

# Ridge형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로 구조 편광조절기의 설계

준회원 문준기\*, 유재왕\*, 허현\*, 정회원 반재경\*

## A Design of Ti:LiNbO<sub>3</sub> Optical Polarization Controller with Ridge Structures

Choon-Ki Moon\*, Jae-Wang Yu\*, Hyun Huh\*, Jae-Kyung Pan\* *Regular Member*

### 요약

본 논문에서는 기존의 strip 전극구조를 가진 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로 구조 편광조절기에서 광도파로를 ridge형 구조로 설계함으로써 저전압구동 및 광대역 특성이 가능한 편광조절기를 제안하였다. 편광조절기의 구동전압과 대역폭은 전극의 M/W(microwave)특성 및 광도파로와 전극의 상대적인 구조에 의해서 결정된다. 따라서 ridge형 도파로 구조와 같이 복잡하고 다양한 구조의 편광조절기를 해석하기 위하여 유한요소법을 이용한 툴(tool)을 개발하였고, 이 툴을 이용하여 ridge형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로구조 편광조절기의 전극간격, 두께 및 광도파로 ridge 깊이에 따른 특성 임피던스와 M/W 유효굴절율을 구하여 결과를 제시하였다. 또한 편광조절기의 구동전압을 고려하기 위하여 같은 설계 조건에 따라 진행광파와 M/W와의 중첩상수를 계산하였다. 모의실험 결과 광대역 설계를 위해서는 두꺼운 전극과 좁은 전극간격, 깊은 ridge깊이가 요구되며, 저전압 구동을 위해서는 좁은 전극간격과 깊은 ridge깊이가 요구되지만 전극두께는 무관함을 알 수 있었다. Ridge의 깊이를 변화하면서 구동전압을 계산한 결과 ridge의 깊이가 증가할수록 구동전압이 감소한다는 것을 보였다.

### ABSTRACT

In this paper, a ridge type polarization controller which has merits of low drive voltage and wide bandwidth to coplanar waveguide type, is proposed. The Ti:LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide is applied to the conventional polarization controller. The drive voltage and bandwidth of the device are dependent on the microwave characteristics of electrodes and the relative structure between the waveguides and electrodes. So, the characteristic impedance and microwave effective index of the device have been calculated by the various design factors, which are electrode gap, electrode thickness and ridge depth, using FEM(Finite Element Method) numerical analysis tool. The overlap integral factor between the guided wave and the external electric field has also been calculated in order to obtain the value of drive voltage. For wider bandwidth and lower drive voltage, the polarization controller has to be designed to have deep ridge, narrow electrode gap, and thick electrodes. For the drive voltage with various ridge depth, it is shown that the drive voltage is decreased as the ridge depth increases and that the drive voltage of the proposed polarization controller is lower than that of coplanar type.

### I. 서론

편광조절기는 임의의 편광상태를 가진 광파가 입사하여 원하는 편광상태로 바꾸어 줄 수 있는 소자

로서, 일정한 편광상태가 요구되는 광통신 시스템이나 광센서 분야에서 편광상태를 적절하게 제어하기 위하여 꼭 필요한 소자이다<sup>[1],[2]</sup>. 일반적으로 편광조절기는 크게 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 광섬유

\* 전북대학교 전기·전자·제어공학부(pan@moak.chonbuk.ac.kr)

논문번호: 98165-0413, 접수일자: 1998년 4월 13일

※ 본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소 교육부 반도체 분야 학술연구조성비(ISRC-E-3012)에 의하여 연구되었음.

에 물리적 힘을 가하여 복굴절을 유기하는 방법<sup>[3]</sup>과 LiNbO<sub>3</sub>와 같이 전기광학 특성을 가진 물질에 제작된 도파로를 이용하여 모드 변환이나 위상변화를 전기광학적으로 유기하는 집적광학 방식이 있다<sup>[4],[5]</sup>. 전자는 광손실이 적은 장점이 있지만 반복되는 기계적인 변형에 의한 성능 저하가 따른다. 반면에 집적광학 능동형 편광조절기 방식은 기계적인 변형이 없으므로 장시간의 사용에 따른 신뢰성이 보장되고 진행파형 전극구조를 사용함으로써 고속 구동이 가능한 장점이 있다. 특히 LiNbO<sub>3</sub> z축전송 도파로와 strip전극구조를 채택한 편광조절기<sup>[5]</sup>의 경우 낮은 모드 복굴절과 입사광 파장에 무관한 특성 및 광손상에 강한 특성을 가지고 있으며, 또한 진행파형 전극의 설계가 가능하여 광대역의 편광조절이 가능하다.

그러나 이상과 같이 strip 전극구조를 가진 LiNbO<sub>3</sub> z축전송 도파로 구조 편광조절기는 그 응용성에도 불구하고 모드 변환에 필요한 전기광학계수  $r_{22}$ (3.4pm/V)가 매우 낮아 상대적으로 높은 구동전압이 요구되며, 더욱이 전극에 의한 광손실을 보상하기 위하여 두꺼운 완충층을 삽입하여야 하므로 더욱 높은 구동전압이 요구된다. 또한 기존의 평판형 광도파로 편광조절기는 근본적으로 진행파와 외부전계 사이에 계산되어지는 중첩상수의 제한 때문에 구동전압을 낮추는데 문제점을 가지고 있다<sup>[6]</sup>.

따라서 본 논문에서는 기존의 편광조절기의 성능 개선을 위하여 ridge형 도파로구조<sup>[7]</sup>를 가진 LiNbO<sub>3</sub>편광조절기를 제안한다. 일반 평판형 도파로 구조를 ridge형 도파로 구조로 대체하여서 진행파의 집광도를 높이고, 전극에 의한 외부전계와 진행파파간의 중첩상수를 증가하여 저전압 구동이 가능한 편광조절기를 설계하였다. 또한 소자의 고속 편광변환 및 저전력 구동을 위해 요구되는 진행파와 전기적인 변조신호의 위상속도 정합 및 M/W 특성임피던스 정합을 위한 설계를 조건을 계산하였다.

제안한 편광조절기의 설계 파라미터를 구하고, 소자의 성능을 예측하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석 툴을 개발하였다. ridge의 깊이, 전극간격, 전극두께 그리고 전극과 도파로 사이의 완충층의 두께를 조절하면서, 수치해석 툴을 이용하여 전극에 의한 전위분포를 해석하였다. 또한 광파와 전기적인 변조파의 위상속도 정합 및 저전력 구동을 위하여 요구되는 M/W 유효굴절율과 특성임피던스를 계산하였다. 그리고, 진행파와 전극에 의한 외부전계간의 중첩상수를 계산하여 편광조절기의 구동전압을

구하였다. 모의 실험 결과 광대역 설계를 위해서는 두꺼운 전극과 좁은 전극간격 및 깊은 ridge깊이가 요구되며, 저전압 구동을 위해서는 좁은 전극간격과 깊은 ridge깊이가 요구되지만 전극두께는 무관함을 알 수 있었다. 특히 ridge깊이 설계조건을 이용할 경우 저전압 구동 및 광대역 설계가 동시에 이루어짐을 알 수 있었다.

II장에서는 편광조절기의 기초이론을 살펴보고, 기존의 편광조절기의 구조와 원리를 알아본 다음, ridge형 편광조절기의 구조와 원리를 제시한다. III장에서는 편광조절기의 전극에 의한 전계분포, 중첩상수, 특성임피던스, M/W과 굴절율을 계산하기 위한 유한요소법의 기초이론과 수치해석 툴 개발과 해석 결과를 보였으며, IV장에서 결론을 맺었다.

## II. 편광조절기의 구조 및 원리

### 1. coplanar형 편광조절기

광도파로형 편광조절기는 입출력단에서 임의의 편광을 가진 빛을 도파시키는 채널광도파로를 가지고 있으며, 도파하는 광파의 편광상태를 조절하기 위한 전극이 도파로 상부에 위치한다. 그림 1은 strip형 전극구조와 z축 전송형 x-cut LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 가진 편광조절기를 나타내고 있다. 편광조절기는 TE/TM 모드변환기(MC; Mode Converter)와 위상천이기(PS; Phase Shifter)의 두 부분으로 구성되어 있다.

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22}E_x + r_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E_x + r_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_x\right)z^2 + 2r_{31}E_xyz + 2r_{31}E_xxz - 2r_{22}E_xxy = 1 \quad (1)$$

LiNbO<sub>3</sub>에 외부의 전극에 의한 전계가 가해지면 그 굴절을 타원체는 식 (1)과 같이 변환된다. 모드 변환기에서는 중심 전극으로부터 x축 결정방향 전계 E<sub>x</sub>를 발생시키며, 두 개의 옆면 전극에서 y축 결정방향 전계 E<sub>y</sub>를 발생시킨다. 이렇게 인가된 전계 E<sub>x</sub>와 전기광학계수  $r_{61}$ (= -r<sub>22</sub>)에 의해서 TE(Transverse Electric)/TM(Transverse Magnetic) 모드변환을 유도한다. 그리고 전계 E<sub>y</sub>와 전기광학계수 r<sub>22</sub>, r<sub>31</sub>은 광도파로의 비대칭적인 구조에 의해 발생하는 TE모드와 TM모드 간의 모드 복굴절을 보상하게 된다. 위상천이기에서는 y축 결정방향전계를 이용하여 MC출력단에서 나오는 TE, TM 편광 모드 사이에 위상차를 일으켜 편광조절기의 출력단

에서 나오는 편광모드를 원하는 임의의 편광상태(원 편광, 타원편광, 선편광)로 출력하는 기능을 한다.

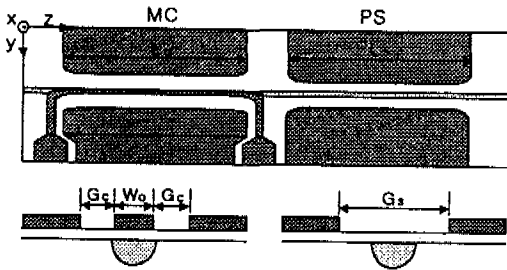


그림 1. coplanar형 편광조절기

일반적으로 집적광학에서 두 개 이상의 광도파로가 서로 가까이 위치해 있거나, 또는 한 도파로 내에서 두 개 이상의 다른 모드들이 존재할 때 모드 변환등의 상호작용이 발생하는 데 이의 정확한 이해를 위해 결합모드(coupled-mode) 이론이 사용되고 있다<sup>[8]</sup>.

Jones matrix와 결합모드 이론에 의하여 모드변환기를 ray matrix로 표현하면 식 (2)와 같다<sup>[9]</sup>.

$$R_{MC} = \begin{pmatrix} \cos \Phi + j \cos r \sin \Phi & -j \sin r \sin \Phi \\ -j \sin r \sin \Phi & \cos \Phi - j \cos r \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기에서

$$\Phi = \sqrt{k^2 + \delta^2} L_c,$$

$$\tan r = \frac{k}{\delta} \left( k = \frac{\pi n_0^2 r_{61} E_x}{\lambda}, \delta = \frac{\Delta\beta}{2} + \delta', \delta' = \frac{\pi n_0^2 r_{22} E_y}{\lambda} \right)$$

이고, k는 결합상수이고,  $\delta$ 는 모드 위상속도 비정합 파라미터이며  $\Delta\beta$ 는 모드 복굴절을 나타낸다. 역시 위상천이기 부분을 ray matrix로 표현하면 다음과 같다.

$$R_{PS} = \begin{pmatrix} \exp(j\phi) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기에서  $\phi = \frac{\pi n_0^2 r_{22} E_y L_s}{\lambda}$  이다.

결국, 모드변환기와 위상천이기가 동시에 동작하고 TE 모드 입사광  $E_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  인 경우 출력은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} E_{out} &= R_{PS} R_{MC} E_{in} \\ &= \begin{pmatrix} \exp(j\phi)(\cos \Phi + j \cos r \sin \Phi) \\ -j \exp(-j\phi) \sin r \sin \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

즉, 외부전극에 의한 전계  $E_x, E_y$ 에 의하여 k,  $\delta$ ,  $\phi$ 를 제어하여 임의의 편광상태로 조절하는 변조기

능을 수행할 수 있다. 특히 모드변환기는 단독적으로 편광 회전판으로 사용될 수 있으며, 적절한 구동 전압 및 전극길이의 조절에 따라서 QWP(quarter wave plate)나 HWP(half wave plate)로 사용될 수 있다. 또한 모드변환기의 적절한 배치에 의하여 reset-free형 QWP-HWP-QWP 편광조절기를 구성할 수 있다<sup>[10]</sup>.

이와 같은 형태는 현재 파장독립 집적광학형 편광조절기의 기본 구조로서 모드 복굴절 보상에 의하여 높은 모드변환비율을 얻을 수 있으며, z축 전송 LiNbO<sub>3</sub> 구조에 의한 낮은 광손상과 입사광의 파장에 무관한 모드변환이 가능하다.

## 2. Ridge형 편광조절기

본 논문에서는 기존의 coplanar형 편광조절기의 특성을 개선하기 위해 ridge형 도파로를 적용한 편광조절기를 설계하였다. 그림 2와 같이, ridge형 편광조절기의 근본적인 원리는 coplanar형과 같으나, 구조상 ridge에 도파로를 형성하게 되어 도파로 내의 광파와 인가 전압에 의한 외부전계의 중첩상수를 증가시킨다. 중첩상수가 증가하면 모드의 변환 효율을 높이게 되며 구동전압을 낮출 수 있는 장점을 갖게 된다.

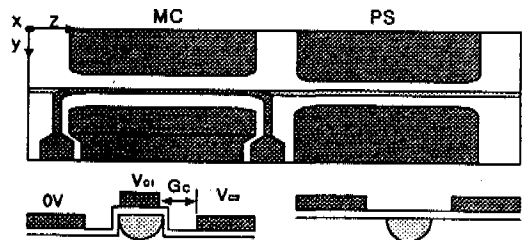


그림 2. ridge형 편광조절기

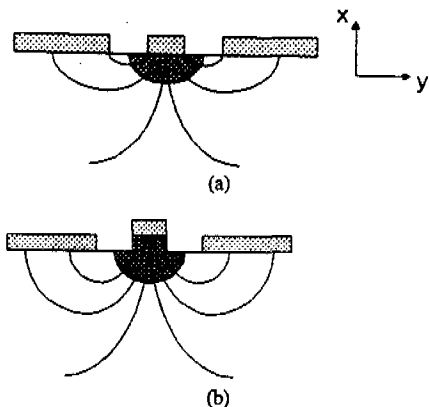


그림 3. x축방향 전계 E<sub>x</sub> 변화

앞에서 모드변환기에서 모드변환을 유도하는 전계 요소는 중심전극으로부터 유도된 x축 결정방향 전계임을 언급하였다. 그림 3은 기존 coplanar형 편광조절기와 ridge형 편광조절기의 중심전극으로부터 유도된 전계분포를 개념적으로 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 ridge형 편광조절기의 도파로에 가해지는 x축 결정방향 전계의 분포가 기존의 coplanar형 편광조절기에 비하여 훨씬 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 전계성분의 증가는 입사광파와 외부전계간의 중첩상수를 증가시킬 수 있음을 의미하고 결과적으로 저전압 구동이 가능함을 나타낸다.

### III. 유한요소법에 의한 해석

strip구조를 가진 광도파로 편광조절기의 성능을 예측하고 최적화하기 위해서는 전극에 의한 전계 분포뿐만 아니라 광도파로내에서 도파광과 전계사이의 정확한 상호작용의 해석이 필요하다. 전극해석을 위하여 사용되는 방법은 등각사상법(Conformal mapping), 유한요소법(Finite Element Method), 유한차분법(Finite Difference Method) 등이 있다. 본 논문에서는 편광조절기의 전계분포를 해석하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 원층층을 포함한 다양한 구조, 특히 ridge 구조를 가진 복잡한 형태의 전극해석에 적합한 유한요소법을 도입하였다<sup>[11]</sup>.

#### 1. 유한요소법을 이용한 전극해석

본 논문에서는 비등방성 매질내의 진행파형 전극 해석 및 구동전압을 구하기 위한 수치해석 방법으로 2차원 삼각형 요소를 사용하여 유한요소법 틀을 개발하였다. M/W 진행파는 의사 TEM(quasi-TEM)모드로 가정하고 식 (5)와 같이 Laplace방정식을 풀었다.

$$\left( \epsilon_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) V_k(x, y) = 0 \quad (5)$$

이때  $\epsilon_x (=43)$  와  $\epsilon_y (=3)$  는 x-cut LiNbO<sub>3</sub>의 수평 및 수직방향의 유전상수를 나타내며, 자유 공간에서는 1로 놓는다.  $V_k(x, y)$  는 전위 분포를 나타내며, 해석 영역에서의 전위분포를 식 (6)과 같이 부분 전위함수로 나눈다.

$$V_k(x, y) = [M]^T V_e \quad (6)$$

이와 같은 함수들에 Galerkin의 변분원리를 적용

하여 최종적인 대수방정식이 얻어지고 반복법을 이용하여 전위 분포를 구했다. [N]은 2차 삼각형 요소를 위한 모양함수이고,  $V_e$ 는 요소의 노드에서 변위 벡터이다.

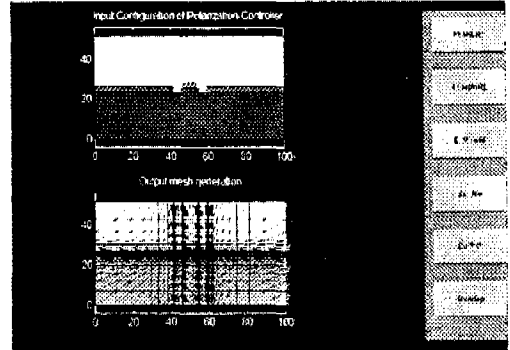


그림 4. FEM을 이용한 전극해석용 틀

그림 4는 편광조절기의 단면을 입력하여 메쉬(mesh)를 나눈 모습을 보여주는 것이다. 편심 부분이 ridge인 것을 감안하여 그 부분의 메쉬를 다른 부분에 비하여 좀 더 조밀하게 나누었고, 전계해석의 정밀도를 기하기 위하여 전극 끝 부분을 조밀하게 나누어 계산하였다.

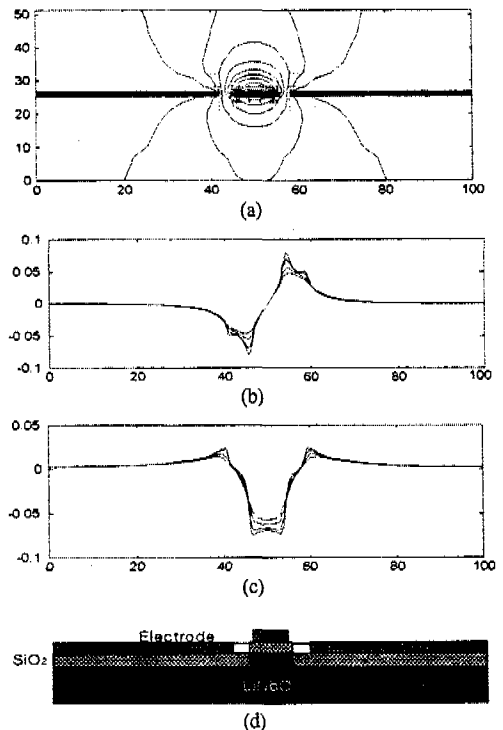


그림 5. FEM을 이용한 전극 해석 (a) 전위 분포 계산 예 (b) Ex성분 (c) Ey성분 (d) ridge 구조

그림 5(a)는 식 (5)를 이용하여 계산한 도파로 주변의 전위분포를 보여주고 있고, 그림 5(b)는 도파로 표면의 하부 깊이에 따른 E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub>의 크기 변화를 보여주고 있다. 따라서 그림 5에서 알 수 있듯이 광도파로가 모드변환기의 중심전극 바로 아래에 위치할 때 x축방향 전계와 진행광파간의 가장 효율적인 중첩을 이룰 수 있다.

2. 특성임피던스 Z<sub>c</sub>, 마이크로웨이브의 굴절율 N<sub>m</sub>

일반적으로 진행파 전극구조 광소자의 구동전력 및 광파의 대역폭은 전극의 M/W과 특성에 의존하기 때문에, 전극 설계시 특성임피던스와 M/W과의 유효굴절율을 고려하는 것이 매우 중요하다<sup>[12]</sup>. 고속 및 효율적인 변환특성을 얻기 위한 방법으로 광신호와 전기적인 변조신호의 위상속도 정합이 필요하다. 이를 위해 전극 두께와 완충층의 두께, 전극의 간격 그리고 ridge의 깊이를 조절하여 광신호의 유효굴절율과 전기적인 변조신호의 유효굴절율이 정합을 나타내는 조건을 찾아야 한다. 즉 3-dB 광변조역폭은 광파와 전기적인 변조파의 위상속도차 |V<sub>o</sub> - V<sub>m</sub>|에 근사적으로 반비례하며, 변조대역과 위상변화의 관계로부터, 무손실 전극구조의 변조대역폭 Δf는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$\Delta f \cdot L = \frac{1.3916}{|V_o - V_m|} = \frac{1.3916c}{\pi |n_o - n_m|} \quad (7)$$

여기서 L은 전극의 길이이고 V<sub>o</sub>, V<sub>m</sub>은 광파와 외부 변조파의 위상속도이며, c는 자유공간상의 빛의 속도이다. 그리고 특정 변조 주파수에서 진행파 전극의 구동전력은 전극과 전원의 특성임피던스 비 (Z<sub>o</sub>/Z<sub>c</sub>)가 클수록 저전력 구동에 유리하지만, 모든 주파수에서 완전한 모드변환을 위해서는 전원의 특성임피던스와 전극의 특성임피던스 정합이 요구된다. 즉 저전력 구동을 위해서 일반적인 전원의 특성임피던스 50Ω에 임피던스 매칭을 시켜야 하며, 광대역 변조를 위해서는 M/W과 유효굴절율이 광파의 유효굴절율 2.2에 근접하도록 소자 파라미터를 찾아야 한다.

유한요소법으로 해석된 중심전극 주위의 전위분포를 이용하여 자유공간 및 기판상의 전극에 대한 정전용량을 구하였고, 이를 이용하여 TEM형 전송선로에서 특성임피던스 Z<sub>c</sub> 및 M/W과 유효굴절율 n<sub>m</sub>을 계산하였다.

$$Z_c = \frac{1}{V_m \cdot c_c} = \frac{1}{c \cdot \sqrt{c_o \cdot c_c}} \quad (8)$$

$$n_m = \frac{c}{V_m} = \sqrt{\frac{c_c}{c_o}} \quad (9)$$

여기에서 c<sub>c</sub>, c<sub>o</sub>는 매질 및 자유공간에서 전극의 정전용량이고 FEM 전극해석을 통하여 구할 수 있다.

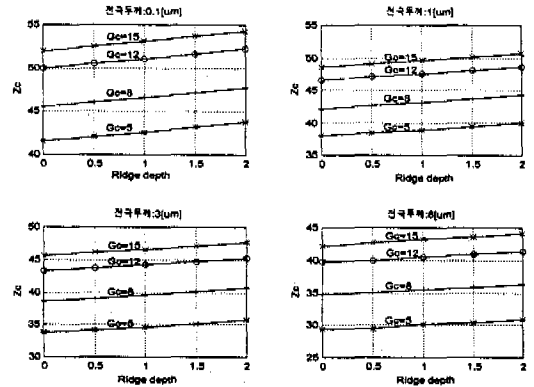


그림 6. 전극간격[μm], ridge의 깊이[μm] 및 전극두께[μm]에 따른 특성임피던스 Z<sub>c</sub>[Ω]

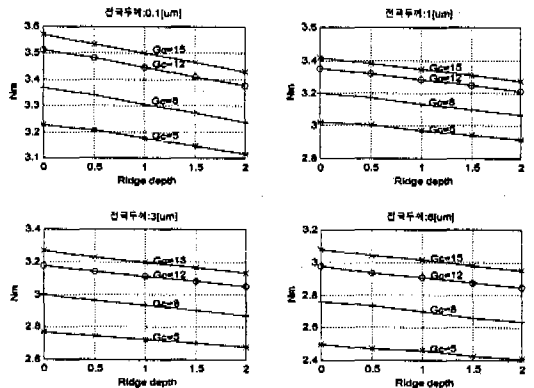


그림 7. 전극간격[μm], ridge의 깊이[μm] 및 전극두께[μm]에 따른 M/W과의 유효굴절율 N<sub>m</sub>

그림 6과 그림 7은 전극 간격, 전극 두께와 ridge의 깊이 변화에 따른 특성임피던스와 M/W과 굴절율의 변화특성을 계산한 결과이다. 위의 모의 실험에서는 완충층으로 5000 Å 두께의 SiO<sub>2</sub>(ε<sub>r</sub>=4)로 가정하였다. 보통 x-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에서 일반적인 전극의 특성임피던스는 30Ω 정도를 보이고 있다. 그림 6과 그림 7에서 특성임피던스를 증가시키기 위해서는 전극의 간격을 증가시켜야 하는데, 이와 같은 설계는 역으로 구동전압 및 M/W과의 유

효율절율을 증가시키고 있다. 그러므로 ridge의 깊이를 증가시켜서 특성임피던스를 증가시키고, M/W 파의 유효절율을 감소하게 하는 방법이 적합하다.

### 3. 중첩상수 및 구동전압

도파로에 가해지는 외부전계  $E_{ex}$ 을 알고, 입사광의 전계분포  $E_{ob}$ 를 알면, 외부전계와 광파사이의 중첩상수를 구할 수 있다. 중첩상수  $\Gamma$ 를 구하기 위해서 먼저 입사광의 정규화된 전계분포  $E_{ob}(x, y)$ 를 알아야 한다. 그러나 광이 약하게 구속되어 도파되는 경우 최저차 모드의 전계분포는 식 (10)과 같이 깊이 방향으로 Hermite-Gaussian분포를 가지고, 수평방향으로는 Gaussian분포를 가진다.

$$E_{ob}^2(x, y) = \frac{4x^2}{w_x^2 w_y \pi} \exp\left[-\left(\frac{x}{w_x}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{y-b}{w_y}\right)^2\right] \quad (10)$$

여기서  $w_x, w_y$ 는 각각 모드의 수평방향 반경 및 수직방향 깊이를 나타내고,  $p$ 는 광도파로의 수평방향 위치를 나타낸다. 식 (10)에서 광파의 세기가  $1/e$ 되는 폭은 각각  $2w_x$ 와  $1.376w_y$ 이다. 그리고 이러한 정규화 광파 외부전계에 의한 전계와의 중첩상수는 다음과 같다<sup>[14][15]</sup>.

$$\Gamma = \frac{S}{V_0} \frac{\int \int E_{ob}^2(x, y) E_{ex}(x, y) dx dy}{\int \int E_{ob}^2(x, y) dx dy} \quad (11)$$

여기에서  $S$ 는 전극사이의 간격,  $V_0$ 는 인가 전압이고,  $\Gamma$ 는 0과 1사이의 값을 가진다.

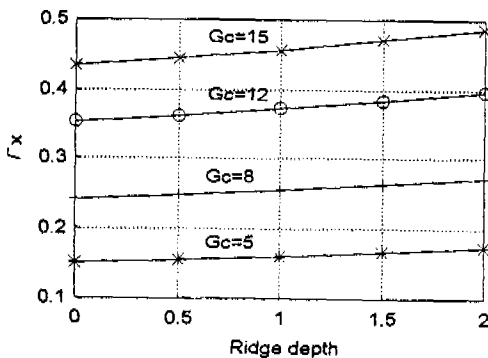


그림 8. 전극간격(μm), ridge 깊이(μm)에 따른 중첩상수(Γx)

그림 8은 ridge 깊이와 전극간격  $G_c$ 에 대한 수직방향 중첩상수의 분포를 보여주고 있다. 여기서 입사한 광파는  $w_x = 2.75\mu m$ ,  $w_y = 4.5\mu m$  TM 모드를 사용하였고, 상호작용 거리는  $15mm$ 로 사용하였다.

ridge의 깊이와 전극간격이 클수록 중첩상수가 증가하고 있다. 그러나 전극간격이 클수록 더 높은 구동전압이 요구되므로, ridge의 깊이와 전극간격, 구동전압 사이의 적절한 절충이 필요하다. 또한 본 모의 실험결과 중첩상수는 전극두께의 변화에 무관한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

앞에서 중첩상수의 증가는 편광조절기의 구동전압을 감소시킨다는 것을 언급하였다. 편광조절기의 구동전압을 계산하기 위하여 입사하는 임의의 편광모드를 가진 광의 파워에 대한편광변환된 출력광의 파워를 계산하였다. MC에 입사한 입사광이 TE 편광된 모드라 가정하고, 출력에서의 편광상태에 따른 광파의 파워는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$P_{TE} = 1 - \frac{x^2}{x^2 + \delta^2} \sin^2(\sqrt{x^2 + \delta^2} L_C) \quad (12)$$

$$P_{TM} = \frac{x^2}{x^2 + \delta^2} \sin^2(\sqrt{x^2 + \delta^2} L_C) \quad (13)$$

여기에서  $x$ 와  $\delta$ 는 인가전압  $V_{c1}, V_{c2}$ 와  $\Delta\beta$ 의 선형함수로 쓸 수 있다.

$$x = A_1(V_{c1} - V_{c2}/2) + A_2 V_{c2} \quad (14)$$

$$\delta = \Delta\beta/2 + B_1(V_{c1} - V_{c2}/2) + B_2 V_{c2} \quad (15)$$

여기에서  $A_1 = \pi\Gamma_x n_o^3 r_{61} / \lambda G_C$ 이고,  $B_2 = \pi\Gamma_y n_o^3 r_{22} / \lambda(W_0 + 2G_C)$ 이다. 식 (14)의  $A_2$ 와 식 (15)의  $B_1$ 은 전극과 도파로 사이의 배열이 맞지 않을 때의 파라미터이므로 본 모의 실험에서는 완전한 배열이 이루어졌다고 가정하고 무시하였다.

앞에서 구한 중첩상수를 이용하여  $A_1$ 를 구하였고,  $B_2$ 와  $\Delta\beta$ 는 x-cut LiNbO<sub>3</sub>에 1000Å 두께의 Ti strip line을 내부확산하였을 때 보편적으로 각각 0.025rad/Vcm와 3.7rad/cm를 가진다<sup>[13]</sup>. 또한  $\Delta\beta$ 에 의해 발생하는 모드간의 복굴절을 해소하기 위해서는  $\delta$ 가 영(zero)에 가까운 값을 가져야 하므로  $V_{c2} = -75V$ 로 설정하였다. ridge형 편광조절기의 설계변수들은  $G_c = 5\mu m$ , 전극 두께를  $3\mu m$ 로 하고, ridge깊이(R\_th) 0, 0.5, 1, 1.5, 2μm에 대하여 전압  $V_{c1}$ 을 변화시키면서 편광이 이루어지는 구동전압을 구하였다. 그리고 입사광파의 파장을  $1.5\mu m$ ,  $n_o = 2.2$ 로 하였다.

이상의 파라미터들로 계산한 결과, 전극간격이 5μm일때 ridge의 깊이가 0, 0.5, 1, 1.5, 2μm인 경우

각각의 구동전압이 22.9, 22.2, 21.5, 20.8, 20.0V가 된다. 그림 9는  $V_c$ 가 0V일때의 편광조절기의 출력단에서 나오는 광의 출력파워를 도시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 TE/TM 모드간의 복굴절이 전혀 보상되어 있지 않기 때문에, 편광조절능력이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 그림 10은  $V_c$ 가 -75V일 때 각각의 ridge의 깊이에 대하여  $V_c$ 를 변화하면서 구한 편광조절기의 광의 출력 파워를 표시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 편광조절기의 구동전압이 ridge의 깊이가 0 $\mu$ m인 coplanar형의 경우 22.9V를 가지는 반면, ridge의 깊이가 2 $\mu$ m인 경우는 20.0V를 보인다. 이것으로서 ridge의 깊이가 증가할수록 구동전압이 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

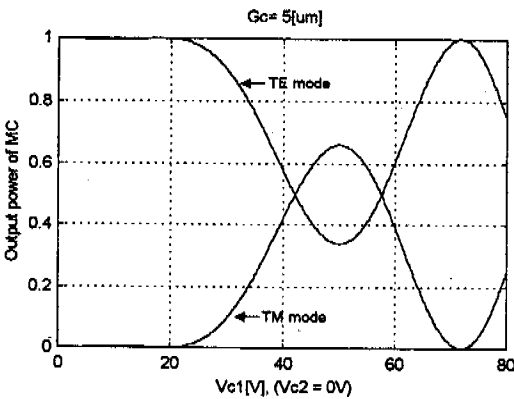


그림 9.  $G_c=5\mu$ m, ridge 깊이 2 $\mu$ m,  $V_c2=0$ V 일때의 편광 조절기의 출력파워

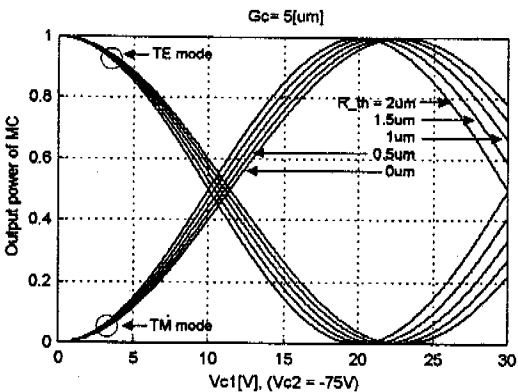


그림 10. Ridge 깊이에 따른 편광조절기의 출력 파워

### V. 결론

본 논문에서는 집적광학 방식의 strip 전극구조의

Ti:LiNbO<sub>3</sub> ridge형 도파로 구조를 가진 편광조절기의 이론과 해석에 관하여 연구하였다. 진행파형 전극구조를 가지는 편광조절기에 ridge형 도파로 구조를 채택하여 도파로의 집광도를 높이고, 전계를 가했을 때 외부전계와 인사광의 중첩상수를 증가시켜서 구동전압을 낮추었다. ridge형 편광조절기의 제작에 앞서, 유한요소법을 이용하여 도파로 내의 전계해석을 위한 전극해석 틀을 개발하였다. 그리고 이 수치해석 틀을 이용하여 광신호와 전기적인 신호의 위상속도 정합 조건을 얻기 위하여 특성임피던스와 M/W파의 굴절율을 각각 ridge의 두께, 전극 간격, 전극 두께에 대하여 계산하였다. ridge의 깊이가 증가할수록, 전극두께가 감소할수록 특성임피던스는 증가하고, M/W파의 굴절율은 감소하는 것을 확인하였다. 또한 ridge의 깊이가 증가할수록 진행광파와 외부전계의 중첩상수가 증가함을 알 수 있었고, 이로 인해 구동전압을 감소시킬 수 있음을 보였다. 구동전압은 ridge의 깊이가 0, 0.5, 1, 1.5, 2 $\mu$ m인 경우에 각각 22.9, 22.2, 21.5, 20.8, 20.0V이다. 즉 ridge의 깊이가 0 $\mu$ m인 coplanar형 편광조절기에 비하여 ridge의 깊이가 2 $\mu$ m인 경우 약 3V의 구동전압의 감소를 보이고 있다. 이것은 ridge의 깊이를 증가할수록 구동전압이 감소하고 있음을 의미한다.

### 참고 문헌

- [1] N. G. Walker and G. R. Walker, "Polarization Control for Coherent Communications," J. of Lightwave Tech., vol. 8, no. 3, pp. 438-458, Mar. 1990.
- [2] 유재왕, Ridge형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로를 이용한 편광조절기에 관한 연구, 석사학위 논문, 전북대학교, 1998.
- [3] R. Ulrich and M. Johnson, "Single-Mode Fiber-Optical Polarization Rotator," Appl. Opt., vol. 18, no. 11, pp. 1857-1861, 1 June 1979.
- [4] R. C. Alfemess and L. L. Buhl, "Waveguided Electro-Optic Polarization Transformer," Appl. Phys. Lett. 38(9), pp. 655-657, 1981.
- [5] E. L. Wooten, Modelling of Optical Guided Wave Devices in Lithium Niobate Using Test Structures for Process Characterization., Ph. D. dissertation, University of California, San

Diego, 1994.

[6] C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Overlap Integral Factors in Integrated Optic Modulators and Switches," *J. of Lightwave Tech.*, vol. 7, no. 7, pp. 1063-1070, July 1989.

[7] W. L. Chen, R. S. Chen, J. H. Lee, and W. S. Wang, "Lithium Niobate Ridge Waveguides by Nickel Diffusion and Proton-Exchanged Wet Etching," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 11, pp. 1318-1320, Nov. 1995.

[8] W. P. Huang, "Coupled-mode Theory for Optical Waveguides : An Overview," *Optical Soc. Am. A.*, vol. 11, no. 3, pp. 963-983, Mar. 1994

[9] T. Kawazoe, K. Satoh, I. Hayashi, and H. Mori, "Fabrication of Integrated-Optic Polarization Controller using Z-Propagating Ti:LiNbO<sub>3</sub> Waveguides," *J. of Lightwave Tech.*, vol. 10, no. 1, pp. 51-56, Jan. 1992.

[10] F. Heismann, "Analysis of a Reset-Free Polarization Controller for Fast Automatic Polarization Stabilization in Fiber-Optic Transmission systems," *J. of Lightwave Tech.*, vol. 12, no. 4, pp. 690-699, Apr. 1994.

[11] 허현, 반재경, "H:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기에서 Parylene 버퍼층의 유용성," *전자공학회논문지*, vol. 34(D), no. 8, pp. 80-86, 1997.

[12] H. Chung, W. S. C. Chang, and, E. L. Adler, "Modelling and Optimization of Traveling-wave LiNbO<sub>3</sub> Interferometric Modulators," *IEEE J. of Quantum Electron.*, QE-27, no. 3, pp. 608, 1991.

[13] H. Chung, W. K. Burns, S. C. Chang, and E. L. Adler, "Modelling and Optimization of Traveling-Wave LiNbO<sub>3</sub> Interferometric Modulators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 608-617, Mar. 1991.

[14] K. Kawano, "Effect of Ridge Depth on Characteristics of shielded Velocity-Matched Ti:LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulators with Ridge Structures," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 5, no. 9, pp. 993-995. 1993.

[15] G. K. Gopalakrishnan, C. H. Bulmer, W. K. Burns, R. W. McElhanon, and A. S.

Greenblatt, "40GHz, Low Half-wave Voltage Ti:LiNbO<sub>3</sub> Intensity Modulator," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 9, pp. 826-827, 1992.



문춘기(Moon Choon-ki) 정회원  
1997년 2월 : 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
1997년 2월~현재 : 전북대학교 대학원 전기공학과 석사과정  
<관심분야> 광통신, 집적광학소자 설계 및 제작 등

유재왕(Jac-wang Yu) 정회원  
1996년 2월 : 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
1998년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
1998년 2월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사과정  
<관심분야> 광통신, 광섬유 제작 등

허현(Hyun Huh) 정회원  
1992년 2월 : 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
1994년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
1998년 8월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)  
<관심분야> 광통신, 집적광학소자 설계 및 제작, 광도파로 해석 등



반재경(Jae-kyung Pan) 정회원  
1980년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1982년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1987년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1991년~1992년 : 미국 Ohio 주립대학(Post Doc.)  
1987년~현재 : 전북대학교 전기전자제어공학부 교수, 전북대학교 전기전자회로합성연구소 연구원  
<관심분야> 광통신 시스템, 집적광학 소자 등