

## Ti:LiNbO<sub>3</sub> 집적광학형 편광모드 조절기의 이론적 고찰

문제영 · 정홍식<sup>†</sup>

홍익대학교, 대학원, 전자전산공학과  
Ⓣ 339-800 충남 연기군 조치원읍 신안동

이한영

광통신연구센터, 전자부품연구원  
Ⓣ 451-865 경기도 평택시 진위면 마산리 455-6

(2003년 10월 29일 받음, 2004년 2월 23일 수정본 받음)

z-축 방향으로 진행하는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 설계된 집적광학형 편광조절기를 검토하였다. 소자는  $\lambda/4$  -  $\lambda/2$  -  $\lambda/4$  wave-plates들로 구성되었으며, Jones matrix에 근거하여 유도된 전달 매트릭스와 Poincare 구 좌표계를 이용하여 소자의 동작원리를 체계적으로 분석하였다. 편광제어에 필요한 전달들을 전산모사 하였으며, 이로부터 본 연구에서 제안된 편광조절기는 어떠한 입력 편광 상태에서부터 특정한 출력 편광 상태로 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

주제어 : polarization mode dispersion, Jones matrix, Poincare sphere.

### 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 10Gbps 이상의 전송용량을 갖는 광 전송 시스템이 개발되어 현재 활용 중에 있으며, 전송용량은 계속 증가될 전망이다.

광 전송 시스템에 사용되는 단일모드 광섬유는 광섬유 자체의 완벽하지 못한 대칭성, 그리고 현상의 주변 온도 변화나 외압에 의한 물리적인 구조변화로 인하여 복굴절(birefringence) 현상들이 불규칙하게 나타난다. 이러한 현상은 광섬유 내에서 축퇴(degenerate)되어 일정한 편광상태로 진행하던 기본 모드가 수평과 수직 모드로 분리되어 나타나 두 모드 간에 위상속도 차(DGD: Differential Group Delay)를 발생시키게 되고, 이로 인해서 궁극적으로는 펄스가 퍼지게 된다. 그런데 이와 관련하여 더 심각한 문제는 DGD가 비선형적이면서, 무작위하게 나타난다는 것이다. 한편 이러한 현상은 편광 의존적인 특성을 갖는 광 통신 부품들의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, PDL(polarization dependent loss) 형태로 편광 의존적인 광 파워의 손실이 시스템 성능 전반에 부정적으로 영향이 미치게 된다. 특히 복굴절 재료를 이용하여 제작된 전기광학 광변조기와 스위치, 전계흡수 광변조기, 광간섭기 등의 성능에는 매우 심각하게 작용된다.<sup>[1-2]</sup>

일반적으로 광통신시스템에서 3dB 파워 페널티 기준으로 연간 5분 이하로 시스템 작동정지를 보장하기 위해서 허용될 수 있는 DGD 최대 값은 펄스 duration의 14% 정도로 추정하고 있다. 따라서 10Gbps와 40Gbps에서 허용되는 DGD의 최대 값은 14ps, 3.5ps 정도가 된다. 한편 Bellcore에서 보고 된 자료에 의하면 1996년도에 가설된 대략 1,000개의 광케이블 중에 80%에서 0.8ps/km 편광모드 분산 계수가 측정되었으며, 불과 약 20% 정도에서 0.2ps/km가 측정되었다. 한편 300km 이상 가설된 광케이블 중에 편광모드분산 때문에 20% 정도는 10Gbps 전송시스템에 적합하지 않으며, 40Gbps 시스템에는 무려 75%가 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다.<sup>[3-4]</sup>

따라서 10Gbps 이하의 전송용량에서는 별로 시스템에 영향을 미치지 않던 편광모드 분산(PMD: Polarization Mode Dispersion)은 전송용량이 그 이상으로 증가함에 따라 시스템 성능에 매우 부정적으로 작용하게 된다. 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 단단계 형태의 광섬유 squeezer, 회전형 광 retardation plate, 그리고 액정을 이용한 편광 rotator와 같이 다양한 종류의 편광 조절기가 개발되었으나 편광 조절 속도, 복잡한 알고리즘 등의 이유로 WDM 전송시스템에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.<sup>[5]</sup>

본 논문에서는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로와 복굴절을 이용하여 실시간으로 편광 상태를 조절할 수 있는 집적광학 편광모드 조절기의 구조, 동작 원리 및 성능 등을 이론적인 접근 통해서 체계적으로 검토하였다. 특히 F. Heismann이 제안한  $\lambda/4$ (quarter),  $\lambda/2$ (half)- $\lambda/4$ (quarter) wave-plate들을 조합시킨 형

<sup>†</sup>E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

태의 집적광학 편광모드 조절기 구조와 관련된 수식들을 중심으로 분석하였으며, 전산모사 실험들을 통해서 얻어진 결과들은 편광모드 조절기 설계에 적용하였다.<sup>[6-11]</sup>

### II. 집적광학 편광 조절기의 구조 및 동작원리

그림 1(a)는 전기광학효과를 이용하는 위상천이(phase shift) 기 3개를 조합하여 x-cut LiNbO<sub>3</sub>에 z축 방향으로 광이 진행하도록 배열시킨 집적광학 편광조절기의 개략도이며, 각 위상천이기에 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<sub>x</sub>(V<sub>c</sub>)와 E<sub>y</sub>(V<sub>s</sub>)의 전계(electric field)가 형성되며, 전자는 TE-TM 간의 위상천이, 후자는 TE↔TM 모드 변환을 각각 일으킨다.

광도파로 양 옆으로 배열된 전극들에 인가된 전압 V<sub>Si</sub> (i=1, 2, 3)로부터 기인되는 E<sub>y</sub> 전계가 TE-TM 간에 위상천이를 일으키게 된다. 이는 LiNbO<sub>3</sub>의 전기광학계수 텐서(tensor) 중에 r<sub>22</sub>와 r<sub>12</sub>(r<sub>12</sub>=-r<sub>22</sub>≃3.4×10<sup>-12</sup>m/V)에 의해서 굴절률 n<sub>x</sub>와 n<sub>y</sub>의 서로 다른 변화가 두 TE, TM 모드 간 위상속도 차를 발생시킨다. 이때 각 위상천이기에 나타나는 위상변화 양은 아래와 같다.<sup>[7]</sup>

$$\zeta_i = \Gamma_y \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r_{22} L_i \frac{V_{Si}}{2G+W} \quad (1)$$

여기서 i(=1, 2, 3)는 각 위상천이를 구분하는 첨자이다. 한편 공통 전압 V<sub>Ci</sub>와 도파로 위에 형성된 접지 전극은 E<sub>x</sub> 전계를 발생시켜서, 전기광학계수 r<sub>61</sub>(=r<sub>22</sub>)에 의해 TE↔TM 모드 변환이 일어나도록 한다. 이 경우에 위상변화 양은 다음과 같다.

$$\eta_i = \Gamma_x \frac{\pi}{\lambda_0} n_0^3 r_{61} L_i \frac{V_{Ci}}{G} \quad (2)$$

Γ<sub>y</sub>, Γ<sub>x</sub>는 광도파로 내에서 전계 E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub>와 광파가 서로 결합하는 정도를 나타내는 중복(overlap) 상수 값이며, λ<sub>0</sub>, n<sub>0</sub>는 파장과 정상파 굴절률(ordinary refractive index)이며, W, G는 전극 폭과 간격을 의미한다.

그림 1(a) 구조에서 각각의 wave-plate들의 TE↔TM 모드 변환과 TE-TM 위상변화의 조합이 궁극적으로는 고정된 선형 위상 지연 π(HWP) 또는 π/2(QWP)를 나타내야 하며, 이를 위해서 전압 V<sub>0</sub>, V<sub>π</sub>와 전극 길이를 적절히 조절해야 된다. V<sub>0</sub>는 TE↔TM 간에 완벽한 모드변환을 일으키는데 필요한 전압이고, V<sub>π</sub>는 TE-TM 간에 π 만큼 위상변화를 일으키는데 필요한 전압이다. 한편 V<sub>T</sub>는 광도파로에 원하지 않게 나타나는 복굴절(birefringence)을 보상시키는데 필요한 전압이다. 따라서 각 wave-plate들 (QWP/ HWP/QWP)에 인가되는 전압은 아래와 같이 정의된다.

$$V_{C1} = (V_0/2) \sin \alpha \quad (3-1)$$

$$V_{S1} = V_T + (V_\pi/2) \cos \alpha \quad (3-2)$$

$$V_{C2} = V_0 \sin \gamma \quad (4-1)$$

$$V_{S2} = V_T + V_\pi \cos \gamma \quad (4-2)$$

$$V_{C3} = (V_0/2) \sin(\alpha + \epsilon) \quad (5-1)$$

$$V_{S3} = V_T + (V_\pi/2) \cos(\alpha + \epsilon) \quad (5-2)$$

첫 번째, 세 번째 QWP는 x, y 결정축이(즉 리튬나오베이트에서는 두 정상파 결정축에 해당됨) α/2, (α+ε)/2의 기울어진 상태에서 동작한다. 한편 두 번째 HWP는 γ/2 기울어진 상태에서 동작되며, 이러한 개념을 그림 2(a)에 기하학적으로 나타내었다. 따라서 각 wave-plate들에 인가된 전압 크기에 따라 축들의 기울어진 각도는 달라지며, 이에 대응해서 식 (1), (2)의 위상 변화량도 변하게 되고, 아래 식 (6)과 같이 유도된다. 그러나 각 wave-plate는 어떠한 전압 크기 조건에 서라도 QWP에서는 π/2 그리고 HWP에서는 π 위상지연을 그림 2(b)와 같이 나타나게 된다.

$$\zeta_1 = (\pi/2) \cos \alpha, \quad \eta_1 = (\pi/2) \sin \alpha \quad (6-1)$$

$$\zeta_2 = \pi \cos \gamma, \quad \eta_2 = \pi \sin \gamma \quad (6-2)$$

$$\zeta_3 = (\pi/2) \cos(\alpha + \epsilon), \quad \eta_3 = (\pi/2) \sin(\alpha + \epsilon) \quad (6-3)$$

### III. 편광 조절기의 Jones matrix 및 전달함수

그림 1(a)와 같이 세 개의 독립된 전극에 인가된 전압 크기

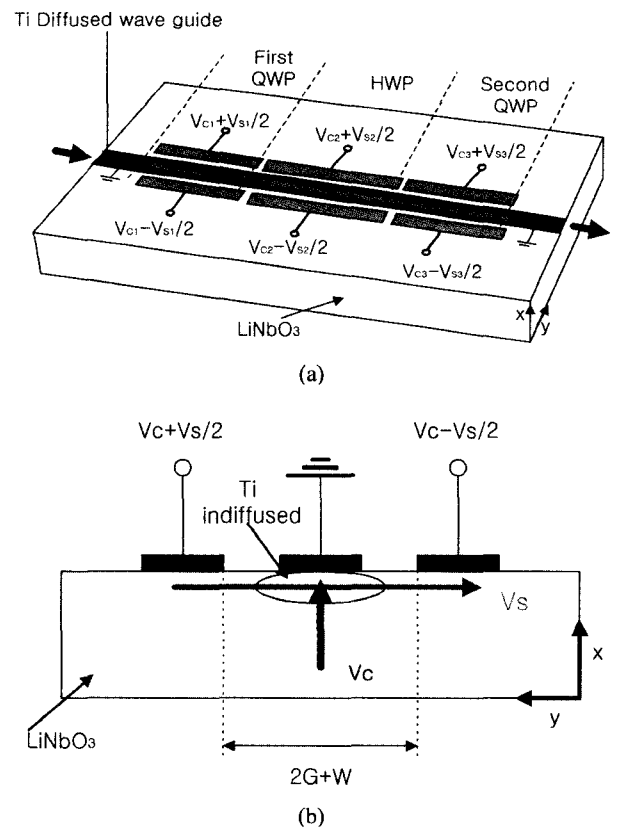


그림 1. (a) Ti:LiNbO<sub>3</sub>의 전기광학효과를 이용한 집적광학 편광 조절기의 구조, (b) 각 wave-plate에 배열된 전극구조 및 전계분포.

에 따라 각 wave-plate의 주축(principal axis)들이 그림 2(a)와 같이 틀어지게 되지만, 틀어진 각 축에서 항상 일정한 위상변화  $\pi/2, \pi, \pi/2$ 가 나타나기 때문에 입력 편광을 원하는 편광상태로 바꿀 수 있는 것이다. 따라서 본 절에서는 주축 회전을 동반하는 각 위상 천이기에 대한 Jones matrix를 구하고, 이로부터 세 개의 연속된 위상 천이기를 고려한 전체적인 Jones matrix를 유도할 것이다.

**3.1. 편광 조절기의 Jones matrix**

LiNbO<sub>3</sub>와 같은 복굴절 결정에서, 광축방향(crystal axis) 이외의 진행 방향으로 입사된 광파는 두 개의 직교 편광 즉 정상광파(ordinary ray)와 이상광파(extraordinary ray)로 구분되며, 이에 대응해서 두 굴절률  $n_o, n_e$ 가 존재하게 된다. 두 직교 광파가 길이  $L$ 인 결정을 진행할 때 나타나는 위상차는 아래와 같다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} |n_e - n_o| L \tag{7}$$

이제 두께가  $L$ 인 위상천이기가 기준 축 X-Y에 대해서  $\theta$ 만큼 기울어져 있을 때 회전된 주축(x-y)의 관계식은 다음과 같다.  $X = x \cos \theta + y \sin \theta, Y = -x \sin \theta + y \cos \theta$  관계로부터 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$V_X = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, V_Y = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \tag{8}$$

한편 선형 이방성 물질에서, 광파의 전파에 대한 고유치는 아래와 같이 표현된다.

$$\lambda_X = e^{i n_e k_0 L}, \lambda_Y = e^{i n_o k_0 L} \tag{9}$$

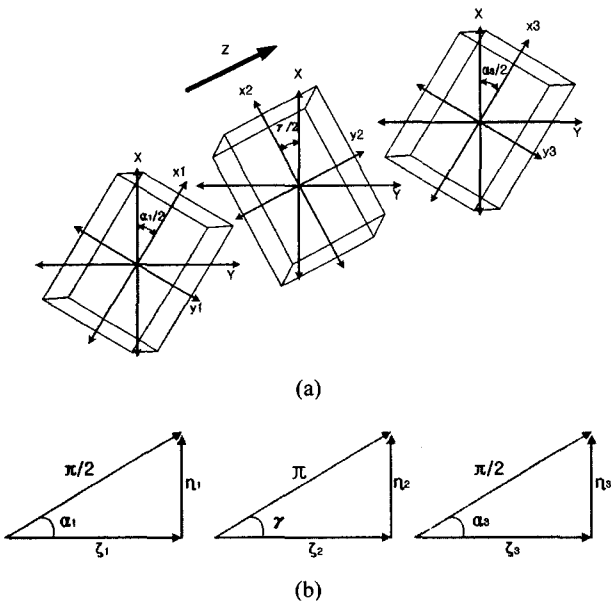


그림 2. (a) 각 wave-plate에 인가된 전압에 따라 주축 X, Y가 틀어짐과 (b) 이에 대응해서 기하학적으로 나타난 위상 변화량

위상천이기의 2x2 Jones matrix를  $M$ 이라 하면,  $M V_X = \lambda_X V_X, M V_Y = \lambda_Y V_Y$ 의 관계와  $\phi_e = n_e k_0 L, \phi_o = n_o k_0 L$ 로부터  $M$ 을 유도할 경우 아래와 같다.

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta e^{i\phi_e} + \sin^2 \theta e^{i\phi_o} & (e^{i\phi_e} - e^{i\phi_o}) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{i\phi_e} - e^{i\phi_o}) \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta e^{i\phi_e} + \sin^2 \theta e^{i\phi_o} \end{bmatrix} \tag{10}$$

식 (10)에서  $\psi = \frac{\phi_e + \phi_o}{2}, \phi = \phi_e - \phi_o$ 로 치환하고, 공통위상 성분인  $e^{i\psi}$ 를 생략하면, Jones matrix  $M$ 은 다음과 같이 간략화 된다.

$$M(\phi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} + i \cos 2\theta \sin \frac{\phi}{2} & i \sin 2\theta \sin \frac{\phi}{2} \\ i \sin 2\theta \sin \frac{\phi}{2} & \cos \frac{\phi}{2} - i \cos 2\theta \sin \frac{\phi}{2} \end{bmatrix} \tag{11}$$

식 (11)은 X, Y 축들로부터  $\theta$ 만큼 회전된 새로운 x, y-축들을 기준으로 정의된 TE-TM 간의 위상변화를 Jones Matrix로 나타낸 것이다. 축의 회전이 없을 경우( $\theta=0$ ), 식 (11)은 아래와 같이 간략히 된다.

$$M(\phi, 0) = \begin{bmatrix} e^{i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{bmatrix} \tag{12}$$

**3.2. QWP, HWP의 전달함수**

QWP의 전달 matrix는  $\theta_1 = \alpha/2$ 만큼 회전된 축을 중심으로  $-\pi/2$ 만큼 위상이 변화된 것이므로, 식 (11)로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(\alpha) = M(-\pi/2, \alpha/2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - i \cos \alpha & -i \sin \alpha \\ -i \sin \alpha & 1 + i \cos \alpha \end{bmatrix} \tag{13}$$

HWP는  $\theta_2 = \gamma/2$ 만큼 회전된 축을 중심으로  $-\pi$ 만큼 위상이 천이된 것이며, 아래와 같다.

$$H(\gamma) = M(-\pi, \gamma/2) = \begin{bmatrix} -i \cos \gamma & -i \sin \gamma \\ -i \sin \gamma & i \cos \gamma \end{bmatrix} \tag{14}$$

마지막으로 세 번째에 위치한 QWP는 첫 번째 QWP와 상대적으로  $\epsilon$ 만큼 회전되어 있을 경우라 가정될 경우, 축은 궁극적으로  $\alpha + \epsilon$ 만큼 회전된 것이기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - i \cos(\alpha + \epsilon) & -i \sin(\alpha + \epsilon) \\ -i \sin(\alpha + \epsilon) & 1 + i \cos(\alpha + \epsilon) \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$Q(\alpha + \epsilon) = M(-\pi/2, (\alpha + \epsilon)/2)$$

따라서 그림 1과 같은 구조의 편광조절기의 전체적인 전달 matrix는 QWP/HWP/QWP의 각 전달 matrix를 조합하여 아래와 같은 식으로 유도된다.

$$\begin{aligned}
 T &= Q(\alpha + \epsilon) \cdot H(\gamma) \cdot Q(\alpha) \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - i\cos(\alpha + \epsilon) & -i\sin(\alpha + \epsilon) \\ -i\sin(\alpha + \epsilon) & 1 + i\cos(\alpha + \epsilon) \end{bmatrix} \times \\
 &\quad \begin{bmatrix} -i\cos\gamma & -i\sin\gamma \\ -i\sin\gamma & i\cos\gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 - i\cos\alpha & -i\sin\alpha \\ -i\sin\alpha & 1 + i\cos\alpha \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} A - iB & -C - iD \\ C - iD & A + iB \end{bmatrix} \quad (16) \\
 B &= -\sin\gamma' \sin(\alpha + \epsilon/2) \quad A = -\cos\gamma' \cos(\epsilon/2) \\
 C &= -\cos\gamma' \sin(\epsilon/2) \\
 D &= +\sin\gamma' \cos(\alpha + \epsilon/2), \quad \gamma' = \gamma - \alpha - \epsilon/2
 \end{aligned}$$

### 3.3. Jones Matrix를 이용한 편광상태

그림 3에 나타남과 같이 왼쪽과 오른쪽 원형(circular) 편광(polarization)을 기준으로 일반적인 편광 상태는 LHC(Left-handed circular) 편광을  $-\phi/2$  만큼 회전한 축을 중심으로  $2\theta$  만큼 위상을 변경시켜서 나타낼 수 있으며, Jones matrix와 Jones 벡터로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(2\theta, -\phi/2) = \begin{bmatrix} \cos\theta + i\cos\phi\sin\theta & -i\sin\phi\sin\theta \\ -i\sin\phi\sin\theta & \cos\theta - i\cos\phi\sin\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$J = M \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta + i\sin\theta e^{-i\phi} \\ i\cos\theta + \sin\theta e^{-i\phi} \end{bmatrix} \quad (18)$$

## IV. 편광조절기의 출력 편광상태(SOP)

3절에서 유도된 편광조절기의 전체 전달 matrix, (16)과 LHC를 기준으로 한 입력편광 상태 matrix (18)로부터, 출력 편광 상태는  $J_{OUT} = T \times J_{INPUT}$  관계로부터 다음과 같이 유도된다.

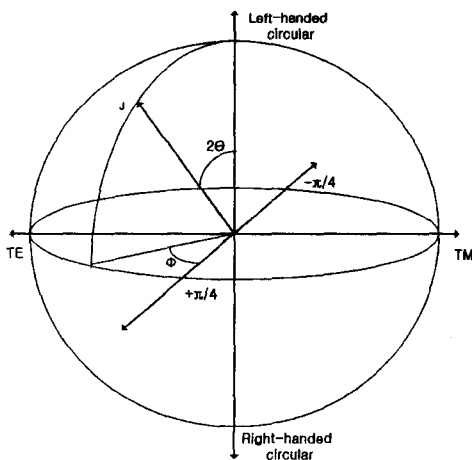


그림 3. LHC(Left-handed circular)를 기준으로 하여 구 좌표계에 나타낸 편광 상태

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_{out} + i\sin\theta_{out} e^{-i\phi_{out}} \\ i\cos\theta_{out} + \sin\theta_{out} e^{-i\phi_{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - iB & -C - iD \\ C - iD & A + iB \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta_{in} + i\sin\theta_{in} e^{-i\phi_{in}} \\ i\cos\theta_{in} + \sin\theta_{in} e^{-i\phi_{in}} \end{bmatrix} \quad (19-1)$$

$$\begin{aligned}
 \cos 2\theta_{out} &= \\
 \cos 2\theta_{in} \cos 2\gamma + \sin 2\theta_{in} \sin 2\gamma' \sin(\phi_{in} + \alpha) & \quad (19-2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tan \phi_{out} &= \\
 \frac{Z_{in}(1 - 2\sin^2\gamma' \cos^2\alpha') - X_{in} \sin^2\gamma' \sin 2\alpha' - Y_{in} \sin 2\gamma' \cos \alpha'}{X_{in}(1 - 2\sin^2\gamma' \sin^2\alpha') - Z_{in} \sin^2\gamma' \sin 2\alpha' - Y_{in} \sin 2\gamma' \sin \alpha'} & \quad (19-3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{in} &= \sin 2\theta_{in} \cos(\phi_{in} - \epsilon), \quad Y_{in} = \cos 2\theta_{in}, \\
 Z_{in} &= \sin 2\theta_{in} \sin(\phi_{in} - \epsilon), \quad \alpha' = \alpha + \epsilon \quad (19-4)
 \end{aligned}$$

식 (19-1)과 (19-2)로부터  $\alpha'$ 와  $\gamma'$ 에 대하여 유도할 경우, 아래와 같은 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\tan \alpha' = \frac{X_{out} - X_{in}}{Z_{out} - Z_{in}} \quad (20-1)$$

$$\tan \gamma' = \frac{\pm \sqrt{(X_{out} - X_{in})^2 + (Z_{out} - Z_{in})^2}}{Y_{out} + Y_{in}} \quad (20-2)$$

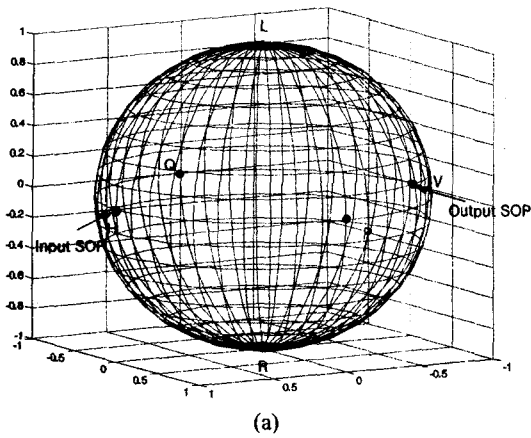
$$\begin{aligned}
 X_{out} &= \sin 2\theta_{out} \cos \phi_{out} \\
 Y_{out} &= \cos 2\theta_{out} \\
 Z_{out} &= \sin 2\theta_{out} \sin \phi_{out}
 \end{aligned}$$

입력편광 상태와 원하는 출력 편광상태에 대한 정보를 알면, 식 (20)으로부터  $\alpha'$ 와  $\gamma'$ 를 구할 수 있다. 그리고 식 (19)에  $\alpha'$ 와  $\gamma'$ 를 대입할 경우 전달함수는 어떤 경로로 출력편광 상태로 진화하는지 알 수 있게 된다.  $\alpha'$ 와  $\gamma'$ 로부터 편광조절기에 인가되는 전압들을 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

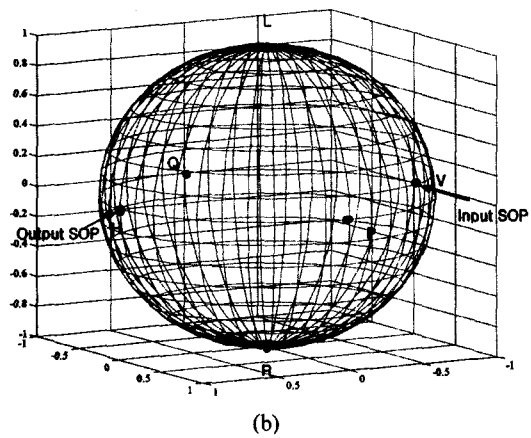
Poincare 구 좌표계를 이용할 경우 입출력 편광상태와 진화과정을 도식적으로 접근할 수 있다. 그림 4(a)는 전달함수 (19)를 통해서 TE 입력 편광이 TM 편광으로 출력되는 것을 나타낸 Poincare 구 좌표계이다. 이 경우에 TE 입력 모드는  $\theta_{in} = 45^\circ$ ,  $\phi_{in} = 90^\circ$ ,  $\epsilon = 0^\circ$ , TM 출력 모드는  $\theta_{out} = 45^\circ$ ,  $\phi_{out} = -90^\circ$ 로 설정하고, 식 (20)를 이용해서  $\alpha$ ,  $\gamma$ 를 계산하고, 다시  $\alpha$ ,  $\gamma$ 를 전달함수 (19)에 대입하여 출력 편광 TM 상태로 바뀌는지 확인한 것이다. 그림 4(b)는 반대로 TM 입력 편광에 대해서 TE 출력 편광을 나타낸 것이다. 한편 그림 5는 전달함수에 의해서 임의의 입력편광( $\theta_{in} = 18^\circ$ ,  $\phi_{in} = 65^\circ$ ,  $\epsilon = -33^\circ$ )을 임의의 출력편광( $\theta_{out} = 50^\circ$ ,  $\phi_{out} = 280^\circ$ )으로 변환시킨 결과를 나타낸 Poincare 구 좌표계이다.

## V. 편광 조절에 필요한 전압

그림 4, 5에 나타남과 같이 임의의 입력 편광을 원하는 출력 편광으로 바꾸기 위해서는 그림 1(a)의 QWP, HWP, QWP의  $V_{s1}$ ,  $V_{c1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{c2}$ ,  $V_{s3}$ ,  $V_{c3}$ 에 적절한 전압을 인가해야 된다. 각 wave-plate들의 길이  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ 를 각각 1, 2, 1 cm,



(a)



(b)

그림 4. 입출력 편광상태를 나타낸 Poincaré 구 좌표계: (a) TE 입력→TM 출력, (b) TM 입력→TE 출력. H: 수평선형 편광 상태, P: 45° 기울어진 편광상태 L: 왼쪽으로 회전하는 구 편광 상태, R: 오른쪽으로 회전하는 구 편광상태

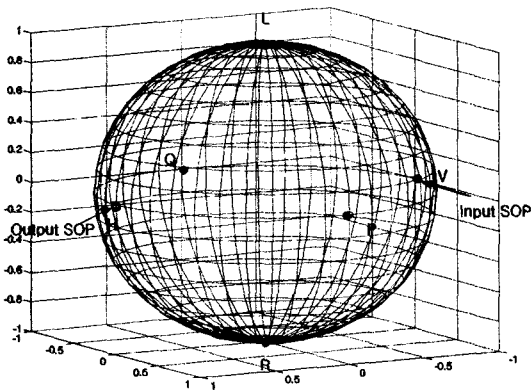


그림 5. 입력편광( $\theta_{in}=18^\circ, \psi_{in}=65^\circ, \epsilon=-33^\circ$ ), 출력편광 ( $\theta_{out}=50^\circ, \psi_{out}=280^\circ$ )을 나타낸 Poincaré 구 좌표계

전극의 폭과 간격을  $W=7 \mu\text{m}$ ,  $G=27 \mu\text{m}$ , 그리고 광파와 전계간의 중복상수를  $\Gamma_y=0.4$ ,  $\Gamma_x=0.4$ 로 설정한 다음, TE→TM, TM→TE, 그리고 임의의 입력 편광( $\theta_{in} = 18^\circ, \psi_{in} = 65^\circ$ )에서 출력 편광( $\theta_{out} = 50^\circ, \psi_{out} = 280^\circ, \epsilon = -33^\circ$ )으로 변화시킬 때 필요한 전압 값들을 계산하여, 그 결과들을 표 1에 요약하였다. 특히 각 wave-plate들에 인가되는 전압들 중에 편광모드

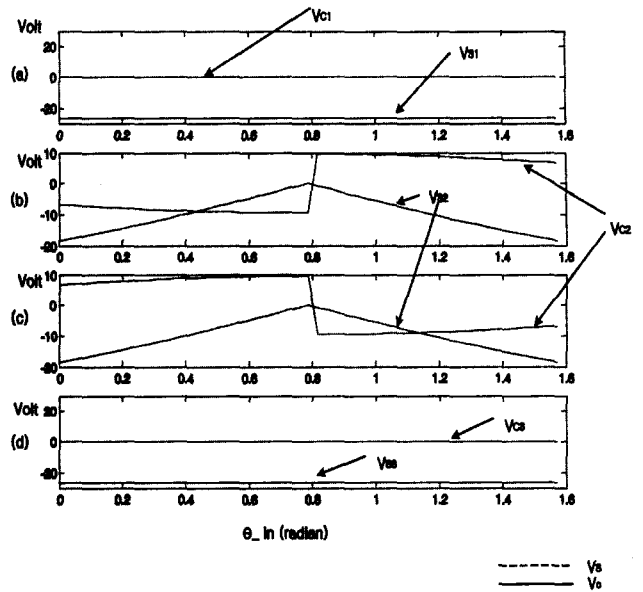


그림 6.  $\phi_{in}=90^\circ$ 로 고정된 TE 편광에서  $\theta_{in} (0 \leq \theta_{in} \leq 90^\circ)$  만큼 틀어진 입력 편광을 TM 출력 편광으로 변화시키는데 편광조절기에 인가되는 전압들의 변화추이.

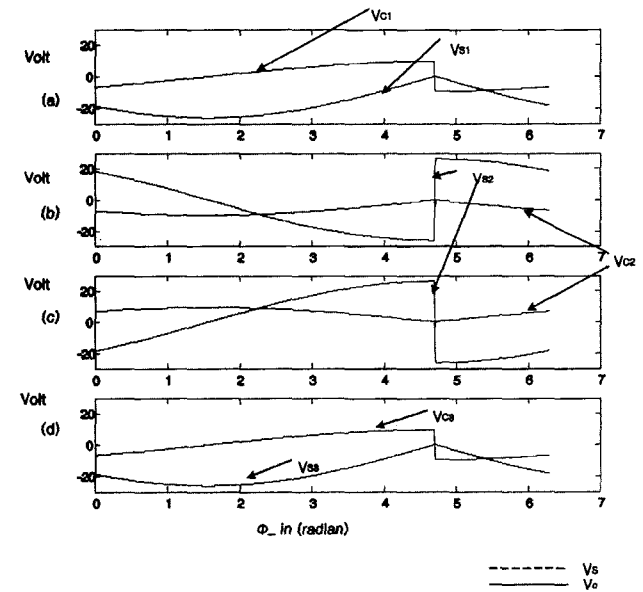


그림 7. 고정된 TE 편광에서  $\phi_{in}(0 \leq \phi_{in} \leq 360^\circ)$ 만큼 틀어진 입력 편광을 TM 출력 편광으로 변화시키는데 편광조절기에 인가되는 전압들의 변화추이.

변환에 필요한 전압,  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ ,  $V_{c3}$ 들은 서로 반대되는 극성으로 전압을 인가해도 원하는 출력 편광 상태를 얻을 수 있었다.

그림 6은  $\phi_{in}=90^\circ$ 로 고정된 TE 편광에서  $\theta_{in} (0 \leq \theta_{in} \leq 90^\circ)$  만큼 틀어진 입력 편광을 TM 출력 편광으로 변화시키는데 QWP, HWP, QWP에 인가되는 전압들의 변화추이를 나타낸 것이다. 한편  $\theta_{in}=45^\circ$ 로 고정된 TE 편광에서  $\phi_{in} (0 \leq \phi_{in} \leq 360^\circ)$ 만큼 틀어진 입력 편광을 TM 출력 편광으로 변화시키

표 1. 다양한 입력 편광들을 원하는 출력 편광 상태로 변환시키는데 필요한 전압

Polarization evolution	Parameter	V <sub>S1</sub>	V <sub>C1</sub>	V <sub>S2</sub>	V <sub>C2</sub>	V <sub>S3</sub>	V <sub>C3</sub>
TE→TM	$\theta_{in}=45^\circ$ $\Psi_{in}=90^\circ$ $\theta_{out}=45^\circ$ $\Psi_{out}=-90^\circ$ $\epsilon = 0^\circ$	-20.99	0	0	-7.63 (or 7.63)	-20.99	0
TM→TE	$\theta_{in}=45^\circ$ $\Psi_{in}=-90^\circ$ $\theta_{out}=45^\circ$ $\Psi_{out}=90^\circ$ $\epsilon = 0^\circ$	-20.99	0	0	-7.63 (or 7.63)	-20.99	0
Random →Random	$\theta_{in}=18^\circ$ $\Psi_{in}=65^\circ$ $\theta_{out}=50^\circ$ $\Psi_{out}=280^\circ$ $\epsilon = -33^\circ$	-19.21	-3.07	-5.34	-7.38	-20.72	1.23

는데 QWP, HWP, QWP에 인가되는 전압들의 변화추이는 그림 7에 나타내었다. 그러나 입력 편광상태는 시간에 따라 무작위하게 변하기 때문에 궤환(feedback) 루프를 통해 전압들을 실시간으로 제어해 주어야만 원하는 출력 편광상태를 유지할 수 있게 된다.

### V. 결 론

z-축 방향으로 진행하는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로와 전기광학효과를 이용하여 집적광학형 편광조절기를 검토하였다. 소자는  $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$  wave-plates들로 구성되었다. Jones matrix에 근거하여 유도된 전달 매트릭스와 Poincare 구 좌표계를 이용하여 소자의 동작원리를 체계적으로 검토하였다. 편광제어에 필요한 전압들을 전산모사 하였으며, 이로부터 본 연구에서 검토된 편광조절기는 임의의 입력 편광 상태에서부터 특정한 출력 편광 상태로 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자(R05-2003-000-10046-0) 사업과 전자부품연구원의 연구비 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, May 2000.  
 [2] L. Moller, "WDM Polarization Controller in PLC Technology," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 13, no.

6, June 2001.  
 [3] R. Noe, *et al*, "Integrated optical LiNbO<sub>3</sub> distributed polarization mode dispersion compensator in 20Gbit/s transmission system," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 8, pp. 652-653, Apr. 1999.  
 [4] Michel Chbat, "Managing polarization mode dispersion," *Photonics Spectra*, pp. 100-104, June 2000.  
 [5] Serge Huard, "Polarization of Light": JOHN WILEY & SONS, 1977.  
 [6] Fred Heismann and R. C. Alfarness, "Wavelength-tunable electrooptic polarization conversion in birefringent waveguides," *IEEE J. Quantum Electron*, vol. QE-24, no. 1, Jan. 1988.  
 [7] Fred Heismann, "Integrated-optic polarization transformer for reset-free endless polarization control," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 25, no. 8, pp. 1898-1906, Aug. 1989.  
 [8] Fred Heismann and M. S. Whalen, "Broadband reset-free automatic polarization controller," *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 4, pp. 377-379, Feb. 1991.  
 [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. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 1, Jan 1992.  
 [10] A. J. P. Van Haasteren, *et al*, "Modeling and characterization of an electrooptic polarization controller on LiNbO<sub>3</sub>," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 1151-1157, Jul 1993.  
 [11] Fred Heismann "Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems," *Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 690-699, Apr 1994.

## A theoretical study on Ti:LiNbO<sub>3</sub> integrated optical polarization mode controllers

Jae-Young Mun and Hong-Sik Jung<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>*E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr*

Han-Young Lee

*Optical Telecommunication Research Center, Korea Electronics Technology Institute  
PyungTaek-Si, KyungGi-Do 451-865, Korea*

(Received October 29, 2003, Revised manuscript February 23, 2004)

We investigated a LiNbO<sub>3</sub> based integrated-optic polarization controller with a Ti-indiffused waveguide along the z-axis utilizing the electro-optic effect. The device consists of a first quarter-wave ( $\lambda/4$ ) phase-shifter followed by a half-wave( $\lambda/2$ ) and a second quarter-wave( $\lambda/4$ ) wave-plate, which is rotated synchronously with the first quarter-wave phase-shifter. We analyzed the operation principles of the device utilizing cascaded transfer matrices based on Jones matrix and Poincare sphere, simulated driving voltages for various input states of polarization (SOP), and theoretically confirmed transformations from any arbitrary input SOP into any general output SOP.

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