

Ridge형 도파로구조 X-cut LiNbO₃ 광변조기의 광대역 설계

準會員 허 현*, 김 희 주* 正會員 반 재 경*

Wide-band Design of X-cut LiNbO₃ Optical Modulator Employing a Ridge Waveguide

Hyun Huh*, Hee-Ju Kim*, Jae-Kyung Pan* *Regular Members*

요 약

X-cut y-propagation LiNbO₃ 광변조기를 해석하고, 광대역 변조특성을 얻기 위한 설계조건을 구한다. 먼저, 구성된 전극에 대하여 최대 변조효율을 얻기 위한 광도파로의 최적위치를 찾고, 다양한 설계조건에 따른 구동전압, 특성 임피던스, M/W 변조파 유효굴절율을 계산하였으며, 이와 같은 수치적 해석을 위해 유한요소법(FEM; Finite Element Method)을 사용하였다. 그리고 사용된 설계 툴의 유용성을 확인하기 위하여 Becker의 결과와 비교평가 하였다. 본 논문에서는 ridge형 도파로구조의 x-cut LiNbO₃ 광변조기에 대한 다양한 계산을 통하여, 결과적으로 1.3 μ m의 광신호에 대하여 18 V·cm의 구동전압과 특성임피던스 48.13 Ω , M/W(microwave) 변조파 유효굴절율 2.168을 가지는 x-cut LiNbO₃ 광변조기를 설계하였다.

ABSTRACT

X-cut y-propagation LiNbO₃ optical modulator is analyzed by finite element calculation. The purpose of this trial is the design of wide-bandwidth x-cut LiNbO₃ optical modulator with ridge waveguide, which was only applied to z-cut LiNbO₃ optical modulator. The simulation tool is examined by the comparison between our results and Becker's. And we consider the optimum position of optical waveguide to electrodes for decreasing the driving voltage. The calculated driving-voltage, characteristic impedance and microwave effective index at 1.3 μ m optical wavelength are 18 V·cm, 48.13 Ω and 2.168, respectively.

*전북대학교 전기·전자·제어공학부
Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University
論文番號: 96339-1029
接受日字: 1996年 10月 29日

I. 서 론

앞으로 정보화 사회에서 고속, 대용량 전송요구에 효과적으로 대처하기 위한 방법의 하나로 광통신 시스템에 대한 연구가 국내외적으로 활발하다. 특히 광통신 시스템의 광대역성을 유효 적절하게 이용하기 위해 전송능력을 증가시키는 연구가 진행중이며, 이에 Mach-Zehnder LiNbO₃ 광변조기는 고속, 광대역 광통신 시스템을 위해 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. LiNbO₃에서 광 도파로의 형성은 1000℃ 정도의 고온에서 Ti과 같은 금속을 확산시키거나, 상대적으로 낮은 온도(~<400℃)에서의 공정이 가능한 양자교환법에 의해 이루어지고 있다. 그리고 이러한 변조기들은 일반적으로 CPW(coplanar waveguide)가 진행파 전극으로 사용되고 있으며, 광대역 특성을 얻기 위한 효율적인 방법으로 전극두께 및 SiO₃ 버퍼층을 두껍게 형성시켜 CPW에 적용하고 있다. 이와 같은 설계는 M/W(Microwave) 변조파의 유효굴절율을 도파광의 유효굴절율에 맞추기 위해 사용되고 있으나, 두꺼운 버퍼층에 의해 구동전압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 CPW전극의 특성임피던스를 50Ω으로 맞추기 위한 설계방법도 제시되고 있으며, 특히 ridge형태의 도파로를 도입하여 ridge의 식각깊이, 전극 및 버퍼층의 두께를 상호적으로 조절하여 구동전압, 특성임피던스 및 M/W 변조파 유효굴절율을 조절하기 위한 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 그리고 대부분 이와 같은 접근이 z-cut LiNbO₃소자에 집중되어 있다. 반면에 설계에 따른 광도파로의 정확한 공정이 가능한 x-cut LiNbO₃ 광변조기에서 이러한 접근은 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 z-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기 설계개념들을 x-cut y-propagation Ti:LiNbO₃ 광변조기에 확대 도입하여 해석하고, 특히 저전압, 광대역 변조특성을 얻기 위해 ridge형 광도파로 구조의 설계개념을 도입한 광변조기의 해석결과를 제시하고자 한다. 즉 50Ω 특성임피던스 및 위상속도 정합을 가지면서 저전압 구동특성을 얻기 위한 소자 파라미터를 구한다. 보통 x-cut LiNbO₃ 기판 위에서 일반적인 전극의 특성임피던스는 30Ω정도를 보이고 있다. 이를 증가시키기 위해 전극의 간격을 증가시켜야 하며, 이와 같은 설계는 역으로 구동전압 및 M/W 변조파의

유효굴절율을 증가시킨다. 또한 같은 전극간격에 대해서도 도파로의 위치에 따라 필요한 구동전압이 변화된다. 특히 특성임피던스 및 위상속도가 정합되었을 때 변조대역폭을 가장 크게 제한하는 요소는 전극의 도체손실이다. 일반적으로 x-cut구조의 변조기는 광도파로 폭에 의한 중심전극의 폭이 제한되는 z-cut 구조에 비하여 중심전극의 폭을 크게 증가시킬 수 있으므로, 전극의 도체손실을 더욱 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 먼저 구성된 전극에 대하여 최대 변조효율을 얻기 위한 광도파로의 최적위치를 찾고, 다양한 설계조건에 따른 구동전압, 특성임피던스, M/W 변조파 유효굴절율을 계산하였으며, 이와 같은 수치적 해석을 위해 유한요소법(FEM; Finite Element Method)을 사용하였다.^{1,2,3)} 결과적으로 18 V·cm의 구동전압과 특성임피던스 48.13Ω, M/W 변조파 유효굴절율 2.168을 가지는 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기를 설계하였다.

II. 해 석

1. x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기

LiNbO₃를 기판으로 사용한 광변조기는 가장 큰 전기광학계수인 r₃₃(30pm/V)를 이용하며, 매질의 결정 z축에 따라 편광된 빛을 같은 방향의 M/W 변조파 전계에 의하여 굴절률을 식(1)과 같이 변화시킨다. 이때 n₃₃는 매질의 extraordinary 굴절률이다.

$$\Delta n = -(1/2) n_{33}^3 r_{33} E_3 \quad (3)$$

z-cut 변조기의 경우 수직방향성분의 외부전계를 가하여 TM모드의 광파를 위상변조시키는 반면에, x-cut 변조기의 경우에는 수평방향성분의 외부전계에 의하여 TE모드의 광파를 변조시킨다. 그림 1에서는 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기를 나타내고 있으며, 수평방향의 외부전계성분이 소자의 변조특성을 결정한다.

따라서 수평방향성분의 전계와 광파와의 상호작용을 크게 해주는 전극구조의 설계가 필요하며, 상호작용의 평가인자로 overlap 적분상수를 사용하고 있다.^{4,5)}

2. FEM에 의한 진행파형 전극해석

본 논문에서는 비등방성 매질내의 진행파형 전극해

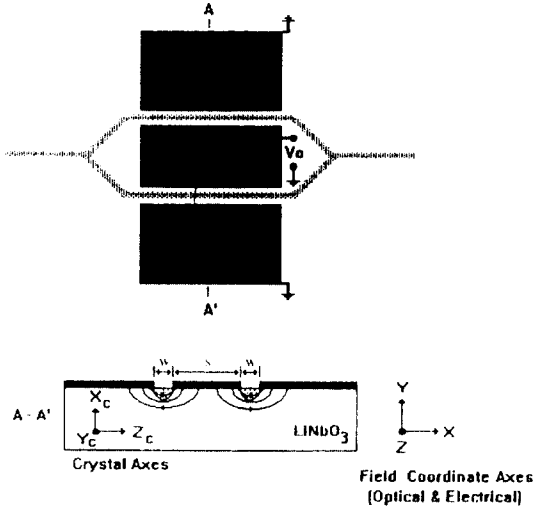


그림 1. x-cut LiNbO₃ 위에 구성된 광변조기
Fig. 1 Cross-sectional view of optical modulator on x-cut LiNbO₃

석을 위한 수치해석 도구로써 2차원 삼각형요소를 사용한 FEM을 이용하였다.^[2,3] M/W 변조파는 quasi-TEM 모드로 가정하고 식(2)와 같은 Laplace방정식을 풀었다.

$$(\epsilon_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2}{\partial y^2}) \phi(x, y) = 0 \quad (2)$$

이때 ϵ_x 와 ϵ_y 는 x-cut LiNbO₃의 수평 및 수직방향의 유전상수를 나타내며, 자유공간에서는 ϵ_x 와 ϵ_y 를 1로 놓는다. 그리고 $\phi(x, y)$ 는 전위분포를 나타내며, 해석 영역에서의 전위분포를 식(3)과 같은 부분 전위함수로 나눈다.

$$\phi(x, y) = [N]^T \phi_e \quad (3)$$

이와 같은 함수들에 Galerkin의 변분원리를 적용하여 최종적인 대수방정식이 얻어지고 반복법을 이용하여 전체 전위분포를 구하였다. [N]은 2차 삼각형 요소를 위한 모양함수이고 ϕ_e 는 요소의 노드점 전위벡터이다.

일반적으로 진행파형 광변조기의 구동전력 및 변조대역은 전극의 M/W와 특성에 의존되기 때문에, 전극 설계시 특성저항, 변조파의 유효굴절률 등을 고려하

는 것이 매우 중요하다. TEM형 전송선로에서 특성저항 Z_c 및 M/W 유효굴절률 n_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_c = \frac{1}{v_m \cdot C_c} = \frac{1}{v_o \cdot \sqrt{c_o \cdot c_c}} \quad (4)$$

$$n_m = \frac{v_o}{v_m} = \sqrt{\frac{c_c}{c_o}} \quad (5)$$

여기서 v_o 및 v_m 은 자유공간에서 광 및 변조파의 속도이며, c_c 및 c_o 는 매질 및 자유공간에서 정전용량이다. 따라서 전극에 의한 정전용량 c_c 및 c_o 를 FEM 전극해석을 통하여 구할 수 있다.

3. Overlap Integral Factors and Voltage-Length Product

일단 특성임피던스 및 M/W 변조파의 위상속도가 충분히 매칭 되었다면, 다음으로 구동전압과 변조길이의 곱과 관련된 변조기의 효율을 평가하게 된다. 외부 전극에 의한 x-cut LiNbO₃ 광변조기의 인가전압 V 에 따라서 식(1)을 식(6)과 같이 중첩상수 Γ 를 이용하여 나타낼 수 있고, 이에 따른 변조기 반파전압 V_π 는 식 (7)로 나타내어진다. 정수 2는 coplanar 전극의 push-pull 결과를 나타낸다.

$$\Delta n = -(1/2) n_{33}^3 r_{33} \Gamma \frac{V}{W} \quad (6)$$

$$V_\pi = \lambda \cdot W / 2(n_{33}^3 \cdot r_{33} \cdot L \cdot \Gamma) \quad (7)$$

이때 W 는 두 전극사이의 간격을 나타내고, Γ 는 0과 1사이의 값을 가진다. 수치적으로 중첩정수를 구하기 위하여 식 (8)과 같이 정규화된 광파를 이용하며, 광이 약하게 구속되어 도파하는 경우 깊이 방향으로 Hermite-Gaussian 분포를 나타내고 수평방향으로는 Gaussian분포를 나타낸다.

$$E_{op}(x, y)^2 = \frac{4}{[w_x \cdot w_y^3 \cdot \pi]} \cdot y^2 \exp[-\left(\frac{x-p}{w_x}\right)^2] \cdot \exp[-\left(-\frac{y}{w_y}\right)^2] \quad (8)$$

여기서 w_x, w_y 는 각각 수평평면 모드의 반경 및 수직방향에서 모드 깊이를 나타내고, p 는 광도파로의 수

평방향 위치를 나타낸다. 그리고 이러한 정규화 광도 파로를 구성시켜야 한다. 그림 2에서는 아래 전극구조에 대하여 FEM 및 수치적분을 이용하여 전계 E_x 의 y

$$\Gamma(p) = \frac{\frac{W}{V_o} \iint E_{op}(x, y)^2 \cdot E_e(x, y) dx \cdot dy}{\iint E_{op}(x, y)^2 dx \cdot dy} \quad (9)$$

효율적인 변조특성을 얻기 위해서는 x-cut 변조기의 경우 수평방향 전계의 세기 E_x 가 가장 큰 위치에 광도 파로를 구성시켜야 한다. 그림 2에서는 아래 전극구조에 대하여 FEM 및 수치적분을 이용하여 전계 E_x 의 y

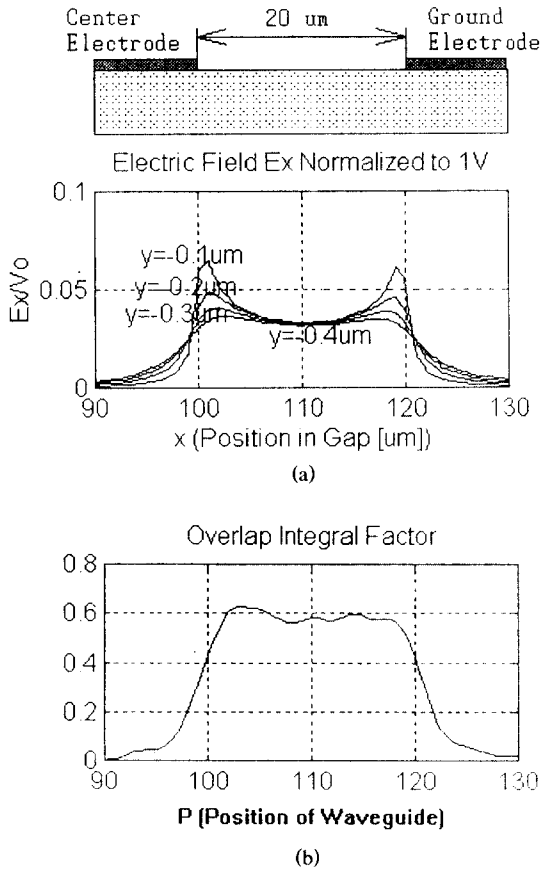


그림 2. (a) 수평방향 외부전계의 분포 및 (b) 광도파로 위치에 따른 overlap integral factor
Fig. 2 (a) Distribution of vertical electric field and (b) Overlap integral factors as position of optical waveguide

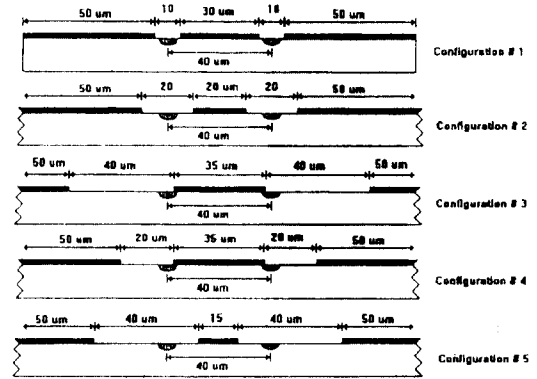


그림 3. Becker의 5가지 Mach-Zehnder 광변조기
Fig. 3 Becker's Mach-Zehnder optical modulators

표 1. 등각 사상법, 실측값, FEM에 의한 V_π 비교
Table 1. Comparison of V_π calculated by CM, measuring value and FEM

전극형태	Becker's Result		FEM 계산 V_π
	CM 계산 V_π	측정 V_π	
config. 1	7.99 V	6.0 V	6.336 V
config. 2	12.96 V	12.0 V	11.965 V
config. 3	12.32 V	13.0 V	14.567 V
config. 4	10.33 V	9.0 V	9.726 V
config. 5	18.21 V	24.0 V	21.818 V

의 위치에 따른 분포 및 광도파로 중심의 위치 p에 따른 중첩정수를 표시하고 있다. 즉 중심전극(좌측)의 약간 우측에서 가장 큰 overlap 적분상수값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 FEM 전극해석 결과의 타당성을 평가하기 위하여 Becker⁽⁶⁾의 등각사상법(CM:conformal mapping method)에 의한 수치해석 결과 및 실험결과와 비교하였다.

그림 3에서는 비교를 위한 5가지의 Mach-Zehnder 광변조기를 나타내었으며, 표 1에서는 Becker에 의한 결과와 본 논문에서 FEM을 이용한 결과를 비교 표현하였다. 이때 $w_x = 2.25\mu\text{m}$, $w_y = 2.54\mu\text{m}$ 광모드를 사용하였고, 상호작용 거리는 5.25 mm로 사용하였다. 결과를 통해서 알 수 있듯이 FEM에 의한 V_π 의 계산이 CM에 의한 결과에 비하여 실제 측정치에 보다

가까움을 알 수 있다. 그리고 config. 2와 config. 4, config. 3과 config. 5의 비교를 통해서 같은 전극간격(같은 특성임피던스)에 대해서도 광도파로와 중심전극의 상대적 위치에 따라서 구동전압이 달라짐을 확인하였다. 즉 중심전극이 광도파로 가까이 위치할 수록 구동전압이 낮아짐을 알 수 있다.

Ⅲ. 저전압, 광대역 광변조기 설계

본 논문에서는 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기를 중심으로 다양한 설계조건에 따른 구동전압, 특성임피던스, M/W 변조파 유효굴절율을 계산하고, 이와 같은 광변조기 해석결과에 따라 가장 적절한 설계사양을 추출하고 소자의 성능을 예측한다.

1. 광변조기 설계파라미터

광변조기의 설계를 위한 파라미터로는 중심전극 폭 S, 중심전극과 접지전극의 사이간격 W, 버퍼층의 두께 BT 및 전극의 두께 T 등이 있으며, 특히 최근에는 LiNbO₃ 식각을 통한 ridge깊이 RT의 조절을 통해 소자특성을 개선하려는 노력이 이루어지고 있다. 이와 같은 설계인자들은 상호 복합적인 작용을 통해서 소자의 특성을 변화시킨다. 그림 4는 x-cut 광변조기에 서 적용 가능한 여러 설계 파라미터들을 표시하였다.

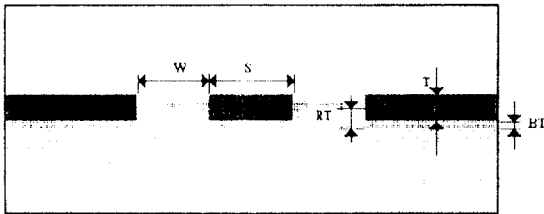


그림 4. x-cut LiNbO₃ 광변조기의 설계파라미터
Fig. 4 Design parameters of x-cut LiNbO₃ optical modulator

일반적으로 전극의 도체손실을 감소시키기 위해서는 전극의 두께 및 중심전극의 폭을 증가시키면 된다. 특히 x-cut LiNbO₃를 이용한 광변조기는 가운데 전극의 폭을 z-cut 형태에 비하여 넓게 이용할 수 있기 때문에 도체 손실 면에서는 큰 장점을 가질 수 있다. 그

리고 구동전압의 감소를 위해서는 버퍼층을 얇게, 외부전계의 중첩을 크게 할 수 있는 위치에 도파로 형성 및 ridge형태의 구조를 이용한다.

2. 설계조건에 따른 해석결과

Becker의 모델에 따른 구동전압, 특성임피던스, M/W 변조파의 유효굴절율 결과를 통해서 본 논문에서는 그림 4와 같은 구조의 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기를 설계하여 해석하였다. 기본적으로 S = 16μm, W = 15μm, BT = 1μm로 고정하였고, 구동전압 V_π를 구하기 위하여 참고문헌[7]에서 발표한 결과 중 다음 조건에 따른 광도파로 모드 형태를 계산에 이용하였다.

- ▶ Ti 폭 및 두께 6 μm, 850Å
- ▶ 확산시간 6 hr
- ▶ 확산온도 1050℃
- ▶ 사용파장 1.3μm
- ▶ w_x = 3μm, w_y = 3.5μm

이와 같은 기본조건에서 전극의 두께를 1μm, 3μm, 5μm, 10μm로 조절하였고, ridge 깊이를 0μm, 1μm, 2μm, 3μm, 4μm로 조절하면서 각각의 경우에 대하여 구동전압 V_π, M/W 변조파 유효굴절율 n_m 및 특성임피던스 Z_c를 계산하였다.

그림 5에서는 이와 같은 설계조건에 따른 광변조기 특성을 나타내었다.

그림 5(a)는 반파구동전압, 상호작용 거리의 곱을 ridge 깊이 및 전극두께에 따른 특성을 나타내고 있다. 전극의 두께는 구동전압에 무관함을 알 수 있었고, ridge 깊이에 따라 중첩인자가 증가함으로 인해서 구동전압은 감소됨을 확인하였다. 그리고 그림 5(b)는 특성임피던스의 특성을 나타내고 있는데, ridge깊이에 따라서 거의 일정한 특성을 나타내고 있다. 이것은 그림 4의 구조에서 ridge 깊이에 의한 전극주위의 굴절율이 큰 변화를 일으키지 않기 때문에 일정한 특성을 나타내고 있다. 그러나 전극두께에 따라서는 특성임피던스가 감소함을 확인하였다. 마지막으로 그림 5(c)에서는 M/W 유효굴절율을 나타내고 있는데 특성임피던스와 마찬가지로 ridge 깊이 변화에 의한 특성변화를 기할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 6과 같은 구조에 대하여 같은 방식으로 소자

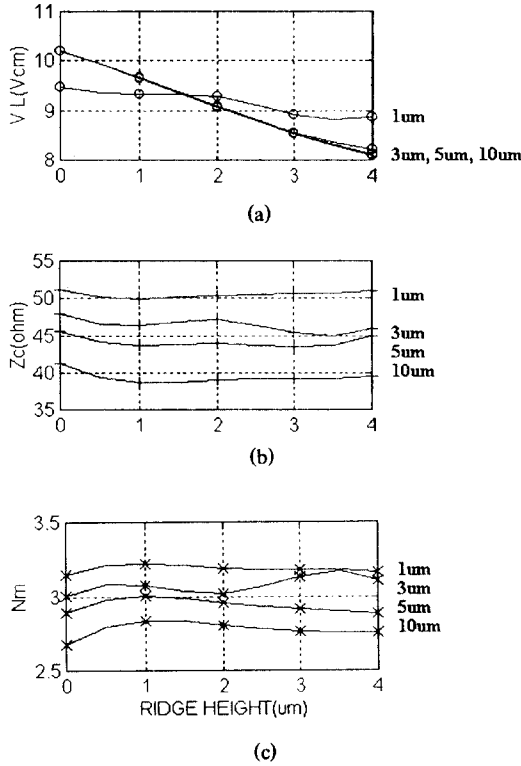


그림 5. Ridge 깊이 및 전극두께에 따른 (a) 반파전압과 상호작용 길이의 곱, (b) 특성 임피던스, (c) M/W 유효굴절율.

Fig. 5 (a) Half wave voltage and interaction length product, (b) characteristic impedance and (c) microwave effective index as ridge depth and electrode thickness

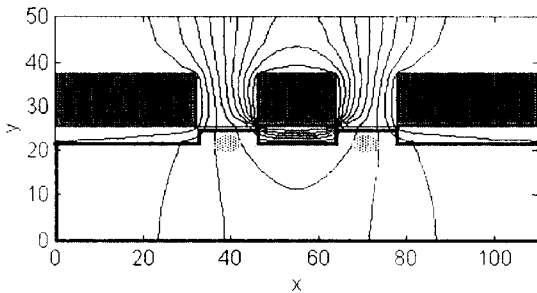


그림 6. 광대역 변조를 위한 x-cut LiNbO₃ 광변조기 및 전위분포

Fig. 6 x-cut LiNbO₃ optical modulator for wideband modulation and electrical potential distribution

특성을 알아보았다.

전극두께 10μm, ridge 깊이 3μm, 및 버퍼층은 광도파로 위에서는 1μm, 전극아래의 경우 4μm인 설계조건에서 특성임피던스 $Z_c = 48.13\Omega$, M/W 유효굴절율 $n_m = 2.168$, 그리고 구동전압 $V_\pi \cdot L = 18.12$ (V·cm)의 소자특성을 얻게 되었다. 이러한 결과는 구동전압 면에서 비슷한 조건의 z-cut LiNbO₃ 광변조기^[11]에 비하여 2배정도의 구동전압이 요구됨을 알 수 있다. 그러나 x-cut LiNbO₃를 이용한 광변조기는 가운데 전극의 폭을 z-cut 형태에 비하여 넓게 이용할 수 있기 때문에 도체손실 면에서는 큰 장점을 가질 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 광변조기 설계개념들을 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기에 확대 도입하여 해석하고, 저전압, 광대역 변조특성을 얻기 위한 설계조건을 알아보았다. 먼저 구성된 전극에 대하여 최대 변조효율을 얻기 위한 광도파로의 최적위치를 찾고, Becker의 실험결과를 비교하여 평가하였다. 다양한 설계조건에 따른 구동전압, 특성임피던스, M/W 변조파 유효굴절율을 계산하였으며, 이와 같은 수치적 해석을 위해 FEM을 사용하였다. 결과적으로 18 V·cm의 구동전압과 특성임피던스 48.13Ω, M/W 변조파 유효굴절율 2.168을 가지는 x-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기를 설계하였다. 이와 같은 결과는 특성임피던스와 유효굴절율의 정합이 이루어졌으며, 따라서 변조 주파수에 따른 변조광파의 ripple이 억제되고 광대역 변조가 가능하리라 생각된다. 그러나 아직 구동전압이 z-cut Ti:LiNbO₃ 광변조기에 비하여 높기 때문에 더 지속적인 연구가 필요하며, 특히 중심전극 아래의 버퍼층을 얇게 하면서 50Ω 및 위상속도정합 특성을 이루는 설계가 가능하다면 이 구조에 의해서도 저전압, 광대역 변조기의 구현이 가능하리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A Broadband Ti:LiNbO₃ Optical Modulator with a Ridge Structure", J. Lightwave Technol., vol. 11, pp. 1164-1168, 1995.

