교차각을 변화시켜 광파의 진행이 cross측 또는 bar측



(a) dn=0.002, α=0.4°일 경우



(b) dn=0.002, α=0.5°일 경우

그림 3-6. X-스위치 광 도파로의 시뮬레이션(v=0[V])

Fig.3-6. Simulation of X-switch optical waveguide(v=0[V]).

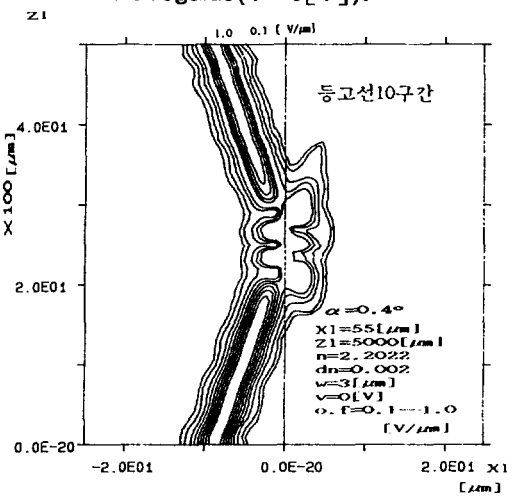


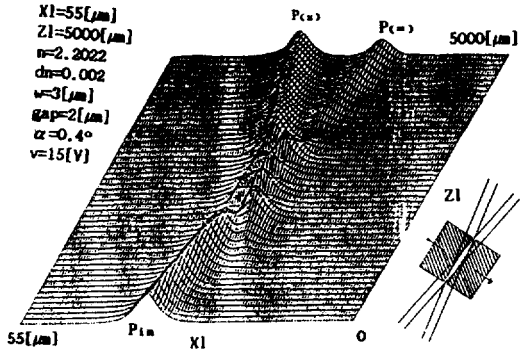
그림 3-7. X-스위치의 광파의 전계 등고선도(v=0[V])

Fig.3-7. Optical field controur plot of X-Sswitch(v=0[V]).

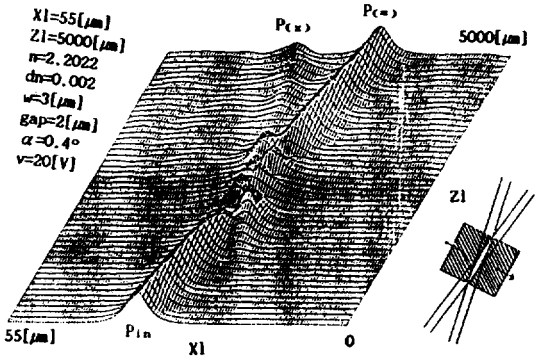
으로 전송됨을 고찰하였고, 앞에서 얻어진 조건들로부터 전극간격과 전압에 따른 광파의 스위칭 현상을 고찰하였다.

X-스위치 광변조기에서 전극 간격과 인가전압에 따른 스위칭 현상을 조사하기 위하여 각각의 파라미터 조건을 X1=55[㎛], Z1=5000[㎛], dn=0.002, w=3[㎛], α=0.4°, gap=2[㎛]으로 한 후 스위칭 전압을 0~30[V]까지 단계적으로 인가하여 전계에 의한 굴절율 변화에 따른 광빔의 도파과정을 관찰하여 본 결과, 0[V]의 경우는 앞에서 언급한 그림 3-6(a)의 경우와 동일하며 광빔이 cross측으로 진행하였고, 그후 10[V]를 인가하였을때까지는 변화가 거의 없었다. 그러나 15[V]를 인가하면서부터 그림 3-8(a)와 같이 광빔이 cross측으로부터 일부가 bar측으로 양분되어 전송되었다. 따라서 15[V]의 인가전압으로는 완전한 스위칭 현상을 기대할 수 없으므로 인가전압을 증가시켜 20[V]로 가하였다. 이때 광빔이 대부분 bar측으로 전송되고 cross측에 일부가 잔류됨을 확인하였다[그림 3-8(b)]. 따라서 변조전압을 계속 증가시켜 25[V]를 인가한 경우는 완전히 bar측으로 스위칭됨을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 그림 3-8(c)에 나타냈다. 또한 동일한 조건에서 인가전압을 30(V)로 증가시킨 결과는 25[V]를 가한 경우와 거의 같은 결과를 얻었으며, 그림 3-8(d)에 나타내었다. 따라서 본 실험결과로 적정 스위칭 전압은 그림 3-8(c)와 같이 25[V]근처임을 확인하였다.

식(2·2), (2·4)에서 제시된 바와같이 앞에서 얻어진 결과는 도파로의 교차각(α)과 전계에 의한 굴절율 변화임을 확인할 수 있

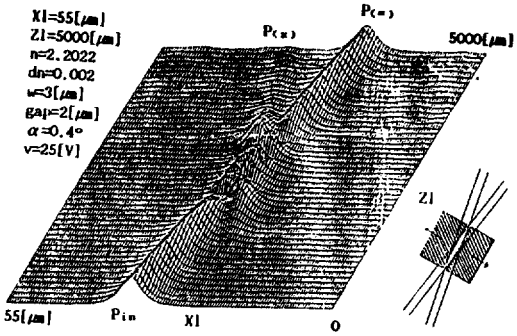


(a) dn=0.002에서 v=15[V]를 가할 경우

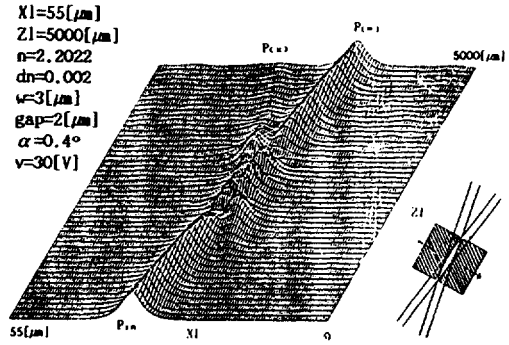


(b) dn=0.002에서 v=20[V]를 가할 경우

그림 3-8. 전압 변화에 의한 X-스위치 광 도파로의 모델링

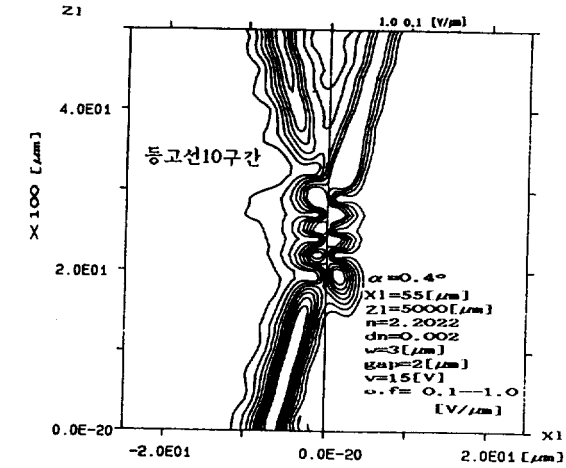


(c) dn=0.002에서 v=25[V]를 가할 경우

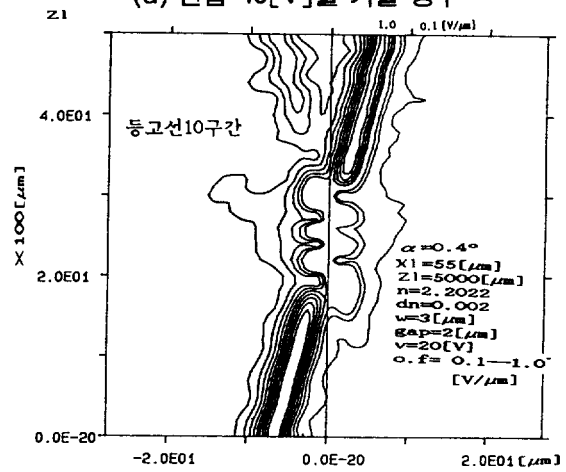


(d) dn=0.002에서 v=30[V]를 가할 경우

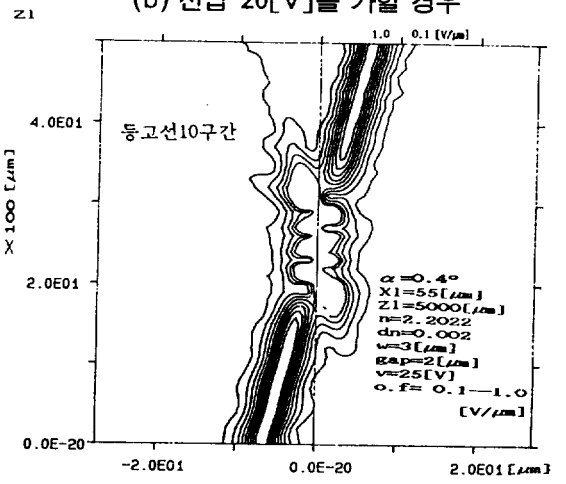
Fig.3-8. Modeling of X-switch optical waveguide by voltage change.



(a) 전압 15[V]를 가할 경우



(b) 전압 20[V]를 가할 경우



(c) 전압 25[V]를 가할 경우

그림 3-9. X-스위치의 광 전계 등고선 도

Fig.3-9. Optical field contour plot of X-switch.

었다. 즉 도파로의 교차각이 0.4°이상에서는 훨씬 높은 스위칭 전압이 필요하며, 완전한 스위칭 동작을 얻는데 용이하지 않았다.

다음은 전압 변화에 따른 광빔의 도파과정을 등고선도를 이용하여 조사하여 본 결과이다. 그림 3-9는 그림 3-8의 각각의 경우에 대한 광파의 전계 등고선도로서 전압을 15[V]가한 경우는 그림 3-9(a)에서 전계에 의한 굴절율 변화로 인하여 광 빔이 cross측 과 bar측으로 나누어 출력됨을 볼 수 있다. 그림 3-9(b)는 전압 20[V]를 가할 경우의 광전계 등고선도로서 그림 3-9(a)보다 더 많은 광 빔이 bar측으로 변조됨을 나타내며, 그림 3-9(c)는 25[V]를 가한 경우로써 광빔이 cross측에서 bar측으로 완전하게 스위칭된 것을 광 전계 등고선도로부터 확인할 수 있다.

앞에서 얻은 실험 결과로부터 도파로의 교차각이 넓어질수록 광 손실이 많아지며, 스위칭 전압도 훨씬 높아지고 또한 완전한 스위칭 현상을 얻는데 어려움이 있음을 확인하였다. 따라서 교차각을 적게하는 반면 도파로 길이를 증가시켜줌으로써 스위칭 전압을 줄일 수 있는 방법으로 설계조건을 분석할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 광 변조기를 제작하기 위한 설계조건의 결정과 분석을 바탕으로 한 내용으로써 y-cut $LiNbO_3$ 광 변조기를 X1(55[㎛])×Z1(5000[㎛])인 크기의 기판상에 도파로 폭이 4[㎛]인 단일 광 도파로와 도파로 폭이 3[㎛]와 4[㎛]인 X-스위치 광 도파로에 적용하였다. 여기에 He-Ne레이저(λ=0.6328[㎛])광을 입사시킬 경우를 가정하여 빔전송 방식(BPM)을 이용한 프로그램으로 시뮬레이션하여 다음과 같은 결

론을 얻었다.

1) 단일 광 도파로에서 도파로 폭이 4[㎛] 일 경우 S-파라미터에 의한 굴절율 변화 dn=0.001일때 광 빔이 광 손실 없이 단일 모드로 도파되었다.
2) X-스위치 광 도파로에서 전압을 인가하지 않은 경우, dn=0.002이며 도파로 폭 3[㎛]일 때 입사 광 빔이 단일 모드로 도파되었고, α=0.4°에서 입사광 빔이 cross측으로 전송되는데 반하여, α=0.5°에서는 bar측으로 전송되었다.
3) X6-스위치 광 도파로의 파라미터로써 dn=0.0002, 도파로의 폭 3[㎛] 그리고 도파로의 교차각을 0.4°로 취하여 전압을 0[V]~30[V]로 변화시킨 결과 25[V]를 인가하였을 때 광빔이 cross측에서 bar측으로 스위칭되었다.

이러한 결과로서 선택된 파라미터 조건은 단일 광 도파로와 X-스위치 광 변조기 설계, 제작에 있어서 중요한 변수로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1) F.Auracher and R.Keil ; *Wave Electron.*, **4**,109~140,(1980)
2) K.Kubota, J.Noda and O.Mikami ; *IEEE J.Quantum Electron.*, **QO-16**,754~760,(1980)
3) A.Neyer, W.Mevenkamp, L.Thylen, B. Lagerstrom ; *IEEE J.Lightwave Tech.*, **LT-3**,635~642,(1985)
4) Lars Thylen, Per Granestrand ; *J.Opt. Communication*, **7**.(1),11~14,(1986)
5) R.C. Alferness ; *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-30**, 1121~1137,(1982)
6) H.Nishihara, M.Haruna, T.Suhara ; *Optical ntegrated circuits*, Mc-Graw-Hill Book Company, 101~102(1989)
7) H.Nishihara, M.Haruna, T.Suhara ; *Optical Integrated circuits*, Mc-Graw-Hill Book Company, 294~295,(1989)
8) P.Flannery, A.Teukolsky, W.Vetterling ; *Numerical Recipes(The Art of Computing)*, Cambrige Univ. Press, 381~395,(1985)

(1991년 6월 29일 접수)