

Ti:LiNbO₃ 편광모드 조절기 제작 및 성능 평가에 관한 연구

문제영 · 정흥식[†]

홍익대학교 대학원 전자전산공학과
Ⓣ 121-791 서울특별시 마포구 상수동 72-1

(2004년 8월 10일 받음, 2004년 11월 19일 수정본 받음)

z-축 방향으로 진행하는 Ti:LiNbO₃ 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 집적광학형 편광조절기를 구현하였다. 소자는 $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$ wave-plate들로 구성되었으며, 각 wave-plate에 인가되는 전압들에 따라 나타나는 위상변화량과 이에 대응되는 편광모드 변환을 정량적으로 검토하고, 폴레리미터 (polarimeter)와 Poincare 구 좌표계를 이용하여 편광 조절기의 동작 상태를 체계적으로 측정하였다. 제작된 편광조절기는 각 wave-plate들의 선택과 인가전압에 따라 어떠한 입력 편광 상태도 특정한 출력 편광 상태로 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

주제어 : polarimeter mode controller, Ti:LiNbO₃ waveguide, TE↔TM mode converter

I. 서 론

사용자의 다양한 정보 충족 욕구를 만족시키기 위한 광 통신망 서비스는 전 세계 통신의 단일화, 음성, 데이터 및 비디오가 복합된 멀티미디어 서비스, 차세대 광 인터넷 등으로 발전하고 있다. 특히, 인터넷 사용의 폭발적인 증가로 데이터 용량은 매 6개월마다 2배씩 증가되고 있으며 이러한 경향은 더욱 가속화될 전망이다. 이러한 추세에 따라 10 Gbps 이상의 전송용량을 갖는 광 전송 시스템이 개발되어 현재 활용 중에 있으며, 전송용량은 계속 증가될 전망이다.

광 전송 시스템에 사용되는 단일모드 광섬유는 광섬유의 비대칭성, 그리고 주변 온도 변화나 외압에 의한 물리적인 요인들로 인하여 복굴절(birefringence) 현상들이 불규칙하게 나타난다. 이러한 현상은 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, 광 간섭기 등의 성능에는 매우 심각하게 작용된다.^[1-2]

일반적으로 광통신시스템에서 3 dB 파워 페널티 기준으로 연간 5분 이하로 시스템 작동정지를 보장하기 위해서 허용될 수 있는 DGD(Differential group delay) 최대 값은 펄스폭의 14% 정도로 추정하고 있다. 따라서 10 Gbps와 40 Gbps에서 허용되는 DGD의 최대값은 14 ps, 3.5 ps 정도이다. 한편 Bellcore에서 보고된 자료에 의하면 1996년도에 가설된 대략 1,000개의 광케이블 중에 80%에서 0.8 ps/km 편광모드 분산 계수가 측정되었으며, 불과 약 20% 정도에서 0.2 ps/km가 측정되었다. 한편 300 km 이상 가설된 광케이블 중에 편

광모드분산 때문에 20% 정도는 10 Gbps 전송시스템에 적합하지 않으며, 40 Gbps 시스템에는 무려 75%가 적합하지 않은 것으로 보고 되고 있다.^[3-4] 따라서 10 Gbps 이하의 광 전송 시스템에서는 문제가 되지 않았던 편광모드 분산(PMD: Polarization Mode Dispersion)은 전송용량이 그 이상으로 증가하면서 매우 부정적으로 작용하게 된다. 따라서, 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. 지금까지 다단계 형태의 광섬유 squeezer^[5-6], 회전형 광 retardation plate, 그리고 액정을 이용한 편광 rotator^[7]와 같이 다양한 종류의 편광 조절기가 개발되었으나 편광 조절 속도, 복잡한 알고리즘 등의 이유로 WDM 전송시스템에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.^[6,8,9]

LiNbO₃를 기반으로 제작된 편광조절기는 구동 전압에 따른 빠른 동작속도, 높은 안정성 및 소형화 등 많은 장점을 가지고 있다. 특히 ns 이상의 빠른 편광조절속도는 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. F. Heismann이 제안한 $\lambda/4$ (quarter), $\lambda/2$ (half), $\lambda/4$ (quarter) wave-plate^[10-11]들을 배열시킨 구조로 편광모드 조절기를 제작하였으며, 각 wave-plate에 인가되는 전압에 따라 편광이 변하는 소자의 동작 특성들이 폴레리미터를 이용하여 체계적으로 조사되었다.

[†] E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

II. 집적광학 편광 조절기의 구조 및 동작원리

그림 1(a)는 전기광학효과를 이용하는 위상천이기(phase shifter) 3개를 조합하여 x-cut LiNbO₃에 z 축 방향으로 광이 진행하도록 배열시킨 집적광학 편광조절기의 개략도이며, 각 wave-plate에 대한 인가전압과 전계분포는 그림 1(b)과 같다. 각각의 위상천이기는 λ/4, λ/2, λ/4 wave-plate로 동작되도록 설계하였다. 각 wave-plate의 전극 구조로부터 그림 1(b)와 같이 E_x(V_i)와 E_y(V_s)의 전계가 형성되며, 전자는 TE↔TM 모드 변환을 후자는 TE-TM 간의 위상차를 각각 일으킨다.

2.1. E_x, E_y 전계에 의한 굴절을 타원체 회전

LiNbO₃의 일반적인 굴절을 타원체는 x-y-z 평면에서 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.^[12]

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} + \frac{2yz}{n_4^2} + \frac{2xz}{n_5^2} + \frac{2xy}{n_6^2} = 1 \quad (1)$$

이 굴절을 타원체에 E_x, E_y 전계가 동시에 가해지게 되면, LiNbO₃의 전기광학효과에 의해서 식 (1)의 굴절을 타원체는 다음과 같이 변하게 된다.

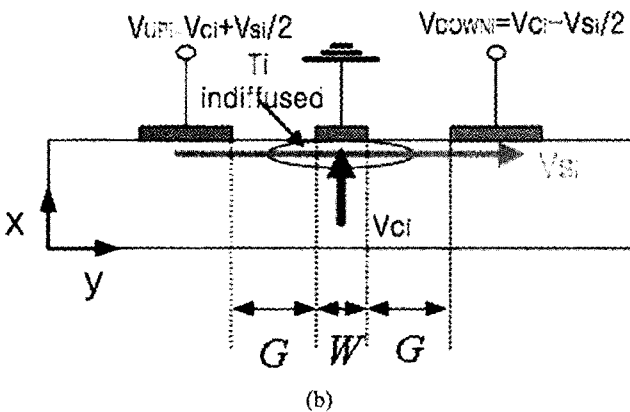
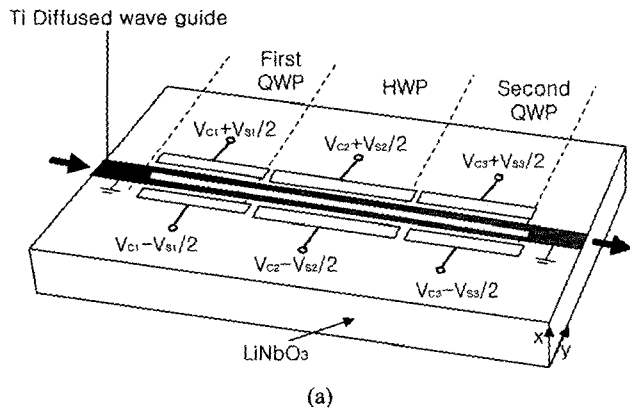


그림 1. (a) Ti:LiNbO₃의 전기광학효과를 이용한 집적광학 편광 조절기, (b) 각 wave-plate에 배열된 전극구조 및 전계분포

$$\frac{1}{n_1^2} = \frac{1}{n_o^2} - r_{22} E_y, \quad \frac{1}{n_2^2} = \frac{1}{n_o^2} + r_{22} E_y \quad (2-1,2)$$

$$\frac{1}{n_3^2} = \frac{1}{n_e^2}, \quad \frac{1}{n_4^2} = r_{51} E_y \quad (2-3,4)$$

$$\frac{1}{n_5^2} = r_{51} E_x, \quad \frac{1}{n_6^2} = -r_{22} E_x \quad (2-5,6)$$

식 (2)를 굴절을 타원체 식 (1)에 대입한 후 x, y 성분만 고려하게 되면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22} E_y\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22} E_y\right) y^2 - 2 r_{22} E_x xy = 1 \quad (3)$$

식 (3)에서 E_x 전계에 의한 xy 계수는 x-y 축의 회전을 의미한다. 그림 2(a)에 기존의 광축과 전기광학효과에 의해 ϕ 만큼 회전된 광축을 도시하였다. 이 두 광 축사이의 관계를 다음과 같은 수식으로 표현 할 수 있다.

$$x = x' \cos \phi - y' \sin \phi \quad (4-1)$$

$$y = x' \sin \phi + y' \cos \phi \quad (4-2)$$

식 (4)를 굴절을 타원체 식 (3)에 대입하여 얻은 수식과, x'-y' 평면에서의 굴절을 타원체 식 (1/n'_x²)x'² + (1/n'_y²)y'² = 1 와 비교하게 되면, 아래 식의 관계를 유도할 수 있다.

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{E_x}{E_y}\right) \quad (5)$$

$$n'_x = \frac{n_o}{\left(1 - n_o^2 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2}\right)^{1/2} \cdot n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2}} \quad (6)$$

$$n'_y = \frac{n_o}{\left(1 + n_o^2 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2}\right)^{1/2} \cdot n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2}} \quad (7)$$

결국 그림 2(b)에서처럼 x-y 평면에서 n_x = n_y = n_o 이었던 굴절률타원체가 E_x와 E_y 전계에 의해 광축이 그림 2(a)와 같이 x'-y'로 ϕ만큼 회전하게 되고 굴절률은 n_x = n_o + Δn, n_y = n_o - Δn로 변형됨을 알 수 있다.

2.2. V_s, V_c 인가전압에 따른 위상변화

그림 1(a)에서 광도파로 양 옆으로 배열된 전극에 인가된 전압 V_{si} (i=1,2,3)로부터 형성되는 E_y 전계가 위상변화를 일으키게 된다. 이는 LiNbO₃의 전기광학계수 텐서 중에 r₁₂와 r₂₂ (r₁₂ = -r₂₂ = 3.4 × 10⁻¹² m/V)에 의해서 굴절률 n_x와 n_y의 변화가 두 TE-TM 모드 간 위상속도 차를 발생시키기 때문이다. 이때 각 wave-plate에 나타나는 위상변화 양은 아래와 같다.^[9,13]

$$\zeta_i = \Gamma_y \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_o^3 \cdot r_{22} \cdot L_i \cdot \frac{V_{Si}}{2G+W} \quad (8)$$

식 (8)에서 $i(=1,2,3)$ 는 wave-plate를 구분하는 첨자이다. 한편 공통 전압 V_{Ci} 와 도파로 위에 형성된 접지 전극은 E_x 전계를 발생시켜서, 전기광학계수 $r_{61}(=-r_{22})$ 에 의해 TE \leftrightarrow TM 모드 변환이 일어나도록 한다. 이 경우 위상변화 양은 다음과 같다.

$$\eta_i = \Gamma_x \cdot \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot n_0^3 \cdot r_{61} \cdot L_i \cdot \frac{V_{Ci}}{G} \quad (9)$$

Γ_y, Γ_x 는 광도파로 내에서 전계 E_y, E_x 와 광파가 서로 결합하는 정도를 나타내는 중복(overlap) 상수 값이다. 그리고, λ_0, n_0 는 각각 파장과 정상파 굴절률을 나타내며, W, G 는 그림 1(b)에서처럼 중앙전극 폭과 두 전극사이의 간격을 의미한다.

그림 1(a) 구조에서 각각의 wave-plate의 TE \leftrightarrow TM 모드 변환과 TE-TM 위상변화의 조합이 궁극적으로는 고정된 선형 위상 지연 π (HWP) 또는 $\pi/2$ (QWP)를 나타내야 하며, 이를 위해서 전압 V_0, V_π 와 전극 길이를 적절히 조절해야 된다. V_0 는 TE \leftrightarrow TM 간에 완벽한 모드변환을 일으키는데 필요한 전압이고, V_π 는 TE-TM 간에 π 만큼 위상변화를 일으키는데 필요한 전압이다. 한편 V_π 는 광도파로에 원하지 않게 나타나는 복굴절(birefringence)을 보상시키는데 필요한 전압이다. 따라서 각 wave-plate(QWP/HWP/QWP)에 인가되는 전압은 아래와 같이 정의된다.

$$V_{C1} = (V_0/2) \sin \alpha \quad (10-1)$$

$$V_{S1} = V_\pi + (V_\pi/2) \cos \alpha \quad (10-2)$$

$$V_{C2} = V_0 \sin \gamma \quad (11-1)$$

$$V_{S2} = V_\pi + V_\pi \cos \gamma \quad (11-2)$$

$$V_{C3} = (V_0/2) \sin(\alpha + \epsilon) \quad (12-1)$$

$$V_{S3} = V_\pi + (V_\pi/2) \cos(\alpha + \epsilon) \quad (12-2)$$

첫 번째, 세 번째 QWP는 x - y 결정축이(즉 LiNbO₃에서는 두 정상파 결정축에 해당됨) $a/2, (\alpha + \epsilon)/2$ 만큼 기울어진 상태에서 동작한다. 한편 두 번째 HWP는 $\gamma/2$ 기울어진 상태에서 동작되며, 이러한 개념을 그림 3(a)에 기하학적으로 나타내었다. 따라서 각 wave-plate들에 인가된 전압 크기에 따라 축들의 기울어진 각도는 달라지며, 이에 대응해서 식 (8), (9)의 위상 변화량도 변하게 되고, 아래 식 (13)과 같이 유도된다. 그러나 각 wave-plate는 어떠한 전압 크기 조건에 서라도 QWP에서는 $\pi/2$ 그리고 HWP에서는 π 위상지연을 그림 3(b)와 같이 나타내게 된다.

$$\zeta_1 = (\pi/2) \cos \alpha, \quad \eta_1 = (\pi/2) \sin \alpha \quad (13-1)$$

$$\zeta_2 = \pi \cos \gamma, \quad \eta_2 = \pi \sin \gamma \quad (13-2)$$

$$\zeta_3 = (\pi/2) \cos(\alpha + \epsilon), \quad \eta_3 = (\pi/2) \sin(\alpha + \epsilon) \quad (13-3)$$

각 wave-plate에 인가되는 두 전압들은 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 $V_{UPi} = V_{Ci} + V_{Si}/2, V_{DOWNi} = V_{Ci} - V_{Si}/2$ 으로 나타낼 수 있으며, 이로부터 V_{Ci}, V_{Si} 전압은 식 (14)와 같이 계산된다.

$$V_{Ci} = \frac{V_{UPi} + V_{DOWNi}}{2} \quad (14-1)$$

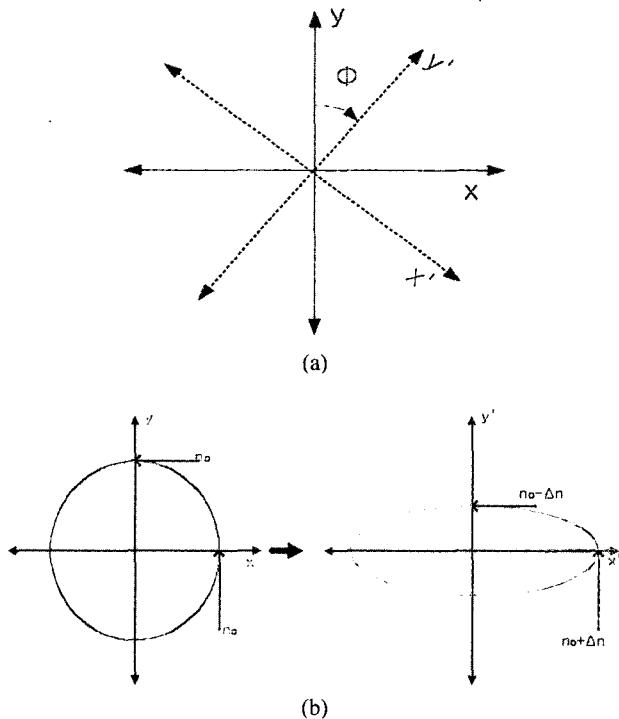


그림 2. (a) 기준 축(x - y)과 회전된 축(x' - y')의 개념도. (b) LiNbO₃의 x - y 축 굴절률과 E_x 와 E_y 전계에 의해 변화된 굴절률.

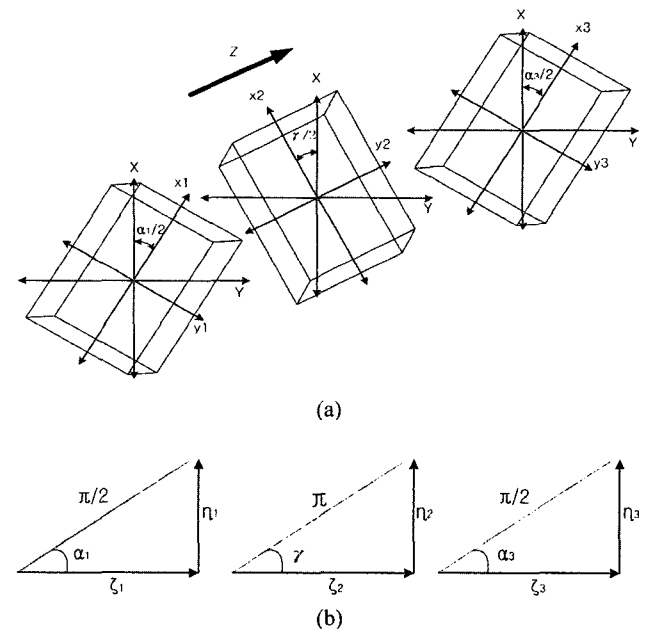


그림 3. (a) 각 wave-plate에 인가된 전압에 따른 주축 X - Y 의 틀어짐과 (b) 이에 대응해서 기하학적으로 나타낸 위상 변화량.

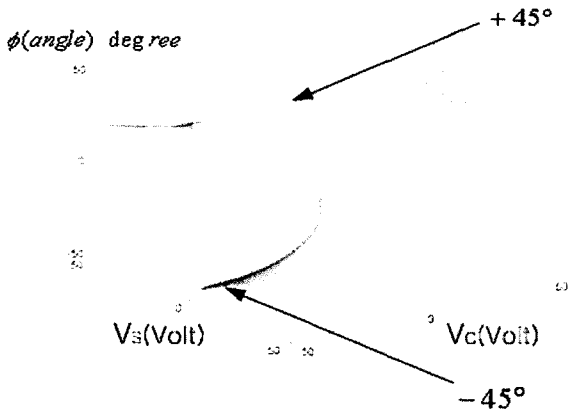


그림 4. 인가전압 V_c 및 V_s 에 의한 광축의 회전각도.

$$V_{Si} = V_{UPi} - V_{DOWNi} \quad (14-2)$$

만약 QWP에 인가된 전압에 의해 새로 정의된 광축을 중심으로 45° 선형 편광된 SOP가 원형 편광으로 변화했다면, TE, TM 모드 간에 $\pi/2$ 만큼 위상변화가 일어난 것이므로, 식 (13-1)은 식 (8)과 식 (9)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\pi}{2} \cdot \cos \alpha_i = \Gamma_y \frac{2\pi}{\lambda_o} n_o^3 r_{22} L_i \frac{V_{Si}}{2G+W} \quad (15-1)$$

$$\frac{\pi}{2} \cdot \sin \alpha_i = \Gamma_x \frac{\pi}{\lambda_o} n_o^3 r_{61} L_i \frac{V_{Ci}}{G} \quad (15-2)$$

위 식 (15)를 연립하여 α 를 구하면 아래 식과 같다.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(-\frac{\Gamma_x}{\Gamma_y} \cdot \frac{2G+W}{2G} \cdot \frac{V_{Ci}}{V_{Si}} \right) \quad (16)$$

식 (16)을 근거로 V_{Ci} 와 V_{Si} 전압을 $-50V \sim +50V$ 로 변화시켰을 때 이 전압들의 조합으로 광축의 기울어짐을 전산 모사하였다. 그림 4에서 보면 알 수 있듯이 인가된 전압 V_{Ci} , V_{Si} 에 의해 광축이 $+45^\circ$ 에서 -45° 로 기울어짐을 확인 할 수 있다.

III. 소자 제작공정

x-cut LiNbO₃ 위에 e-beam 증착기를 이용하여 1000Å 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 채널형 광도파로를 제작하였다. 이 때 LiNbO₃의 z 방향으로 광도파로가 잘 정렬되어야 부가적인 복굴절현상을 최소화 할 수 있다. 그리고, 고온의 확산 과정에서 Li 원소의 외부확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasite) 광도파로를 억제하기 위해서 wet-O₂ 분위기에서 확산을 수행하였으며, 광도파로에 광파를 효율적으로 입사시키기 위해서 입사 단면을 optical grade 수준으로 연마하였다.^[14]

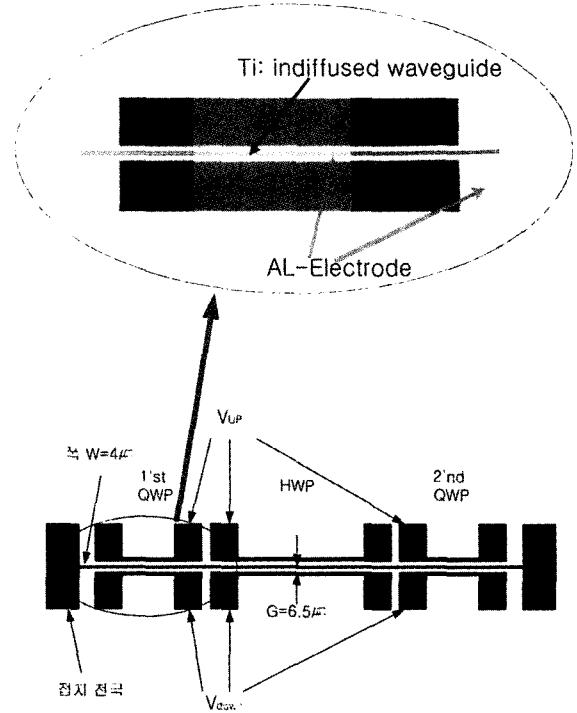


그림 5. 제작된 편광모드 조절기의 광도파로 및 전극구조.

편광모드 조절기의 전극 구조를 보면, x-cut LiNbO₃의 전기광학효과 중 E_x 전계를 이용하기 위해 도파로 위에 접지 전극을 형성하게 된다. 이 때 전극이 덮개 층을 이루고 있으면 광도파로를 통과하는 TM 편광모드는 흡수되어 매우 큰 손실이 일어나게 된다. 이러한 이유로 도파로 위에 SiO₂ 박막층을 형성하는데 본 실험에서는 e-beam 증착 장비를 이용하여 5000Å 두께로 증착하였다. 마지막으로 SiO₂ 박막층 위에 알루미늄을 thermal 증착 장비로 7000Å 증착한 뒤 전극을 형성하였다. 이 때 알루미늄 사진식각 공정에서 중앙 접지전극이 도파로 중앙에 잘 정렬되어야만 효과적인 전계분포를 기대할 수 있다.

또한 전극이 광도파로를 중심으로 대칭적으로 배치되어야만, 식 (10)-(12) 전압들의 조합에 의해 모든 편광상태를 구현 할 수 있게 된다. 마지막으로 Poincare 구면상에서 특정한 SOP를 중심으로 원을 그리는 현상이 일어나는데, 이는 SiO₂ 박막층의 재료적 결함에 기인한 것으로 이러한 문제를 해결해 줄 수 있는 새로운 박막층의 재료가 요구된다. 그림 5는 완성된 전극의 일부분을 마이크로스코프로 촬영한 사진이다.

IV. 동작 특성 측정

1554 nm 파장의 DFB 반도체 레이저다이오드 광원을 광섬유 편광조절기를 통해 제작된 집적광학 편광조절기에 입사시켰다. 그리고 출력 SOP(State of polarization)는 폴래리미터를 이용하여 측정하였다. 여섯 개의 전극에 전압을 동시에 인가시키기 위해서 그림 6과 같은 패키지블럭을 제작하였으

도표 1. HWP에 인가된 전압과 이로부터 계산된 ψ 및 ζ, η .

V_{UP2}	V_{DOWN2}	V_{C2}	V_{S2}	$\psi(^{\circ})$	$\zeta(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$
0 V	-30 V	-15 V	30 V	13.0613	175.3432	40.6788
0 V	24.6 V	12.3 V	-24.6 V	13.0613	175.3432	40.6788
-11.4 V	20.2 V	4.4 V	-31.6 V	3.8882	179.5857	12.2057

도표 2. QWP에 인가된 전압과 이로부터 계산된 ψ 와 ζ, η .

V_{UP1}	V_{DOWN1}	V_{C1}	V_{S1}	$\psi(^{\circ})$	$\zeta(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$
-26V	36 V	5 V	-62 V	2.2612	89.9299	3.5509
-13V	41.5 V	14.25 V	-54.5 V	7.1915	89.2920	4.9915
19V	-30 V	-5.5 V	49 V	3.1411	89.8648	9.8631

며, 소자와 커넥터는 silver paste로 연결하였다.

먼저 제작된 소자에서 HWP와 QWP의 동작 특성을 개별적으로 검토하였다. HWP는 인가된 전압에 의해 회전된 광축을 중심으로 π 위상차를 나타내게 된다. TE 모드가 TM 모드로 진화되는데 필요한 DC 전압을 다양하게 인가하여 폴래리미터 PSP(Principle State of Polarization)를 기준으로 편

광이 TE 모드에서 TM 모드로 진화되는 것을 그림 7과 같은 Poincare 구를 이용하여 확인할 수 있었다. 식 (14)에 의해 V_C 및 V_S 를 계산하였으며, 식 (16)과 (13)을 이용하여 광축의 회전각도 ψ 와 ζ, η 를 각각 계산하여 도표 1에 정리하였다. 그림 8(a)는 회전된 광축에서 폴래리미터에서의 TE 편광은 소자에서 45° 선형편광으로 정의되고 π 위상차를 가질 때 TM 편광으로 변하게 된다. 이 때 회전각도 ψ 로부터 소자의 PSP 축을 기준으로 편광이 45° - ψ 가 됨을 유추할 수 있다. 결국 측정된 폴래리미터의 PSP를 기준으로 정의된 TE에서 TM으로의 변화는 소자의 PSP를 중심으로 45° - ψ 의 SOP가 -45° - ψ 로 진화된 것임을 알 수 있다.

다음으로 QWP는 인가전압에 의해 회전된 PSP 축을 중심으로 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 나타내는데, 회전된 광축에서 45° 선형 편광으로 정의되는 SOP가 구형(circular) 편광으로 진화되는 것을 의미한다. 도표 2에 요약된 전압들을 인가하여 45° 선형 편광이 구형편광으로 진화되는 것을 그림 9의 Poincare 구를 통해서 확인하였으며, 도표 2에 $V_C, V_S, \psi, \zeta, \eta$ 를 계산하여 정리하였다. 마찬가지로 그림 8(b)에서 폴래리미터의 PSP를 중심으로 한 45° 선형 편광은 소자의 PSP에서 45° - ψ 임을 유추할 수 있다.

본 연구에서 제작된 편광 조절기는 두 개의 QWP와 한 개의 HWP 전극 중 적절하게 전압을 인가할 경우 원하는 편광을 얻을 수 있어야 한다. 따라서 각 전극에 다양한 전압들을 인가해 줌으로써 임의의 편광에서 특정한 편광으로의 변화 추이를 검토하였다. 먼저 QWP/HWP/QWP 각각에 도표 3에 요약된 전압들을 인가하여 폴래리미터의 PSP 축을 중심으로 정의되는 임의의 편광 모드(S1:0.43;S2:0.87;S3:-0.21)가 RHC(Right Handed Circular) 편광 상태로 진화되는 것을 그림 10의 Poincare 구를 통하여 확인하였다. 그러므로, 적절한 전압을 인가해 주면, 어떠한 편광상태도 원하는 편광으로 바꿀 수 있다.

다음은 동일한 두개의 QWP를 이용해서도 임의의 편광(S1:-0.52;S2:0.32;S3:0.63)을 특정한 TM 편광으로 변환시킬 수 있었다. 소자의 양 끝에 있는 두 QWP 각각에 $V_{DOWN1} = 25.4V, V_{DOWN3} = 21.6V$ 를 인가할 경우 그림 11(a)와 같은 Poincare

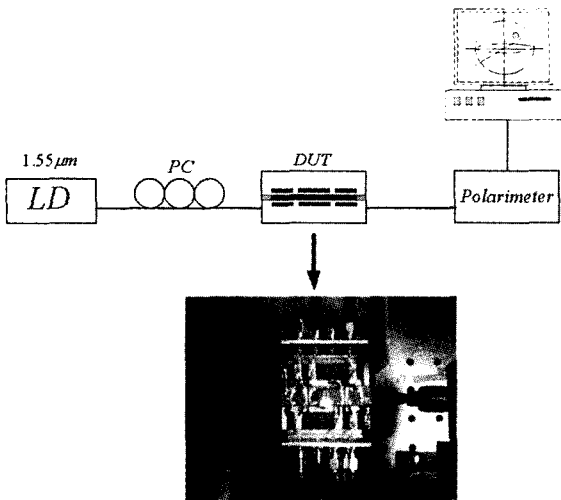


그림 6. 측정 시스템.

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

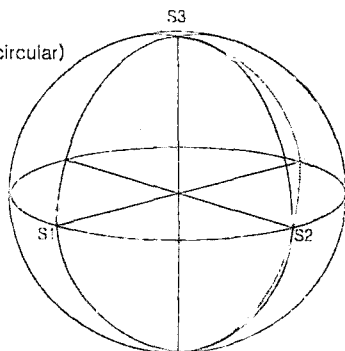


그림 7. HWP를 이용하여 TE 편광이 TM 편광으로 변하는 Poincare.

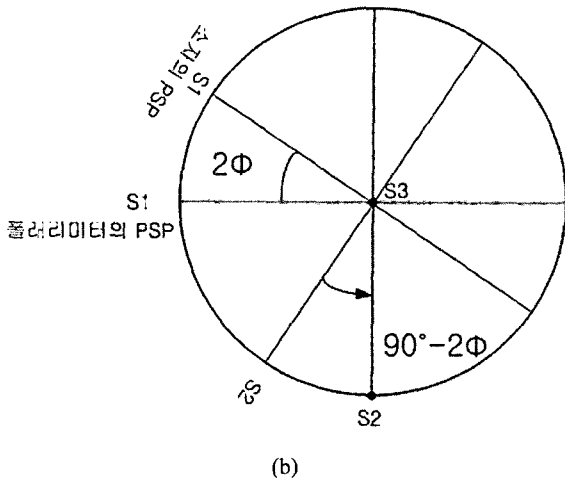
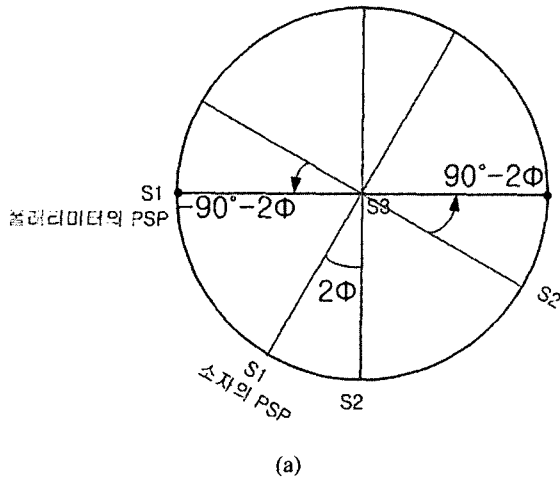


그림 8. (a) HWP를 이용하여 TE 편광이 TM 편광으로 변할 때 소자 PSP와 폴래리미터의 PSP, (b) QWP를 이용하여 45° 선형편광이 LHC 편광으로 변할 때 소자 PSP와 폴래리미터의 PSP (S1: TM, S2: 45° 선형편광, S3: TE).

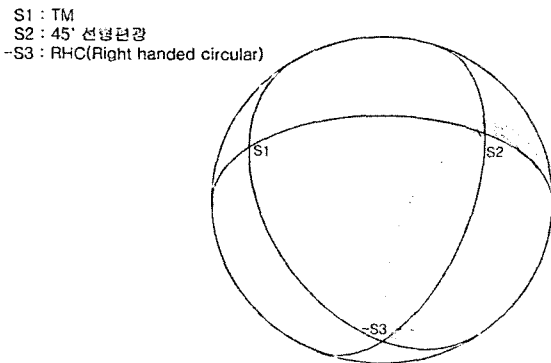


그림 9. QWP를 이용하여 원형 편광(RHC)이 45° 선형 편광으로 변하는 Poincare.

결과를 얻을 수 있었다. 또한 QWP/HWP 전극에 각각 $V_{DOWN1} = 21.7V$, $V_{DOWN2} = 17.1V$ 를 인가할 경우 그림 11(b)와 같은 결과를 얻었다. 끝으로 도표 4에 요약된 전압들을 QWP/HWP/

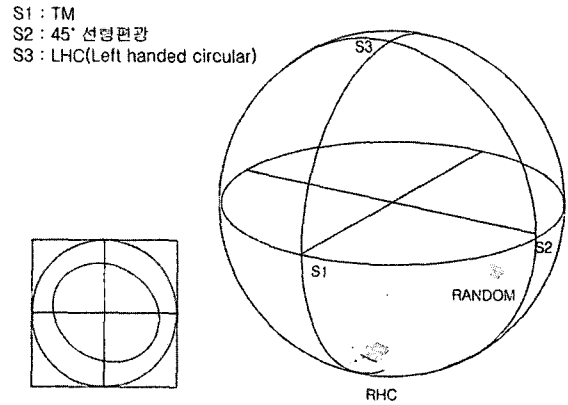


그림 10. QWP/HWP/QWP를 동시에 이용하여 임의의 편광이 RHC 편광으로 진화한 Poincare.

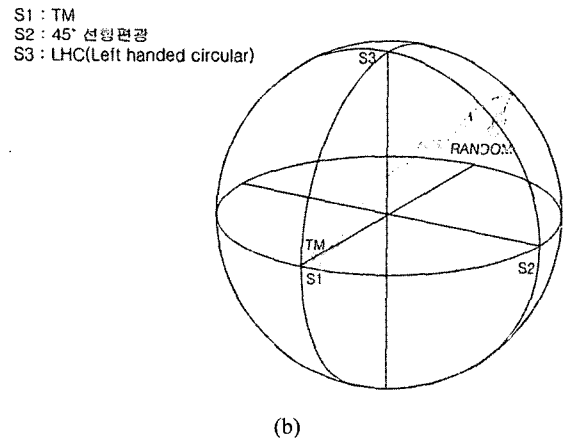
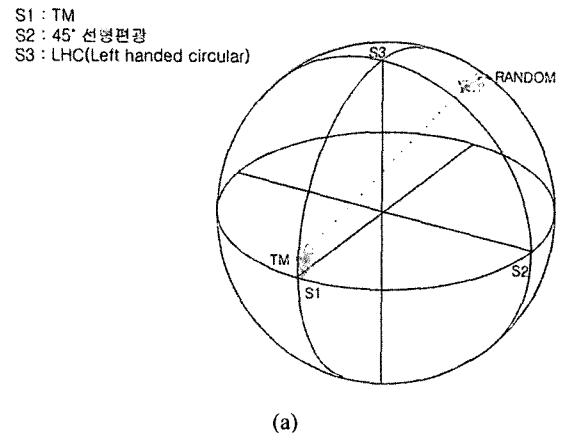


그림 11. (a) QWP/QWP (b) QWP/HWP를 이용하여 임의의 편광이 TM 편광으로 진화한 Poincare.

QWP에 동시에 인가하여 임의의 편광(S1:0.66;S2:0.44;S3:0.59)에서 또 다른 임의의 편광(S1:0.76;S2:0.17; S3:-0.68)으로 변환되는 것을 확인할 수 있었으며, 관련된 Poincare 구는 그림 12과 같다.

도표 3. QWP/HWP/QWP에 인가된 전압 (Random→RHC).

	V _{UP} (volt)	V _{DOWN} (volt)
1'st QWP	19.9V	-10.1V
HWP	+21.9V	-7.4V
2'nd QWP	-29.9V	-12.1V

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

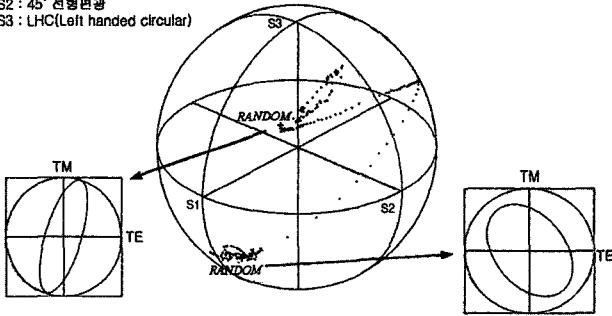


그림 12. QWP/HWP/QWP를 이용하여 임의의 편광에서 또 다른 임의의 편광으로 진화를 나타낸 Poincare.

도표 4. QWP/HWP/QWP에 인가된 전압(Random→Random)

	V _{UP} (volt)	V _{DOWN} (volt)
1'st QWP	29.5V	15.1V
HWP	0	17.1V
2'nd QWP	-29.8V	-31.2V

V. 결 론

z-축 방향으로 진행하는 Ti:LiNbO₃ 광도파로와 전기광학효과를 이용하는 $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$ wave-plate들로 구성된 집적광학형 편광조절기를 제작하였다. 동작 성능을 검증하기 위하여 여섯 개의 전극에 전압을 인가하기 위한 패키지 블럭과 기판을 제작하였으며, 플라세리미터와 end-fire 측정 시스템을 이용하여 편광의 변화를 Poincare 구를 통해서 관찰하였다. 각 wave-plate는 V_{UP}, V_{DOWN} 전극으로 구동되며, 이는 V_c 및 V_s로 나누어 E_x 와 E_y 전계 성분을 유추할 수 있다. 결국 E_x 및 E_y 전계에 의해서 회전된 광축을 중심으로 특정한 위상변화($\lambda/4$, $\lambda/2$)가 일어나게 되고, 그에 따른 인가전압을 측정하여 광축의 회전 각도를 계산하였다. 플라세리미터의 PSP 축을 중심으로 측정된 SOP는 소자의 PSP를 기준으로 한 SOP라 할 수 없으므로, 인가전압에 따른 소자의 광축회전으로 소자의 PSP를 기준으로 SOP를 유추할 수 있었다. 마지막으로 여러 전극의 조합으로 적절한 전압을 인가해주면 임의의 편광에서 특정한 편광 또는 임의의 편광에서 임의의 편광으로의 변화를 관찰 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자(R05-2003-000-10046-0) 사업 지원으로 수행되었습니다.

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] A. Yariv, *Quantum Electronics*. New York: Wiley, pp. 296-309, 1967.
- [13] Fred Heismann, "Integrated-optic polarization transformer for reset-free endless polarization control," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, pp. 1898-1906, 1989.
- [14] 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 Fabrication and Performance Evaluation of Ti:LiNbO₃ 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 August 10, 2004, Revised manuscript November 19, 2004)

We investigated a LiNbO₃ based integrated-optic polarization controller with the Ti-indiffused waveguide along the z-axis utilizing the electro-optic effect. The device consists of a first quarter-wave ($\lambda/4$) followed by a half-wave ($\lambda/2$) and a second quarter-wave ($\lambda/4$) wave-plate. We analyzed the amount of phase change and the transformation of the polarized mode as a function of the combination of wave-plates and of their applied voltages. The operation has been systematically measured utilizing a polarimeter and Poincare sphere. We confirmed that the fabricated device controls the transformations from any arbitrary input state of polarization (SOP) into any general output SOP.

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