

論文93-30A-2-5

전기광학효과를 이용한 광도파로형 TE-TM 모드 변환기에 관한 연구

(A Study on Electrooptic Guided-Wave TE-TM Mode Converter)

鄭 洪 植*

(Hong Sik Jung)

要 約

LiTaO₃ (lithium tantalate)의 off-diagonal 전기광학 계수를 이용해서 광도파로형 TE/TM 모드 변환기를 제작하였다. 입사모드는 전기광학적으로 야기된 off-diagonal 직교 편파에 의해서 다른 직교 모드와 결합하게 된다. 본 연구에서 이용한 LiTaO₃는 LiNbO₃에 비해 복굴절이 매우 작기 때문에 위상 정합형 전극의 주기를 상대적으로 길게 제작할 수 있고, 따라서 더 넓은 동작대역을 제공하게 된다. 본 연구에서 제시한 전극구조는 Bragg Coupling형 위상정합 방법을 이용하였으며, 0.63 μ m He-Ne Laser에 대해서 90% 이상의 변조효율을 25V 동작전압에서 관찰하였다.

Abstract

A guided-wave TE to TM mode converter was demonstrated by using of the off-diagonal electrooptic coefficients in LiTaO₃. The input mode is coupled to the other orthogonal mode by the electrooptically induced off-diagonal polarizability. Compared with LiNbO₃, LiTaO₃ provides a smaller birefringence and thus a larger phase match period and larger optical bandwidth. A novel electrode structure allowed a first-order Bragg-coupling phase matching. TE/TM mode conversion efficiency of 90% at 25 [V] was demonstrated with $\lambda=0.63\mu$ m He-Ne laser.

1. 서 론

반도체 레이저 (semiconductor laser)와 광섬유 (optical fiber)가 1960년도에 소개된 이래, 이 두분야의 지속적인 발전에 힘입어 광통신은 고도 정보화 사회의 통신망에 중추적인 역할을 담당하게 되었다.^[1]

음성, 저속데이터, 정지영상등 협대역 서비스 뿐만 아니라 고속데이터, 고품질의 동영상과 같은 광대역 서비스 수요도 급증할 것으로 전망되며, 특히 앞으로 국내에서 실현될 광대역 종합정보통신망 (B-ISDN) 추세에 비추어 보면 통신용량의 비약적 증가가 예측됨에 따라 광전송용량의 대용량화가 필요하다. 운송 용량을 비약적으로 확대시키기 위해서, 변조 (modulation)와 복조 (demodulation) 기술을 이용한 다중화 (multiplexing)의 필요성이 인식되었고, 이에 따라 TE/TM 모드변환기 (mode converter)는 디멀티플렉서 (demultiplexer), 광변조기로서의 응용 가

*正會員, 弘益大學校 電子電算機工學科
(Dept. of Electronic and Computer Eng.,
HongIk Univ.)
接受日字 1992年 9月 2日

능성 때문에 많은 연구가 진행되었다.^[2,3]

지금까지 보고된 TE/TM 모드 변환기는 LiNbO₃ (lithium niobate)의 off-diagonal 전기광학계수 r₅₁과 위상정합형 전극구조를 이용해서 제작되었다.^[4,5] 여기서 사용된 전극구조는 복굴절(birefringence)에 반비례 하여 약 7μm 정도의 짧은 주기 때문에 전극설계 및 제작에 많은 어려움과 제약을 주고 있으며, 또한 LiNbO₃의 광손상 임계값(optical damage threshold)이 비교적 낮아서, 동작특성에 많은 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 LiNbO₃ 보다 더 큰 광손상 임계값과 더 작은 복굴절율을 가지고 있는 LiTaO₃ (lithium tantalate)를 이용해서 TE/TM 모드 변환기를 제작하였고, 0.633 μm He-Ne 레이저를 이용해서 동작특성을 검토 분석하였다.^[6] 모드변환에 필요한 굴절을 변화, 즉 변조 전압을 이론적으로 유추하기 위해, coupled-mode analysis를 이용하였으며, Ti 확산방법으로 LiTaO₃에 광도파로를 제작하였다.

II. 이론

전기광학 효과 (electrooptic effect)를 이용한 TE/TM 모드변환기는 광도파로 (optical waveguide)를 지나는 두 직교편파 (orthogonal polarization-wave)사이의 모드결합에 의해서 동작되며, 이러한 결합은 인가된 전계에 의해서 생성된 전기광학 섭동 (electrooptic perturbation)에 의해서 가능하다. 따라서 일반적인 모드결합을 검토한 다음, 전기광학 효과에 의한 모드결합을 고려하기로 하였다. 서로 다른 속도정수를 갖는 광파 (optical wave) a(z, x, t), b(z, x, t)를 고려하자. 여기서 언급된 z는 결정축과 무관하며, 직교좌표 중에서 진행방향만 나타낸 것이다.

$$a(z, x, t) = A \cdot \exp(i \cdot (w \cdot t \pm \beta_a \cdot z)) f_a(x) \quad (1a)$$

$$b(z, x, t) = B \cdot \exp(i \cdot (w \cdot t \pm \beta_b \cdot z)) f_b(x) \quad (1b)$$

여기서 A, B는 정규복소진폭 (normalized complex amplitude)을 나타내며, 섭동이 존재하지 않는 광도파로에서는 진행방향 z와는 무관하다. 그러나 전계에 의해서 생성된 섭동이 존재할 경우, a, b 모드 사이에 전력의 상호교환이 일어나게 되며, 따라서 진폭 A, B는 더이상 상수가 될 수 없으며, 진행방향 z에 따라 전력의 상호교환이 이루어지며, 이러한 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dA}{dz} = -i\mu_b \cdot A \cdot \exp[-i \cdot (\beta_a - \beta_b) \cdot Z] = \mu \cdot B \cdot \exp(-i \cdot \Delta \cdot Z) \quad (2a)$$

$$\frac{dB}{dz} = -i\mu_a \cdot B \cdot \exp[-i \cdot (\beta_a - \beta_b) \cdot Z] = \mu \cdot A \cdot \exp(i \cdot \Delta \cdot Z) \quad (2b)$$

위 두 식에서, μ_a, μ_b 는 결합정수 (coupling coefficient)를 나타내며, Δ 는 $(\beta_a - \beta_b)$ 로 위상부정합을 나타내는 상수이다. 모드 a, b사이에서 전력의 완전 상호교환을 위해서는 두 모드의 속도정수 (propagation constant) β_a, β_b 가 같아야 된다. 식 (2)로 부터 모드결합을 정성적으로 고찰해보면, 모드 a는 전기광학 섭동에 의해서 직교편파 (orthogonal polarization wave)를 야기시키고, 이 편파는 모드 b를 구동시키게 되며, 다시 모드 b는 전기광학 섭동에 의해서 직교편파를 생성시키고, 모드 a를 구동시키게 된다.^[9] 일반적으로, LiTaO₃와 같은 이방성 결정 (anisotropic crystal)에 제작된 광도파로를 지나는 두 직교편파의 속도정수가 다르므로, 모드결합에 의한 전력교환 효율은 떨어진다. 따라서 모드결합에 있어서 위상정합이 매우 중요하며, 본 연구에서는 주기 전극구조의 공간변조 (spatial-modulation)를 이용해서 위상정합을 실현하였다.

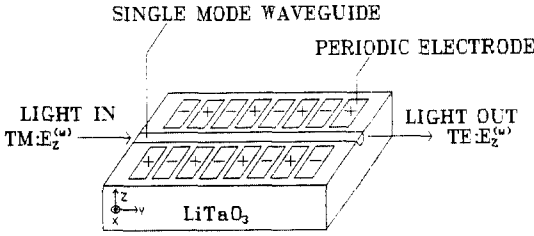
앞서 언급된 일반적인 모드결합 개념을 LiTaO₃의 전기광학 Tensor와 주기전극과 관련시켜, 구체적으로 논의하면 다음과 같다. LiTaO₃의 전기광학 Tensor는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_1 \\ \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_2 \\ \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_3 \\ \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_4 \\ \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_5 \\ \Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{42} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{62} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

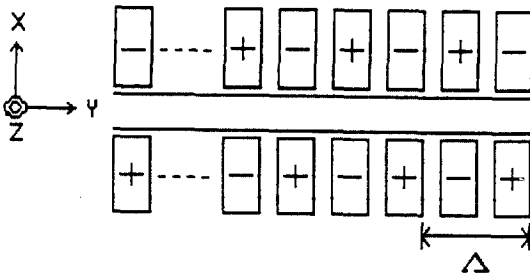
모드결합은 off-diagonal 전기광학 정수, γ_{51} 에 의해서만 가능하며, 이것을 구동시키기 위해서 x 방향으로 전계를 인가해야 되며 ($E_y = E_z = 0$), 이럴 경우 굴절률타원체 (index-ellipsoid) 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{1}{n^2} \right]_1 \cdot x^2 + \left[\frac{1}{n^2} \right]_2 \cdot y^2 + \left[\frac{1}{n^2} \right]_3 \cdot z^2 + 2 \cdot \gamma_{51} \cdot E_x \cdot xz = 1 \quad (4)$$

식(4)의 xz항은 전계에 의해서 변형된 굴절률 타원체의 결정축이 기존의 결정축 x, y, z와 같지 않음을 의미하며, 이것은 off-diagonal 전기광학 정수 γ_{51} 에 의해서, 두 직교편파 (orthogonal polarization-wave)가 서로 결합하고 있는 것으로 해석할 수 있다.



(a) Z-LiTaO₃의 결정축 및 위상정합형 주기전극



(b) 전기장의 공간변조를 이용한 Bragg-Coupling형 전극구조

그림 1. TE/TM 모드변환기 및 주기전극의 개략도 (Z-LiTaO₃)

Fig. 1. Schematic drawing of TE/TM mode converter and periodic electrode structure (Z-LiTaO₃).

그림 1은 LiTaO₃를 이용한 TE/TM 모드 변환기의 구조와 위상정합을 위한 주기 전극구조를 나타낸 것이다. z 방향으로 편광된 TM 모드 (즉 E^(ω)//a_z)가 입사광일 경우, 전기광학 섭동에 의한 모드결합 때문에 TE 모드로 전력이 전달되어, 출력광은 궁극적으로 TE 모드 (즉 E^(ω)//a_x)가 되며, 이 과정에서 생성되는 전기광학 섭동은 다음과 같이 표현된다.^[9]

$$P_x^{(ω)} = \frac{\epsilon^2 \cdot \gamma_{51} \cdot E_x^{(0)}}{\epsilon_0} E_z^{(ω)} \quad (5)$$

여기서 E_x⁽⁰⁾는 γ₅₁을 구동시키기 위해서 x 방향으로 인가된 전기장이다. 그리고 결합정수 μ(=μ_A=μ_B)는 다음과 같이 표현된다.^[2,3]

$$\mu = (n_o \cdot n_e)^{1.5} \cdot k \cdot \gamma_{51} \cdot E_x^{(0)} / 2 \quad (6)$$

n_o와 n_e는 LiTaO₃의 정상(ordinary)과 비정상(extra ordinary) 모드의 굴절율이며, k=2·π/λ 이

다. 그림 1과 같이, 주기전극에 의해서 위상정합 즉 Δ=β_a-β_b=0가 이루어진 경우, 초기값 A(z=0)=A₀, B(z=0)=0를 식(2)에 적용하면, 다음과 같은 해를 구할 수 있다.

$$A(z) = A_0 \cdot \cos(\mu \cdot z) \quad (7a)$$

$$B(z) = iA_0 \cdot \sin(\mu \cdot z) \quad (7b)$$

위 두 식은 두 직교편파 TM, TE가 π/μ의 주기로 전력이 상호교환되고 있음을 보여주며, 입사광 TM 모드가 완전히 TE 모드로 변환되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\mu \cdot \ell = \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

식(6)과 (8)로 부터, 모드를 완전히 변환시키는데 필요한 굴절율변화 Δn의 최소값은 다음과 같이 유도 된다.

$$\frac{\Delta n}{\lambda} \cdot \ell = \frac{1}{2} \quad (9)$$

여기서 Δn=(n_e·n_o)^{1.5} γ₅₁ E_x⁽⁰⁾이며, ℓ은 주기 전극의 길이를 의미한다. 인가되는 전계의 주기가 Δ일 경우, 광도파로에 인가되는 전압 V는 대략적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \sum_{m=1}^{\infty} V_m \cdot [e^{2i \cdot \pi \cdot m \cdot z / \Lambda} + e^{-2i \cdot \pi \cdot m \cdot z / \Lambda}] \quad (10)$$

식 (10)으로 부터 1 차원 위상정합 Bragg Coupling^[6]에 필요한 유효전압은 V₁이다. 그림 1-b의 전극구조에서 첫 반주기에 인가된 전압이 V_a, 나머지 반주기에 인가된 전압이 -V_a일 경우 실질적으로 전극에 인가되는 유효전압 V₁은

$$V_1 = \frac{2 \cdot V_a}{\pi} \quad (11)$$

이며, 위 식(11)과 함께 식(6)과 (9)를 이용하여 모드를 완전히 다른 직교모드로 변화시키는데 필요한 최소전압 V_a는 다음과 같이 얻을수가 있다.

$$V_a \cdot \ell = \frac{\lambda \cdot g \cdot \pi}{4(n_e \cdot n_o)^{1.5} \gamma_{51} \cdot \delta} \quad (12)$$

여기서 λ는 광파의 파장, g는 전극의 간격, 그리고 δ는 광파와 인가된 전계와의 중첩 (overlap) 정도를 나타내는 실험적 상수이다.

식(2)와 (10)으로 부터 주기전극에 의해서 위상정합이 이루어질 경우, 속도정수와 전극주기 Λ와의 관

계는 다음과 같이 나타낼 수 있다. [2, 8]

$$\Delta n = \frac{2\pi(n_e \cdot n_o)}{\lambda} \pm \frac{2\pi}{\lambda} = 0 \quad (13)$$

그런데, LiTaO₃, LiNbO₃의 복굴절율, (n_e-n_o)가 주위온도에 민감하므로 (LiNbO₃의 경우, d(n_e-n_o)/dT=3.1×10⁻⁵/℃) [10], 제작과정에서 야기될 수 있는 미세한 위상부정합은 온도에 의해서 조절이 가능하며, 또한 파장(λ)을 변화시켜, 위상정합을 실현시킬 수 있다. 후자의 성질을 이용하면, 파장에 의한 demultiplexing도 가능하다.

III. 제작 및 검토

TE/TM 모드 변환기 제작공정은 LiTaO₃의 단일 모드 광도파로 제작과 주기전극 제작으로 구분될 수 있으며, 전 제작공정에서 사진식각공정 (photolithography)에 4개의 photomask를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 LiTaO₃ 결정에 관한 중요특성 및 전극주기를 LiNbO₃와 비교해서, 표 1에 요약하였다.

표 1. LiNbO₃와 LiTaO₃ 결정의 특성 비교

Table 1. Comparison of crystal properties for LiNbO₃와 LiTaO₃.

광전자 재료	γ	51 (10 ¹² m/v)	Curie Temp. Tc(℃)	복굴절 n _e -n _o	광손상 임계값 Pm(W/cm ²)	전극주기 Δ(μm)
LiNbO ₃	28		1140	0.084	~40	~7
LiTaO ₃	20		630	0.0045	~1500	~140

표 1에 나타난 바와 같이, LiTaO₃의 복굴절이 LiNbO₃ 보다 훨씬 작으므로, 상대적으로 위상정합에 필요한 전극주기 Δ가 길어져 (식 13 참조) 전극제작공정을 용이하게 해준다.

TE/TM 모드변환기 제작공정은 다음과 같다. Ti (Titanium) 확산에 의한 단일모드 광도파로 제작을 위해, 1"x1/2" 크기의 Z-LiTaO₃ (광축 Z에 수직되게 잘라서 만든 wafer)에 약 300-350Å Ti를 증착시킨 다음, 사진식각공정 (그림 2의 MASK 1)과 Plasma Asher를 이용해서 Ti의 폭이 3μm 정도의 패턴 (pattern)을 형성하고, 약 1150-1200℃의 온도에서 Ti를 확산시켜, LiTaO₃에 단일모드 광도파로를 제작하였다. [11] 광도파로가 형성된 LiTaO₃ 기판은 0.63μm He-Ne Laser와 End-Fire Coupling [12]을 위해서, 입사단면을 Polishing 한다. 광도파로가 0.63μm 파장에서 단일모드로 확인되면, Curie 온도

보다 높은 확산 온도 때문에 상실된 전기광학 효과를 Poling을 통해서 회복시킨다. [13]

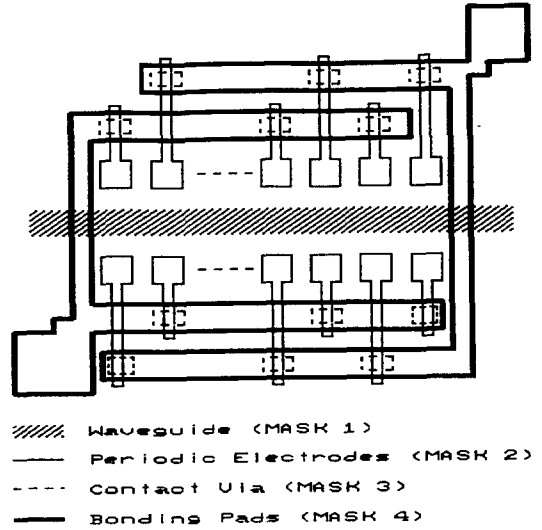


그림 2. 사진식각공정에 필요한 photomask의 개략도

Fig. 2. Schematic layout of photomask for TE/TM mode converter.

전극 금속에 의한 광파의 흡수 (optical absorption)를 막기위해서, 완충막막으로 약 1000 Å의 SiO₂ (silicon dioxide)를 rf-sputtering을 이용해서 증착시킨다. 전극재료인 Al을 약 2000Å 정도로, Film Evaporator를 이용해서 증착시킨 다음, 다시 사진식각공정 (그림 2의 MASK 2)에 의해서 주기전극을 형성한다. Bragg Coupling형 위상정합을 위해서 반주기마다 인가전압 극성의 반전(反轉)이 필요한데, 이를 위해서는 약 4000-5000Å의 SiO₂를 증착시키고, 다시 사진식각공정 (그림 2의 MASK 3)과 RIE (reactive ion-etching)을 이용해서 via를 그림 2와 같이 형성한다. 마지막으로, 2000Å의 Al을 증착시켜서 Bonding Pad를 형성한다 (그림 2의 MASK 4). 표 2는 광도파로 제작공정 조건을 요약한 것이며, 표 3은 완성된 소자의 전극제원을 요약한 것이다.

제작된 TE/TM 모드변환 소자는 그림 3과 같은 End-Fire Coupling 방법으로, 0.63μm He-Ne Laser와 결합시켜 TE/TM 모드변환, 위상정합 및 동작전압을 관찰하였다. 광도파로의 복굴절로부터 계산된 전극주기 Δ가 제작공정시 복굴절의 미세한 변화로, 완전 위상정합을 이루지 못할 경우, 온도조

절 (temperature tuning)로 미세한 위상부정합을 보상하였다. 실험적으로 관찰된 정합온도, 변환에 필요한 동작전압 및 변환효율 (conversion efficiency)이 표 4에 요약되었으며, 실험적 DATA로부터, 식 (6)와 (12)를 이용해서 중복계수 (overlap factor) δ 와 결합정수 μ 를 계산하였고 그 결과를 표 5에 요약하였다.

표 2. 광도파로 제작공정 조건

Table 2. Fabrication conditions of optical waveguides.

기판(Substrate)	Ti(A)	T(°C)	t(hr)	τ_B (Å)	Poling
SI(Ti:Z-LiTaO ₃)	330	1150	6	1000	O.K

Ti의 두께 (Ti), 확산 온도 (T), 확산시간 (t), SiO₂ buffer layer 두께 (τ_B), Poling의 유무.

표 3. 소자의 제원

Table 3. Devices parameters.

기판(Substrate)	소자	ω (μ m)	g_m (μ m)	A (μ m)	N	l (mm)
SI(Ti:Z-LiTaO ₃)	D1	3	5	140	28	3.92
	D2	3	6	112	35	3.92

광도파로 폭 (ω), 전극의 간격 (g_m), 주기 (A), 주기전극의 수 (N), 전극길이 (l).

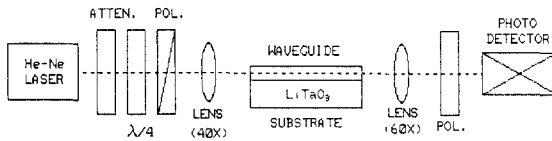


그림 3. End-fire coupling 시스템

Fig. 3 End-fire coupling system.

표 4. 실험적으로 관찰된 결과

Table 4. Summary of experimental results.

기판	소자	Mode Number		T_B (°C)	V_R (V)		전환 효율(%)	
		TE	TM		TE	TM	TE	TM
SI	D1	1	1	17	20	30	90	75
	D2	1	1	36	30	40	72	82

표 5. 중복계수 δ 와 결합정수 μ

Table 5. Overlap factor, and coupling coefficient.

기판	소자	$V_R \cdot l$ (V-cm)	중복계수, δ	결합정수, μ (cm ⁻¹)
SI	D1	9.8	0.12	6.16
	D2	13.72	0.104	6.23

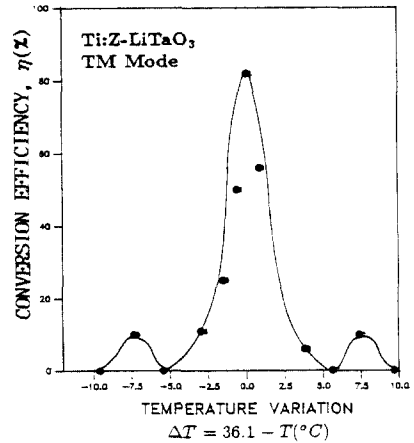


그림 4. 온도변환에 따른 전환효율

Fig. 4. Conversion efficiency versus temperature difference from phase-match temperature $T_0=36.1^\circ\text{C}$.

TE/TM 모드변환에 필요한 동작전압이 비교적 높게 관찰된 것은, 모드결합 과정에서 모드의 형태(profile)의 변환 때문에 전계와의 중복비율이 감소한 것으로 추측된다. $A=140\mu\text{m}$, 28개의 주기전극으로 제작된 소자 D1은 17.5°C 에서 90%의 전환효율을 보였다. 그림 4는 온도변화에 따른 전환효율을 보여주고 있으며, 모드의 변환 효율은 위상정합에 큰 영향을 받고, 비록 전극주기에 의해서 이론적으로 위상정합이 실현 되었을지라도, 제작과정에서 발생하는 미세한 위상 부정합은 온도에 의해서 보상될 수 있음을 보여주고 있다. 그림 4의 실험치는 아래와 같은 SINC 함수와 잘 일치됨을 나타낸다.

$$\eta = \frac{\mu^2}{\mu^2 + \Delta^2} \sin^2(\sqrt{\mu^2 + \Delta^2} \cdot \ell) \quad (14)$$

표 5에서 관찰되듯이, 입사광이 TE와 TM일때 서로 다른 동작전압과 전환효율이 관찰된 것은 TE와 TM 그 자체의 모드 형태(mode profile)가 달라서, 영향을 받는다고 추측된다.

IV. 결론

LiTaO₃의 $\gamma 51$ 전기광학 정수와 위상 정합형 주기

전극을 이용해서, TE/TM 모드변환기를 제작, 검토하였다. 작은 중복상수 δ 때문에 예상보다 비교적 높은 동작전압을 관찰하였지만, 비교적 이론과 설계에 잘 일치함을 보였다. 28개의 주기($A=140\text{ m}$) 전극으로 제작된 소자는 약 25 [V]의 동작전압과 80%의 전환효율을 보였으며, 35개의 주기($A=112\mu\text{m}$) 전극으로 제작된 소자는 비교적 높은 35V의 동작전압을 보였다. 앞서 언급된 바와 같이, TE와 TM의 모드분산(mode dispersion) 때문에, 동작 특성에 있어서도 약간의 차이가 관찰되었다.

소자를 실용화시키기 위해서는 낮은 동작전압이 필요한데, 중복상수 δ 값을 증가시켜서 동작전압을 낮추는 것이 가능하다. 일반적으로 buffer layer는 중복상수 값을 악화시키는데, buffer layer와 Al 주기전극(그림 2의 MASK 2)을 투명하고, 도체인 Indium-Tin Oxide ($\alpha\text{-In}_2\text{O}_3\text{-ySnO}_2$)와 같은 재료로 대체 할 경우, 중복상수를 증가시킬 수 있다고 사료된다.

參 考 文 獻

- [1] S. K. Korotoky, et al, "8-Gbit/s Transmission experiment over 68Km of optical fiber using a Ti:LiNbO₃ external modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, PP. 1505-1509, 1987.
- [2] R. C. Alferness, "Efficient waveguide electrooptic TE-TM mode converter and wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 36, pp. 513-515, 1, 1980.
- [3] R. C. Alferness and L. L. Buhl, "Tunable electrooptic waveguide TE-TM converter and wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 861-862, May, 15, 1982.
- [4] R. C. Booth, B. E. Daymond-John, P. E. Sturges, and M. G. F. Wilson, "Temperature tuning of LiNbO₃ electrooptic waveguide TE-TM mode converters," *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 1045-1047, Dec. 6, 1984.
- [5] R. C. Alferness and L. L. Buhl, "Polarization independent optical filter using interwaveguide TE-TM conversion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, pp. 131-134, July 15, 1981.
- [6] G. L. Tangonan, M. K. Barnoski, J. F. Lotseich and A. Lee, "High optical power capabilities of Ti-diffused LiTaO₃ waveguide modulator structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, pp. 238-239, Mar. 1977.
- [7] Amnon Yariv, Introduction to Optical Electronics, New York, NY: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [8] Henry F. Taylor, "Polarization Independent Guided-Wave Optical Modulators and Switches," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, no. 6, pp. 1277-1280, Aug. 1974.
- [9] Amnon Yariv, Quantum Electronics., PP. 531, John Wiley & Sons, 1975.
- [10] G. D. Boyd, W. L. Bond, and H. L. Carter, "Refractive index as a function of temperature in LiNbO₃," *J. Appl. Phys.*, vol.38, pp. 1941-1943, Mar 15, 1967.
- [11] 鄭 洪 植, "LiTaO₃에 Ti 확산으로 형성된 광도파로의 특성 및 응용에 관한 연구," 전자공학회논문지, 제 28 권, A편, 제 4 호, 1991년 4월호.
- [12] Yasuyuki Okamura, Shinji Yoshinaka, and Sadahiko Yamamoto, "Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method," *Appl. Opt.*, vol. 22, pp. 3892-3894, Dec. 1983.
- [13] P. W. Haycock and P. D. Townsend, "A method of poling LiNbO₃ and LiTaO₃ below c," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, pp. 698-700, Mar. 1986. - 10 -

著者紹介



鄭 洪 植 (正會員)

1959年 6月 25日生. 1982年 2月부터 1984年 8月 서강대학교 전자공학과 및 대학원 졸업 (공학사, 공학석사). 1984年 8월부터 1988年 12월까지 Texas A&M University 전기공학과 졸업 (공학박사). 1989年 3월부터 1990年 2월까지 일본 신기술사업단 연구원 (Nishizawa's Terahertz Project). 1990年 3월부터 현재 홍익대학교 전자전산기공학과 조교수. 주관심분야는 광집적회로소자 설계 및 제작, 고주파 광변조기 및 광통신 시스템 연구 등임.