

Ti:LiNbO₃ 집적광학형 파장가변 편광모드 조절기에 관한 연구

문제영 · 정홍식[†]

홍익대학교, 대학원, 전자전산공학과
Ⓞ 339-701 충청남도 연기군 조치원을 신안동 300번지

(2005년 6월 8일 받음, 2005년 6월 27일 수정본 받음)

Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 설계된 집적광학 파장가변 편광모드 조절기를 설계 및 제작하고, 동작특성을 측정하였다. 소자는 TE↔TM 모드변환기와 TE/TM 위상변환기로 구성되었으며, Jones 매트릭스를 이용하여 각각의 전달 매트릭스를 유도하였다. 위상변환기에 의한 파장 변환율을 전산 모사하였으며, 제작된 소자의 동작 특성들을 확인하였다. 플래리미터와 Poincare 구 좌표계를 이용하여 편광 조절기의 동작 상태를 체계적으로 측정하였다.

주제어 : Integrated optic polarization mode controller, Electro-optic effect, Lithium niobate, Polarization mode converter, Phase shifter

I. 서 론

초고속 광통신 시스템을 구현하는데 분산과 관련된 부정적인 요소로는 광섬유의 비선형 특성, 색 분산(chromatic dispersion), 편광 모드 분산(PMD : Polarization Mode Dispersion) 등이 있다. 광섬유의 비선형과 색 분산에 의한 광 신호의 장거리 고속 장애는 현재 어느 정도 극복되었지만, 편광모드 분산 문제는 아직 해결되어야 할 과제가 많이 남아있다. 광섬유의 비대칭성 그리고 주변 온도 변화나 외압에 의한 물리적인 요인들로 인하여 광섬유 내에 복굴절(birefringence) 현상들이 불규칙하게 나타난다. 이러한 현상들은 편광 의존적인 특성을 갖는 광 통신 부품들의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 광 신호를 왜곡시켜 광 전송시스템 성능에 부정적인 영향이 미치게 된다. 특히 복굴절 재료를 이용하여 제작된 전기광학 광변조기와 스위치, 전계흡수 광변조기, 그리고 광간섭기 등의 성능을 크게 훼손시킨다.^[1,2]

일반적인 초고속 광통신시스템의 구현에 있어서 3dB 파워 페널티 기준으로 연간 5분 이하로 시스템 작동정지를 보장하기 위해서 허용될 수 있는 DGD(differential group delay) 최대 값은 광 신호 펄스폭의 14% 정도로 추정하고 있다. 따라서 10 Gbps와 40 Gbps의 광전송 시스템에서 허용되는 DGD의 최대 값은 14 ps, 3.5 ps 정도이다. 그런데 Bellcore에서 보고된 자료에 의하면 1996년도에 가설된 1,000개의 광케이블 중에 80%가 0.8 ps/km의 편광모드 분산 계수가 측정되었으며, 불과 약 20% 정도에서 0.2 ps/km가 측정되었다. 한편 300 km 이상 가설된 광케이블 중에 편광모드 분산으로 인하여 20% 정도는 10 Gbps 전송시스템에 적합하지 않으며, 40 Gbps 시스템에는 무려 75%가 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다.^[3,4] 따라서 10 Gbps 이하의 광전송 시스템에서

는 문제가 되지 않았던 편광모드 분산은 전송용량이 그 이상으로 증가하면서 광통신 시스템에 매우 부정적으로 작용하게 된다. 이러한 고속의 광전송 시스템을 구현함에 있어 필수 과제인 편광모드 분산을 보상 또는 완화시킬 수 있는 방법과 편광상태(SOP : state of polarization)를 실시간으로 조절할 수 있는 광 부품 개발의 필요성이 시급히 요구되고 있다. 현재 다단계 형태의 광섬유 squeezer,^[5,6] 회전형 광 retardation plate, 그리고 액정을 이용한 편광 rotator^[7]와 같이 다양한 방법의 편광 조절기가 개발되었으나 편광 조절 속도, 복잡한 알고리즘 등의 이유로 WDM 전송시스템에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.^[6,8,9]

LiNbO₃를 기반으로 제작된 편광절기는 구동 전압에 따른 빠른 동작속도, 높은 안정성 및 소형화 등 많은 장점을 가지고 있다. 특히 ns 이상의 빠른 편광조절 속도는 40 Gbps 이상의 PMD 보상시스템에 매우 뛰어난 이점을 가지고 있으며, 다른 PLC(Planar Lightwave Circuit) 소자와의 집적화에도 큰 이점으로 평가받고 있다. 본 논문에서는 Ti:LiNbO₃ 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 실시간으로 편광 상태를 조절할 수 있는 집적광학형 편광모드 조절기를 설계, 제작하였다. 소자는 R. C. Alferness가 제안한 IDT(Inter Digital) 전극을 이용한 TE↔TM 모드변환기와 위상변환기들로 구성되었으며, N. G. Walker가 제안한 전극구조를 활용하였다.^[10,11] 제작된 편광모드 조절기에 인가되는 전압에 따라 편광을 변화시키는 동작 특성들을 플래리미터를 이용하여 체계적으로 검증하였다.

II. 파장가변 집적광학 편광 조절기의 구조 및 동작 원리

그림 1은 x-cut LiNbO₃에 y 축 방향으로 광이 진행하도록

[†]E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

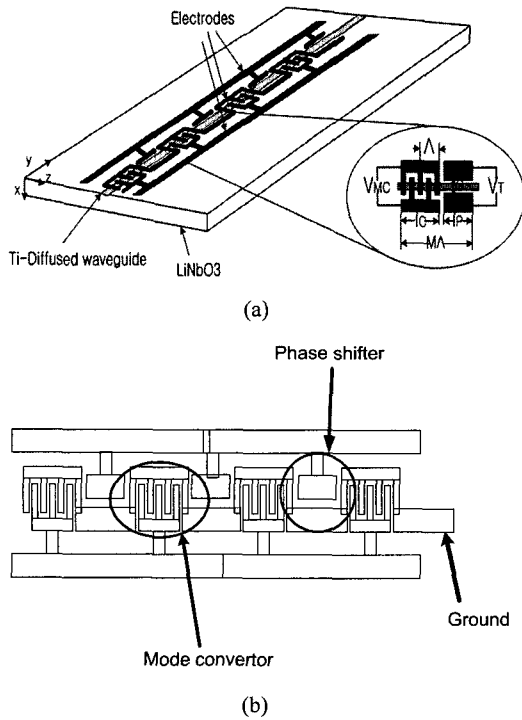


그림 1. (a) 주기 격자를 이용한 TE↔TM 모드 변환기와 위상변환기를 이용한 파장가변 편광조절기 구조, (b) TE↔TM 모드 변환기와 위상변환기에 적용된 전극구조.

배열시킨 집적광학 편광조절기의 개략도이며, 각 전극에 대한 인가전압과 전계분포는 그림 2와 같다. 반복되는 각각의 전극 구조는 IDT를 이용한 TE↔TM 모드변환기와 TE/TM 위상변환기로 구성되어 있으며, 모드변환기와 위상변환기를 한 묶음으로 모두 140개의 전극이 교번으로 연결되어 있다. 각 변환기들의 전극 구조로부터 그림 2(b), (c)와 같이 E_x (V_{MC})와 E_z (V_T)의 전계가 형성되며, 전자는 TE↔TM 간의 모드 변환, 후자는 TE/TM 위상변화를 각각 발생시킨다.

2.1. TE↔TM 모드 변환기

그림 2(b)는 y 축으로 진행되는 x-cut LiNbO₃에 IDT 전극을 배열하여 LiNbO₃의 전기광학효과를 이용한 TE↔TM 모드 변환기의 전극구조를 나타낸 것이다. 이 구조에서 채널 도파로 위에 주기적으로 배열된 전극에 의해서 E_x 전계가 인가되게 되고, 이로부터 구동되는 LiNbO₃의 전기광학계수 r_{51} ($\sim 28 \times 10^{-12}$ m/V)에 의해 TE↔TM 모드 변환이 일어나게 된다. TE, TM 간 위상정합(phase matching)이 효과적으로 일어나기 위해서는 리튬나오베이트의 복굴절 때문에 기인되는 TE, TM 간 위상속도 부정합이 극복되어야 되며, 그림 2(b) 구조에서는 Bragg 의사 위상정합(quasi phase matching) 방법을 적용하여 위상정합을 구현하였다. IDT 전극 주기 Λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_o = \Lambda |n_{TM} - n_{TE}| \tag{1}$$

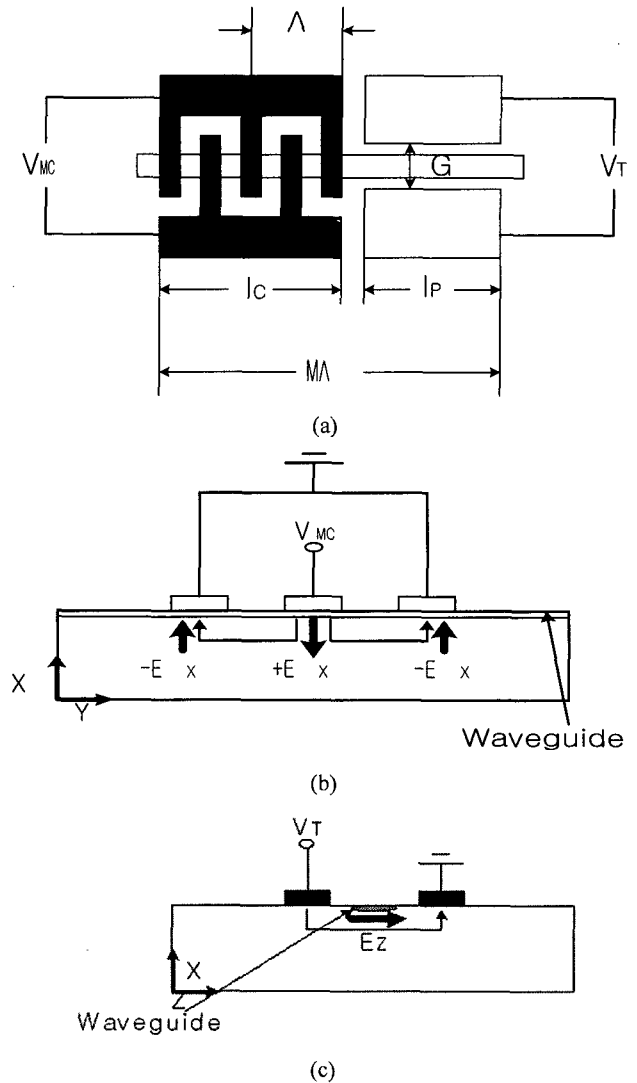


그림 2. (a) TE↔TM 모드변환기와 위상변환기의 전극구조, (b) 모드변환기 전압 V_{MC} 에 의한 E_x 전계, (c) 위상변화 전압 V_T 에 의한 E_z 전계.

λ_o 는 입사광의 파장이며, n_{TE} , n_{TM} 은 각각 TE, TM 편광모드의 유효굴절률을 의미한다. 식 (1)의 위상정합 조건으로부터 편광모드 변환기는 주기 Λ 에 의해 파장 의존성을 갖게 됨을 알 수 있다. 중심 파장 λ 로부터 $\Delta\lambda$ 정도 벗어난 파장 $\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda$ 에 대한 위상 비정합 정도는 아래 식과 같이 유도된다.

$$\Delta\beta = -(2\pi/\Lambda)\Delta\lambda/\lambda \tag{2}$$

한편 전기광학효과에 의한 편광모드 변환율은 결함모드 방정식으로부터 다음과 같이 유도된다.^[12]

$$\eta_{TE \rightarrow TM} = \frac{\sin^2 [k l_c (1 + (\delta/k)^2)^{1/2}]}{1 + (\delta/k)^2} \quad (3)$$

여기에서 $\delta = (1/2)\Delta\beta$, $k = \alpha(\pi/2\lambda)\sqrt{n_{TE}^3 \cdot n_{TM}^3 r_{51} V_{MC}/\Lambda}$, 그리고 l_c 는 모드결합 길이이다.^[13] $\delta=0$ 또는 $k l_c = n\pi/2$ (n =홀수)일 경우 완벽한 TE \leftrightarrow TM 모드변환이 이루어진다. 만약 $n=1$ 일 경우 파장에 따른 모드변환효율 필터의 파장 폭 FWHM(Full Width Half Maximum)은 식 (2)와 (3)에 의해 $\Delta\lambda_{BW}/\lambda_o = \Lambda/l_c = 1/N$ 이며, N 은 IDT 전극의 개수를 의미한다.

2.2. 위상변환기

그림 2(c)는 도파로 양쪽에 위상 전극을 배열시킨 위상 천이 기 구조이다. 전극 V_T 는 도파로 내에 Ez 전계를 일으키게 되고, LiNbO₃의 전기광학계수 r_{13} , r_{33} ($r_{13}=10 \times 10^{-12}$ m/V, $r_{33}=30 \times 10^{-12}$ m/V)에 의해 굴절률이 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$n_{TE}(V_T) = \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{V_T}{G} \quad (4-1)$$

$$n_{TM}(V_T) = \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} \frac{V_T}{G} \quad (4-2)$$

위식에서 n_e 는 LiNbO₃의 이상파 굴절률이고, n_o 는 정상파 굴절률을 의미한다. 이렇게 변화된 굴절률로 인해 TE와 TM 모드의 위상속도 차로 두 모드 간 TE/TM 위상 지연을 일으키게 된다. 이 때 인가된 전압 V_T 에 의해서 l_p 길이 동안 TE/TM 모드 간에 나타나는 위상차는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi(V_T) &= \frac{2\pi}{\lambda} |n_{TE}(V_T) - n_{TM}(V_T)| l_p \\ &= \frac{\pi V_T}{\lambda G} |n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}| l_p \end{aligned} \quad (5)$$

일반적으로 LiNbO₃의 z축 굴절률(n_e)과 x축 굴절률(n_o)가 다르기 때문에 V_T 에 의한 전체적인 굴절률 변화량을 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{TM}(V_T) = n_{TM}(0) - n_{TM}(V_T) \quad (6-1)$$

$$N_{TE}(V_T) = n_{TE}(0) - n_{TE}(V_T) \quad (6-2)$$

$$\Delta N(V_T) = |N_{TM}(V_T) - N_{TE}(V_T)| \quad (6-3)$$

결국 V_T 전압에 의해 TE/TM 모드 간 나타나는 총 위상차는 아래와 같다.

$$\Delta\phi_T(V_T) = \Delta\phi(0) + \Delta\phi(V_T) \quad (7)$$

또한 V_T 전압에 의하여 모드변환 중심파장이 변하게 된다. V_T 전압에 의해 변환된 중심파장을 $\lambda(V_T) = \lambda_o + \Delta\lambda(V_T)$,

중심파장의 변화량에 의한 위상변화 또는 굴절률 변화량 $\Delta N(V_T)$, 그리고 한 주기길이 Λ 에서의 위상변화량 2π 로부터 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있으며,

$$\frac{2\pi}{\lambda(V_T)} \times \Delta N(V_T) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (8)$$

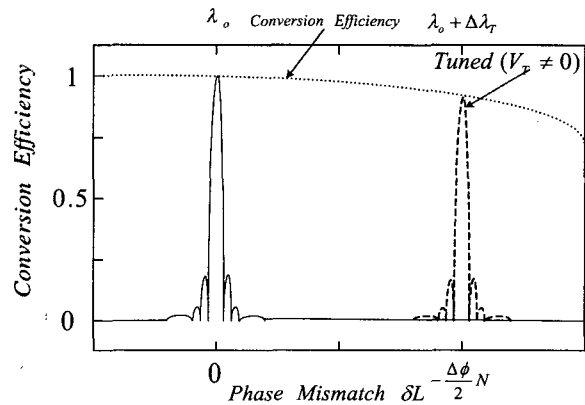
위 식 (8)을 보다 간략하게 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta\lambda(V_T) = \Lambda \times \Delta N(V_T) \quad (9)$$

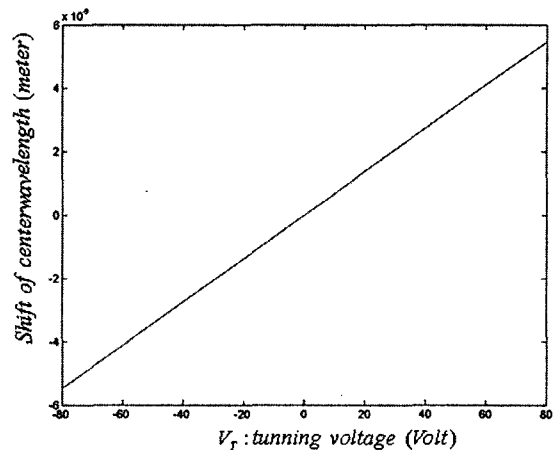
또한 식 (1)의 $\Lambda = \lambda_o / \Delta n_o$ ($\Delta n_o = |n_{TM} - n_{TE}|$)를 이용할 경우 식 (9)는 아래와 같다.

$$\Delta\lambda(V_T) / \lambda_o = \Delta N(V_T) / \Delta n_o \quad (10)$$

위상천이 전극은 광신호의 위상을 조절해 줄 뿐 아니라 모



(a)



(b)

그림 3. (a) V_T 인가전압에 의한 위상차에 따른 모드변환효율, (b) V_T 가변 전압에 따른 중심 파장 변환율.

드변환 파장을 이동시킴으로써 모드 결합 효율을 조절해 주는 역할을 한다. 또한 모드변환기의 중심파장이외의 광 신호 파장을 이동시켜 최대의 모드 변환효율을 얻게 하기도 한다. 그림 3(b)는 식 (9)와 (10)을 근거로 V_T 전압에 의한 중심 파장 변환율을 보여주고 있다.

III. 편광 조절기의 Jones 매트릭스 및 전달함수

각 전극의 인가된 전압에 의해 모드변환기는 편광모드 결합 그리고 위상변환기는 위상변환을 일으키게 된다. 이러한 편광모드 결합과 위상변환은 입력편광 상태를 진화시키며, 이렇게 진화된 편광상태를 표현하는 방법으로 Jones 벡터를 주로 활용하고 있다. 본 장에서는 V_{MC}에 의한 편광모드 변환기와 V_T에 의한 위상변환기의 Jones 매트릭스를 유도하고, 이로부터 두 개의 연속된 편광모드 변환기/위상변환기를 고려한 전체적인 전달 매트릭스를 유도하였다.

3.1. Jones 매트릭스를 이용한 편광상태

도파로 내에 TE 혹은 TM 단일 모드가 존재한다고 가정하고 Jones 벡터를 기준으로 편광을 나타내면 다음과 같다.

$$A(y) = \begin{bmatrix} A_1(y) \\ A_2(y) \end{bmatrix} = a_o(y) \begin{bmatrix} \cos \theta(y) \\ \sin \theta(y) e^{j\psi(y)} \end{bmatrix} e^{j\beta(y)} \quad (11)$$

$$\beta_1(\lambda) = n_{TE}(\lambda)2\pi/\lambda, \quad \beta_2(\lambda) = n_{TM}(\lambda)2\pi/\lambda \quad (12-1, 2)$$

$$\theta = \arctan(|a_2|/|a_1|), \quad \psi = (\beta_2 - \beta_1)y + \psi_o \quad (12-3, 4)$$

$$\psi_o = \arg(a_2/a_1),$$

$$a_o = \sqrt{|a_1|^2 + |a_2|^2} \times |a_1|/|a_1| \quad (12-5, 6)$$

θ 는 광축을 중심으로 TE/TM 모드 크기의 비에 근거한 편광각을 나타내며, ψ 는 두 모드 간 위상차를 나타낸다. 특정한 편광을 나타내는 Jones 벡터가 L 길이 동안 편광의 진화가 있었다면, 진화된 편광인 A(L)과 초기 편광상태인 A(0)는 A(L) = T×A(0)인 관계를 갖고 있다. 여기에서 T는 편광모드 변환기의 전달 매트릭스를 나타낸다.

3.2. 편광모드 변환기의 전달 매트릭스

편광모드 변환기의 전달 매트릭스 C를 유도하기 위하여 결합모드 방정식을 풀어주게 되면, 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} a_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] & b_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] \\ -b_c \exp[-j(\beta_2 - \delta) l_c] & a_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] \end{bmatrix} \quad (13-1)$$

$$a_c = \cos(\sqrt{k^2 + \delta^2} l_c) + j \frac{\delta}{\sqrt{k^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{k^2 + \delta^2} l_c) \quad (13-2)$$

$$b_c = -j \frac{k}{\sqrt{k^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{k^2 + \delta^2} l_c) \quad (13-3)$$

여기서 k는 단위 길이 당 결합계수이며, δ 는 두 모드 TE/TM 간 결합되는 과정에서 생기는 단위 길이 당 위 상차를

나타내는데, λ_o 에서 설계된 TE↔TM 모드결합 구간에서 $\Delta\lambda$ 차에 따른 위상변화는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\delta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} - \frac{\pi}{A} \approx \Delta\lambda \left[\frac{d}{d\lambda} \frac{\beta_2(\lambda) - \beta_1(\lambda)}{2} \right]_{\lambda=\lambda_o} \quad (14-1)$$

$$\approx -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_o} \frac{\pi}{A} \frac{\Delta n_{gr}(\lambda_o)}{\Delta n_{ph}(\lambda_o)} \quad (14-1)$$

$$\Delta n_{ph}(\lambda) = n_{TM}(\lambda) - n_{TE}(\lambda) \quad (14-2)$$

$$\Delta n_{gr}(\lambda_o) = \Delta n_{ph}(\lambda_o) - \lambda_o \left[\frac{d}{d\lambda} \Delta n_{ph}(\lambda) \right]_{\lambda=\lambda_o} \quad (14-3)$$

3.3. TE/TM 위상변환기의 전달함수

위상변환기에 대한 결합모드 방정식을 고려할 경우 위상변환기에 대한 4×4 Jones 매트릭스를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} \exp[-j(\beta_1 + \Delta\beta_1) l_p] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_2 + \Delta\beta_2) l_p] \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Delta\beta_1 = \Gamma_{TE} \frac{\pi}{\lambda_o} n_{TE}^3 r_{33} \frac{V_T}{G},$$

$$\Delta\beta_2 = \Gamma_{TM} \frac{\pi}{\lambda_o} n_{TM}^3 r_{13} \frac{V_T}{G}$$

여기서 $\Delta\beta_{1,2}$ 는 전기광학효과에 의해 변화된 굴절률에 따른 TE/TM 모드의 단위길이 당 위상변화를 나타낸다. Γ_{TE} 와 Γ_{TM} 은 각각 인가전압 V_T와 TE, TM 모드간의 중복(overlap) 정도를 나타내는 상수($0 \leq \Gamma_{TE, TM} \leq 1$)이고, G는 위상변환기 전극 간격을 나타낸다.(그림2(a) 참조) 서로 다른 전기광학계수로 인해 TE와 TM 모드는 서로 다른 위상속도로 진행을 하게 되고, 결국 전극 길이 l_p 동안 다음과 같은 위상변화를 일으킨다.

$$\Delta\psi = (\Delta\beta_2 - \Delta\beta_1) l_p \quad (17)$$

3.4. 모드변환기/위상변환기의 전체적인 전달함수

앞에서 유도된 편광모드 변환기의 4×4 Jones 매트릭스와 위상변환기 매트릭스로부터 단위 길이 (l_c + l_p)에서의 전체적인 전달 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$T = P \times C = \begin{bmatrix} \exp[-j(\beta_1 + \Delta\beta_1) l_p] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_2 + \Delta\beta_2) l_p] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] & b_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] \\ -b_c \exp[-j(\beta_2 - \delta) l_c] & a_c \exp[-j(\beta_1 + \delta) l_c] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_c \exp[j(\delta l_p + \Delta\psi/2)] & b_c \exp[j(\delta l_p + \Delta\psi/2)] \\ -b_c \exp[-j(\delta l_p + \Delta\psi/2)] & a_c \exp[-j(\delta l_p + \Delta\psi/2)] \end{bmatrix} e^{-jx} \quad (18)$$

$$\chi = [(\beta_1 + \delta)(l_c + l_p) + \Delta\beta_1 l_p + \Delta\phi/2]$$

위식 (18)은 편광모드 변환기와 위상변환기로 구성된 단위 블럭에 대한 전달 매트릭스를 나타낸다. 만약 모드변환기와 위상변환기가 N개 연속으로 연결되어 있을 경우 소자의 전체적인 전달함수는 $[P \times C]^N$ 으로 표현 할 수 있다.

IV. 소자 제작공정

x-cut LiNbO₃ 위에 e-beam 증착기를 이용하여 1000 Å 두께의 Ti를 사진식각 공정과 Ti 습식 식각 공정으로 8 μm 폭의 Ti 채널 패턴을 형성한 다음, 1050°C 온도에서 8시간 동안 확산하여 1.55 μm 파장 대역에서 동작하는 단일모드 채널 광도파로를 제작하였다. 고온의 확산 과정에서 Li 원소의 외부 확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasite) 광도파로를 억제하기 위해서 습식 산소(wet-O₂) 분위기에서 확산을 수행하였으며, 광도파로에 광파를 효율적으로 입사시키기 위해서 입사 단면을 optical-grade 수준으로 연마하였다.^[15]

편광모드 조절기의 전극 구조를 보면, x-cut LiNbO₃의 전기광학효과 중 Ex-전계를 이용하기 위해 도파로 위에 전극을 형성하게 된다. 전극이 덮개 층을 이루고 있을 때 광도파로를 통과하는 TM 편광모드는 흡수되어 매우 큰 손실이 일어나게 된다. 이러한 이유로 도파로 위에 SiO₂ 박막 층을 3000 Å 두께로 증착하였다. 마지막으로 SiO₂ 박막층 위에 전극을 형성하기 위해 알루미늄을 3000 Å 증착한 뒤 전극 모양을 형성하였다. 그림 4에 보이는 사진은 완성된 전극의 일부분을 보여주고 있다.

V. 동작 특성 측정

1554nm 파장의 DFB 반도체 레이저다이오드 광원을 광섬유 편광조절기를 통해 제작된 집적광학 편광조절기에 입사

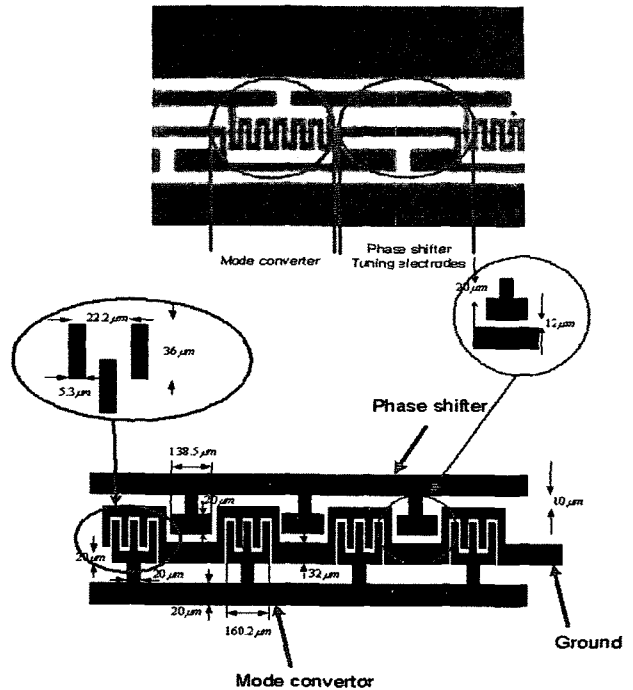


그림 4. 제작된 소자의 확대 사진 및 전극구조와 제원.

시켰다. 그리고 출력 SOP는 폴래리미터를 이용하여 측정하였다. 그림 5는 Butt 결합 측정시스템 구성을 보여준다.

먼저 제작된 소자에서 TE↔TM 편광모드 변환기의 동작 특성을 개별적으로 검토하였다. 모드변환기는 인가된 전압 V_{MC}에 의해 S2 축을 중심으로 회전하게 된다.^[14] TM↔TE 편광모드 결합을 위해 필요한 DC 전압을 다양하게 인가하여 폴래리미터 PSP(Principle State of Polarization)를 기준으로 편광이 TM 모드에서 TE 모드로 진화되는 것을 그림 6(a), (b)와 같은 Poincare 구를 이용하여 확인할 수 있었다. 참고로 그림 6과 같은 Poincare 구는 광파의 모든 가능한 편광 상

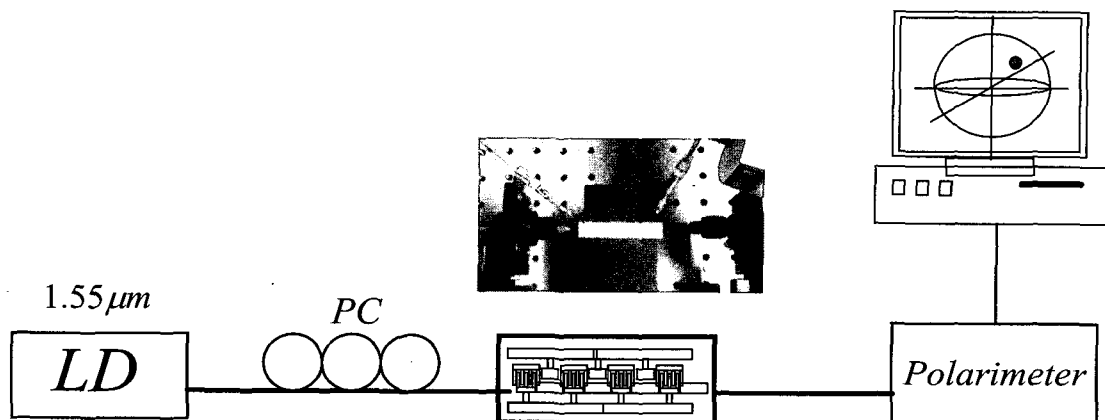


그림 5. Butt 결합 측정 시스템 구성도.

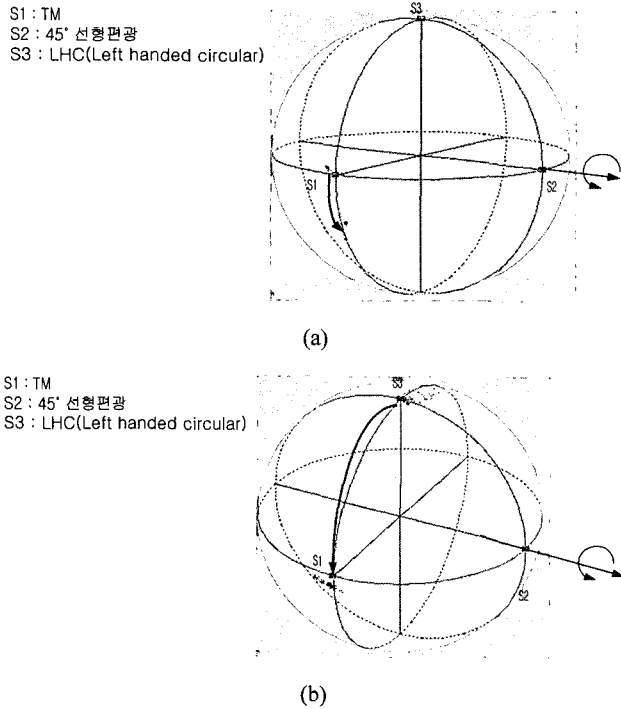


그림 6. (a) V_{MC} 인가전압에 따른 TE \leftrightarrow TM 모드 결합, (b) LHC \rightarrow TM으로의 편광진화.

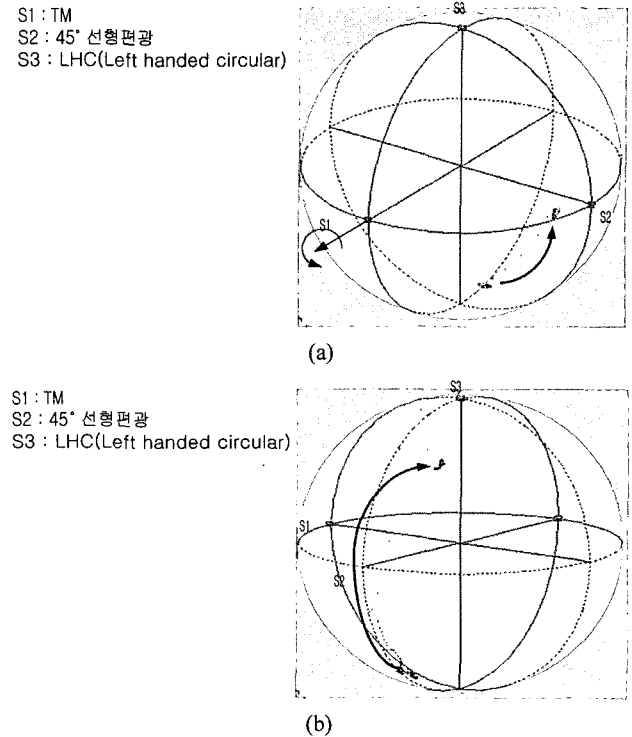


그림 7. (a) V_T 인가전압에 따른 TE/TM 위상지연, (b) TE/TM 위상지연으로 인한 편광진화.

태를 갖는 일대일 방식에 연관되는 점들의 구면으로서 다음과 같은 규칙을 갖는다. 구의 원점을 중심으로 서로 마주보는 두 점들은 직교하는 두 편광(즉 TE, TM 모드)들을 의미하며, 자오선 위의 편광은 편광 타원의 주축이 같은 편광이며, 한편 위도선 위의 편광은 편광타원의 주축이 회전하는 편광을 의미한다.

V_{MC} 에 29.3 V를 인가하였을 경우 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 TE \leftrightarrow TM 모드 결합이 일어났으며, 54 V를 인가하였을 경우 45° 선형편광이 TM 편광으로 진화하는 것을 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 Poincare 구를 이용하여 확인할 수 있었다.

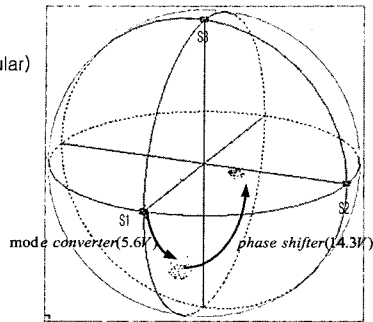
다음으로 소자의 위상변환기의 동작 특성을 검토하였다. 위상변환기는 인가된 전압 V_T 에 의해 S1 축을 중심으로 회전하게 된다.^[14] 마찬가지로 TE/TM 위상변환을 위해 필요한 DC 전압을 다양하게 인가하여 폴래리미터 PSP를 기준으로 편광이 TE 모드와 TM 모드 간에 나타나는 위상변화에 따른 편광의 진화를 그림 7(a), (b)와 같이 Poincare 구를 이용하여 확인하였다. V_T 에 30 V를 인가하였을 경우 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 TE/TM 간 위상차가 발생하였으며, 60 V를 인가하였을 경우 그림 7(b)와 같은 위상변화를 일으켰다. 그리고 TE \leftrightarrow TM 간 모드결합과 TE/TM 위상변화를 V_{MC} 와 V_T 를 차례대로 인가하여 소자의 동작 상태를 순차적으로 살펴보았다. 그림 8(a)는 V_{MC} 에 5.6 V를 인가하여 TE \leftrightarrow TM 모드 결합을 일으킨 후 V_T 에 14.3 V를 인가하였을 경우 소자의

TE \leftrightarrow TM 모드 결합과 TE/TM 위상변화를 단계적으로 보인 Poincare 구를 나타낸다. 마지막으로, $V_{MC}=14.7$ V, $V_T=30.1$ V를 동시에 인가하였을 경우 그림 8(b)와 같이 45°선형 편광이 LHC(Left Handed Circular) 편광으로의 진화를 관찰할 수 있었다.

VI. 결 론

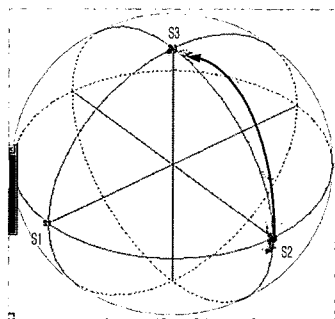
y-축 방향으로 진행하는 x-cut Ti:LiNbO₃ 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 TE \leftrightarrow TM 편광모드변환기와 TE/TM 위상변환기로 구성된 집적광학형 편광조절기를 제작하였다. 소자는 TE \leftrightarrow TM 모드변환기와 TE/TM 위상변환기가 교대로 총 140개로 구성하였으며, 동작 성능을 검증하기 위하여 폴래리미터와 Butt 결합 측정 시스템을 이용하여 편광의 변화를 Poincare 구를 통해서 관찰하였다. 각 모드 변환기와 위상변환기는 V_{MC} , V_T 전극으로 구동되며, 이는 소자 내에서 각각 E_x 와 E_z 전계를 발생시킨다. 결국 E_x 및 E_y 전계에 의해서 TE 모드와 TM 모드 간 모드결합 혹은 위상변화를 나타내며, 각 소자에 대한 동작 상태를 폴래리미터의 PSP 축을 중심으로 편광의 SOP를 Poincare 구에서 살펴보았다. 제작 단계에서 적절한 인가전압을 구동하기 위하여 도파로와 전극이 축 방향으로 잘 정렬되어야 한다. 제작된 전극에 적절한 전압을 인가해주면 임의의 편광에서 특정한 편광 또는 임의의 편광에서 임의의 편광으로의 변화를 관찰할 수 있었다.

S1 : TM
S2 : 45° 선형편광
S3 : LHC(Left handed circular)



(a)

S1 : TM
S2 : 45° 선형편광
S3 : LHC(Left handed circular)



(b)

그림 8. (a) V_{MC} 와 V_T 를 차례대로 증가하였을 경우의 편광진화 모습, (b) V_{MC} 와 V_T 를 동시에 증가하였을 경우의 45° 선형 편광→LHC로의 편광진화.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자(R05-2003-000-10046-0) 사업(한국과학재단으로부터 이관)의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] T. Ono and Y. Yano, "10Gb/s PMD compensation field experiment over 425km using principal state transmission method," *Optics Photonics News*, pp. 61, 2000.
[2] L. Moller, "WDM Polarization Controller in PLC Technology," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 13, 2001.

[3] R. Noe, et al, "Integrated optical LiNbO₃ distributed polarization mode dispersion compensator in 20Gbit/s transmission system," *Electron. Lett.*, Vol. 35, pp. 652-653, 1999.
[4] Michel Chbat, "Managing polarization mode dispersion," *Photonics Spectra*, pp. 100-104, 2000.
[5] P. M. Hill, R. Olshansky, and W. K. Burns, "Optical Polarization Division Multiplexing at 4 Gb/s," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 4, pp. 500-502, 1992.
[6] H. Shimizu, S. Yamazaki, T. Ono, and K. Emura, "Highly Practical Fiber Squeezer Polarization Controller," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 9, pp. 1217-1224, 1991.
[7] S. H. Rumbaugh, M. D Jones, and L. W. Casperson, "Polarization Control Using Nematic Liquid Crystals," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, pp. 459-465, 1990.
[8] G. R. Walker and N. G. Walker, "Polarization control for Coherent communications," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, pp. 438-458, 1990.
[9] R. Noe, H. Heidrich, and D. Hoffmann, "Endless Polarization Control Systems for Coherent Optics," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 1199-1208, 1988.
[10] Fred Heismann, "Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 690-699, 1994.
[11] Fred Heismann and M. S. Whalen, "Broadband reset-free automatic polarization controller," *Electron. Lett.*, Vol. 27, pp. 377-379, 1991.
[12] R. C. Alferness, "Efficient waveguide electro-optic TE↔TM mode converter/wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 36, pp. 513-515, 1980.
[13] Fred Heismann and R. C. Alferness, "Wavelength-Tunable Electrooptic Polarization Conversion in Birefringent Waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 24, pp. 83-93, 1988.
[14] N. G. Walker, G. R. Walker and R. C. Booth, "Performance of Lithium niobate polarisation convertor/tunable filter," *Electron. Lett.*, Vol. 24, pp. 268-270, 1988.
[15] T. Kawazoe, K. Satoh, I. Hayashi, and H. Mori, "Fabrication of Integrated-Optic Polarization Controller Using Z-Propagating Ti-LiNbO₃ Waveguides," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 10, pp. 51-56, 1992.

A Study on Ti:LiNbO₃ Integrated Optical Wavelength Tunable Polarization Mode Controllers

Je-Young Moon and Hong-Sik Jung[†]

*Dept. of Electronic & Computer Engineering, Graduate School, Hong-Ik University,
Jochiwon, Chungnam 339-800, Korea*

[†]*E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr*

(Received June 8, 2005, Revised manuscript June 27, 2005)

We designed and fabricated integrated-optic tunable polarization controllers based on LiNbO₃ with the Ti-indiffused waveguide along the y-axis utilizing the electro-optic effect. The device consists of TE↔TM mode converters and TE/TM phase shifters. We analyzed the operation principles of each device utilizing transfer matrices based on a Jones matrix and simulated shifting of the center wavelength by inducing voltage. We confirmed experimentally that the fabricated devices control the tunability of the center wavelength and the input SOP.

OCIS Codes : 130.0130, 130.2790, 130.3060, 130.3120, 130.3730.