

SiO₂의 전기광학 효과를 이용한 고전계 측정

正會員 金 堯 喜* 正會員 李 大 寧**

Measurement of High Electric Field Using Linear Electric-Optic Effect of Crystalline SiO₂

Yo Hee KIM*, Dai Young LEE** *Regular Members*

要 約

본 논문에서는 광파이버 센서로써 고전계(고전압) 측정의 어려움을 해결하기 위하여 지금까지 알려진 다른 전기광학 소자보다 반파장 전압이 매우 높은 SiO₂를 사용하여 고전계를 계측하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. SiO₂를 비롯한 광학소자로 구성된 센서내부, 즉 선광자 및 편광자에서의 광변조식을 Stokes Parameter와 Mueller 행렬로 유도 하였고 이를 복굴절 결정에서의 전기광학 효과를 이론적으로 해석하고 위상지연과 반파장 전압을 계산하였다.

설계 제작한 광전압 센서에, 분압없이 최대전압 20KV까지 공급 했을때의 출력신호를 검출한 결과 오차는 3%미만으로서 매우 우수한 직선성을 얻었다. SiO₂의 온도변화(-20~60℃)에 따른 출력전압 변화를 실험한 결과 최대 7.5%까지 변동율이 발생하였으나 열처리 한후로는 1.0% 이내로 개선된 특성을 보였다.

ABSTRACT

This paper presents a new method to measure high electric field (or high voltage) by using crystalline SiO₂ which has very high half-wave voltage. There are many difficulties in measuring high electric field using other crystals which have generally low half-wave voltage.

By applying Stokes parameter and Mueller matrix, we derive optical modulation equation in the sensor which is composed of a polarizer, a $\lambda/4$ plate, a Pockels material(SiO₂), and an analyzer. We theoretically analyzed electro-optic effect, and calculated the phase retardation and half-wave voltage of the birefringent material.

The designed optical voltage sensor has very excellent linearity up to 20KV without divided voltage. The maximum error was measured within 3%. Before annealing of SiO₂ crystal, the maximum variation of the output voltage is 7.5% with varying temperature from -20℃ to 60℃. But, after annealing of SiO₂ crystal, the output voltage variation is improved within 1% error.

I. 서 론

*韓國電氣研究所

**慶熙大學校 電子工學科

Dept. of Electronics Eng. Kyung Hee University.

論文番號 : 92-15(接受1991. 9. 26)

레이저 광이 계측의 수단으로 이용되는 것은 광이 갖고 있는 간섭성, 지향성등이 우수해서 광섬유와 같

은 도파관을 효율 좋게 전송할 수 있고 용이하게 변조시킬 수 있기 때문이다.^[1,2,3] 전력계통에서 절연매체인 광섬유를 전파하는 빛은 전자기도 방해(EMI) 및 절연(Insulation)이 문제되는 환경에서도 이상적인 계층 방식으로 사용할 수 있다.^[4] 그리고 전력 수요가 증가함에 따라 계통은 대용량화, 고압화 되고 있어 계층 방식을 새로운 방식으로의 대체가 고려되고 있다.^[5,6]

즉 기존의 교류 고전압 계층 방식은 절심의 전자유도 및 콘덴서 분압을 이용하는 것으로 구조가 간단하고 견고성 및 신뢰성이 양호한 편이다. 그러나 최근 계층 전압이 점점 커짐에 따라 기존의 전압 계층 방식인 PT(potential Transformer) 및 PD(Potential Divider)는 절연 문제로 대형화되지 않으면 안 되고 가격과 보수 등의 문제가 뒤따르며 고주파 공진에 의한 측정 정도가 저하될 우려가 있다. 최근 광변조소에서는 구내의 제이 캐탈을 광캐탈로 대체하여 광기술과 통신기술을 융합, 계층뿐만 아니라 감시제어 보호기능을 총체적으로 사용하려는 연구가 진행 중이다.^[7,8] 광학소자를 이용하여 전압을 계층하는 원리로서 Pockels 및 Kerr 효과를 이용할 수 있었지만 여기서 는 효율성이 높은 Pockels 효과, 즉 전계의 1차에 비례하는 전기광학효과(Linear Electro-Optic Effect)를 이용하였다.

Pockels 효과를 나타내는 광학 결정은 LiNbO₃, BGO, BSO, ADP, KDP 등 여러 가지가 고려될 수 있으나 그중 BGO, BSO는 안정된 전압 센서로 적절하다고 주장되어 왔다.^[9,10,11] 그러나 이와 같은 결정들은 반파장 전압(V_π)이 수 KV 정도이고 실제로 사용 가능한 범위는 1000V 미만으로써 저전압 계층에는 양호한 특성을 보이지만 보다 높은 고전압을 직접 측정하기에는 불가능하다. 이를 보완하기 위하여 고압 콘덴서로 분압하여 측정 범위를 넓힐 수 있으나 장치가 커지며 가격이 높아지고 또 전체적으로 측정 오차가 크게 되는 결점이 있다.^[12,13,14] 결정 이외의 광원 및 전송 매체는 레이저 및 광파이버가 개발되면서 He-Ne 레이저 등을 이용하게 되었고 저손실 광파이버를 사용하여 공간 전송 방식에서 탈피하게 되었다. 가스 레이저는 콤팩트한 전자회로와 결합하기 위해서는 크기 문제가 있고 MIR(Multiple Internal Reflection) 등의 기술적인 문제가 있어 안정성을 해치는 요인이 되고 있다.^[15]

그리고 최근에는 특성이 좋은 광 부품 및 주변 기

기들이 개발되면서 더욱 정밀하고 고 신뢰성 있는 시스템을 구성하려는 연구가 활발히 진행 중이다.^[16,17]

본 논문에서는 지금까지 알려진 다른 전기광학소자보다 반파장 전압이 매우 높고, 온도 의존성이 양호한 SiO₂를 센서로 택하고 광원 및 수광소자를 반도체로, 전송 매체로는 다중 모드(Multimode) 광파이버를 사용하여 고전압 계층에 적합한 시스템을 구성하였다. 그리고 선광자 및 편광자에서의 Stokes Parameter와 Mueller 행렬로 광변조식을 유도하였고 복굴절 결정에서의 전기광학 효과를 이론적으로 해석하였다. 센서에 상용주파수 전압을 20KV까지 공급하면서 출력 전압의 직선성을 실험하였고 SiO₂를 열처리하기 전과 후의 온도 변화에 따른 출력 전압 변동율을 실험하였다.

II. 광학소자의 Stokes Parameter와 Mueller 행렬

직교하는 두 성분의 빛은 단진동하므로 빛이 Z 방향으로 진행할 때의 X, Y 방향 진동 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[18]

$$E_x = a_x \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z + \varphi_x) \tag{1}$$

$$E_y = a_y \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z + \varphi_y) \\ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z = \pi \tag{2}$$

(1) (2)식을 다윈 방정식으로 정리하고, $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ 라 하고 분모를 제거한 형태로 다시 쓰면

$$a_x^2 E_x^2 + a_y^2 E_y^2 - 2a_x a_y E_x E_y \cos \delta = a_x'^2 a_y'^2 \sin^2 \delta \tag{3}$$

이 되고 이때의 편광 상태를 θ 만큼 회전시키는 선광자를 통과하면

$$a_x'^2 E_x'^2 + a_y'^2 E_y'^2 - 2a_x' a_y' E_x' E_y' \cos \delta' = a_x''^2 a_y''^2 \sin^2 \delta' \tag{4}$$

와 같이 된다. 이것을 θ 만큼 방위 회전된 좌표계 ξ, η 성분으로 진폭 성분 a_ξ, a_η 및 상대 위상차 δ'' 로 표기하면

$$a_y^2 E_\xi^2 + a_x^2 E_\eta^2 - 2a_x a_y E_\xi E_\eta \cos \delta' = a_\xi^2 a_\eta^2 \sin^2 \delta' \quad (5)$$

가 되고, 이식은 (3)식의 a_x , a_y 및 δ 와 같으므로

$$a_y^2 E_\xi^2 + a_x^2 E_\eta^2 - 2a_x a_y E_\xi E_\eta \cos \delta = a_x^2 a_y^2 \sin^2 \delta \quad (6)$$

으로 표현가능하다. 또한 E_ξ , E_η 와 E_x , E_y 는 좌표회전
으로 다음의 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} E_\xi &= E_x \cos \Theta + E_y \sin \Theta \\ E_\eta &= -E_x \sin \Theta + E_y \cos \Theta \end{aligned} \quad (7)$$

(6)식에 이 관계를 대입하여 E_x , E_y 에 관한 (4)식의
형태로 정리하면 이식과 대응되는 계수와의 사이에
등식이 성립되는데 그 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_y'^2 &= a_x^2 \cos^2 \Theta + a_y^2 \sin^2 \Theta + 2a_x a_y \sin \Theta \cos \Theta \cos \delta \\ a_x'^2 &= a_x^2 \sin^2 \Theta + a_y^2 \cos^2 \Theta - 2a_x a_y \sin \Theta \cos \Theta \cos \delta \\ 2a_x' a_y' \cos \delta' &= 2a_x^2 \sin \Theta \cos \Theta - 2a_y^2 \sin \Theta \cos \Theta \\ &\quad + 2a_x a_y \cos 2\Theta \cos \delta \\ 2a_x' a_y' \sin^2 \delta' &= a_x^2 a_y^2 \sin^2 \delta \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 평광도를 포함하여 광의 편광상태를 잘 표현
할 수 있는 Stokes Parameter와 4×4 행렬로 표시할
수 있는 Mueller 행렬로 표기할 수 있다.

즉 선광자를 통과한 후의 광의 Stokes Parameter는
다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_0' &= a_x'^2 + a_y'^2 = a_x^2 a_y^2 = S_0 \\ S_1' &= a_x'^2 - a_y'^2 = a_x^2 (\cos^2 \Theta - \sin^2 \Theta) + a_y^2 (\sin^2 \Theta \\ &\quad - \cos^2 \Theta) - 4a_x a_y \sin \Theta \cos \Theta \cos \delta \\ &= S_1 \cos 2\Theta - S_2 \sin 2\Theta \\ S_2' &= 2a_x' a_y' \cos \delta' = a_x^2 \sin 2\Theta - a_y^2 \sin 2\Theta - 2a_x a_y \\ &\quad \cos 2\Theta \cos \delta \\ &= S_1 \sin 2\Theta + S_2 \cos 2\Theta \\ S_3' &= 2a_x' a_y' \sin \delta' = 2a_x a_y \sin \delta = S_3 \end{aligned}$$

따라서 선광자의 Mueller 행렬은 다음과 같이 나타
낼 수 있다.

$$T_\Theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\Theta & -\sin 2\Theta & 0 \\ 0 & \sin 2\Theta & \cos 2\Theta & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

편광자를 이용할 때의 Mueller 행렬을 알아보기 위
하여 진동진폭 a_x , a_y 를 이용하여 다시 쓰면

$$\left. \begin{aligned} S_0 &= a_x^2 + a_y^2 \\ S_1 &= a_x^2 - a_y^2 \\ S_2 &= 2a_x a_y \cos \delta \\ S_3 &= 2a_x a_y \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

와 같이 되고 a_x , a_y 를 Stokes Parameter S로서 표현
하면

$$\begin{aligned} a_x^2 &= \frac{1}{2}(S_0 + S_1) \\ a_y^2 &= \frac{1}{2}(S_0 - S_1) \end{aligned}$$

입사광의 x y 성분진폭 a_x , a_y 는 부분편광자를 통과하
여 각각 다음과 같이 변화된다.

$$\begin{aligned} a_x' &= p_1 a_x \\ a_y' &= p_2 a_y \end{aligned}$$

이러한 관계를 이용한 출사광의 Stokes Parameter
는

$$\left. \begin{aligned} S_0' &= a_x'^2 + a_y'^2 = p_1^2 a_x^2 + p_2^2 a_y^2 = \frac{p_1^2}{2}(S_0 + S_1) \\ &\quad + \frac{p_2^2}{2}(S_0 - S_1) \\ S_1' &= a_x'^2 - a_y'^2 = p_1^2 a_x^2 - p_2^2 a_y^2 = \frac{p_1^2}{2}(S_0 + S_1) \\ &\quad - \frac{p_2^2}{2}(S_0 - S_1) \\ S_2' &= 2a_x' a_y' \cos \delta = 2p_1 p_2 a_x a_y \cos \delta = p_1 p_2 S_2 \\ S_3' &= 2a_x' a_y' \sin \delta = 2p_1 p_2 a_x a_y \sin \delta = p_1 p_2 S_3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

가 되고 이것을 행렬로 표시하면 다음 (12)식과 같이
된다.

$$\begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} p_1^2 + p_2^2 & p_1^2 - p_2^2 & 0 & 0 \\ p_1^2 - p_2^2 & p_1^2 + p_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_1p_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_1p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

즉, 입사광과 출사광의 Stokes parameter를 연결하는 행렬로서 주 투과율 p_1 , p_2 의 직선부분편광자 행렬이 구해진다. 완전직선 편광자의 경우, $p_1=1$, $p_2=0$ 가 되어

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

가 된다. 방위각 θ 로 위상 지연(Retardation)이 δ 인 직선 편광자 행렬은

$$R_{\delta, \theta} = T_{\theta} R_{\delta, 0} T_{-\theta}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos\delta)\sin^2 2\theta & 1 - \cos\delta \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin\delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos\delta)\sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos\delta)\cos^2 2\theta & \sin\delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin\delta \sin 2\theta & -\sin\delta \cos 2\theta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (14)$$

이 되고 위상지연 $\delta=90^\circ$ 를 가지는 1/4파장판의 경우의 Stokes Parameter 행렬은 (15)식과 같고 방위각 θ 가 90° 일 경우의 행렬은 (16)식과 같이 된다.

$$R_{90, \theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_{90, 90} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

III. 복굴절 결정에서의 전기광학 효과

일반적으로 결정체는 전장하에서의 빛의 전파에 대해 비등방성이며 빛의 전파방향에 따라 서로 다른 굴절율을 가짐으로 위상지연이 생기게 된다. 이때의 관계를 (17)식으로 표시할 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad (17)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 유전율 텐서이며, 역유전율텐서 η_{ij} 는 (18)식으로 정의 된다.

$$\eta_{ij} = \epsilon_{00} (\epsilon^{-1})_{ij} \quad (18)$$

ϵ^{-1} 은 유전율의 역수이고 ϵ_{00} 는 공기중의 유전율이다.

결정체에서 주축의 굴절율을 n_x, n_y, n_z 라 할때 역유전율 텐서는 (19)식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{n_x^2} \eta_{xx} = \frac{\epsilon_{00}}{\epsilon_{xx}}, \quad 2\eta_{yy} = \frac{\epsilon_{00}}{\epsilon_{yy}}, \quad 2\eta_{zz} = \frac{\epsilon_{00}}{\epsilon_{zz}} \quad (19)$$

전장하여 역유전율 텐서와 전장이 없는 경우의 역유전율 텐서의 차로 정의되는 전기광학계수는 (20)식과 같이 된다.

$$\eta_{ij}(E) - \eta_{ij}(0) \equiv \Delta\eta_{ij} = \Gamma_{ijk} E_k + S_{ijkl} E_k E_l + O(E^3) \quad (20)$$

여기서는 η_{ij} 는 전장 E의 함수이고 Γ_{ijk} 는 1차 전기광학효과에 의한 텐서(포켈 전기광학 계수)이며, S_{ijkl} 은 2차 전기광학효과 계수(또는 Kerr 전기광학계수)이며, 그 이상의 항은 무시할 수 있을 만큼 작다.

만약 매질이 손실이 없고 광학적으로 비회성이면, ϵ_{ij} 와 η_{ij} 는 대칭텐서이고, Γ_{ijk} 는 1차와 2차지수의 계수가 같은 대칭성이고 S_{ijkl} 은 1차와 2차지수, 3차와 4차 지수의 계수가 같은 대칭성을 가진다. 따라서 축약하여 표시할 수 있는데 선형 전기광학계수는 r_k ($i=1, 2, \dots, 6, k=1, 2, 3$)로, 2차 전기광학계수는 S_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, 6$)로 표시할 수 있다.

비등방성 매질에서의 빛의 전파는 전파방향과 편광상태에 따라 굴절율과 위상속도로 나타난다. 위의 방향으로 전파되는 굴절율 $\vec{k} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ 는 굴절율을 타원체로 부터 구할 수 있다. 전장이 가해지지 않

있을때의 굴절을 타원체는 다음 (21)식과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (21)$$

식(21)에서 3개의 굴절률중에서 3개가 모두 같으면 등방성 결정(Cubic, $n_x=n_y=n_z$), 모두 다르면 쌍축결정(biaxial, $n_x \neq n_y \neq n_z$)이 되고 그중 2개가 같으면 단축결정(uniaxial, $n_x=n_y \neq n_z$)라 하며 (22)식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (22)$$

결정이 전계나 자계의 세기에 따라 편광상태의 변조로 굴절률타원체의 변형이 생긴다. 전장에서 굴절률 타원체는

$$\eta_{ii}(E)x_i x_i = 1 \quad (23)$$

또는

$$(\eta_{ii}(0) + \Delta\eta_{ii})x_i x_i = 1 \quad (24)$$

와 같이 되며 (25)식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & x^2 \left(\frac{1}{n_x^2} + \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) + y^2 \left(\frac{1}{n_y^2} + \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) + z^2 \left(\frac{1}{n_z^2} + \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) \\ & + 2yz \left(+\Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) + 2xz \left(+\Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) \\ & + 2xy \left(\Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \right) = 1 \end{aligned} \quad (25)$$

만약 2차 광학계수가 무시할 수 있을 만큼 작다면 다음 (26)식 처럼 선형계수성분만 남는다.

$$\Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i = \sum_{k=1}^3 r_{ik} E_k \quad (26)$$

여기서 주축 x,y,z는 k=1,2,3에 각각 대응 된다. (26)식을 행렬형태로 표현하면 (27)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_1 \\ \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_3 \\ \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_4 \\ \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_5 \\ \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기서 선형전기광학계수 r_{ik} 로 구성된 6×3 행렬을 전기광학텐서 (Electrooptic Tensor)라 부른다. 본 논문에서 전기광학 소자로 고려중인 단축결정의 수정(Quartz)의 전기광학텐서는 (28)식과 같은 구조를 가지고 있다.

$$r_{ik} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

(28)식을 (27)식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & (E_x r_{11} + \frac{1}{n_o^2})x^2 + (-E_x r_{11} + \frac{1}{n_o^2})y^2 + (\frac{1}{n_e^2})z^2 \\ & + 2E_x r_{11} yz - 2E_y r_{11} xz - 2E_y r_{11} xy = 1 \end{aligned} \quad (29)$$

와 같이 된다. 즉, 수정은 단축결정이므로 $n_x=n_y=n_o$, $n_z=n_e$ 가 된다. 결정에 광의 전파는 Z방향으로, 전계인가는 Y방향으로 했을때 $E_y=E_z=0$ 가 되며 XY면에서 굴절을 변화가 나타나므로 (29)식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + E_x r_{11} \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - E_x r_{11} \right) y^2 + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (30)$$

즉, (30)식은 전압이 인가되었을 때의 굴절률 타원체의 방정식으로 $E_x r_{11} \ll n_o^2$ 로 가정하고 $dn = -(n^3/2)d(n^2)$ 이므로 변화된 주축의 굴절률은 다음 근사식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} n_x & \approx n_o - \frac{n_o^3}{2} r_{11} E_x \\ n_y & \approx n_o + \frac{n_o^3}{2} r_{11} E_x \\ n_z & \approx n_e \end{aligned} \quad (31)$$

결정내를 진행하는 광의 X와 Y성분은 서로다른 굴절율을 n_x, n_y 로 표현된다. 그리고 굴절율차 n_y-n_x 로서 복굴절이 정의되고, X와 Y 성분의 광은 위상속도 (Phase Velocity)가 다르고 이때의 위상지연을 Γ 라 나타내며 (32)식와 같다.

$$\Gamma = \frac{W}{C}(n_y-n_x) l$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} E_x l \quad (32)$$

여기서 l 은 빛이 지나가는 결정의 길이이다. (32)식에서 위상지연 Γ 가 π 일때의 전압을 반파장 전압이라 부르고 다음 (33)식으로 구할 수 있다. 광의 파장 $\lambda=870\text{nm}$ 이고 광로장 l 과 전계가 가해지는 X 방향의 길이(d)가 같을 경우의 반파장전압 v_{π} 는 약 518KV 정도가 된다.

$$v_{\pi} = \frac{\lambda d}{2n_o^3 r_{11} l} \quad (33)$$

만약 광의 입사방향을 Y 방향으로 했을 경우의 위상지연 Γ 는

$$\Gamma = \frac{W}{C}(n_z-n_x) l$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} (n_e-n_o) l + \frac{\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} E_x l \quad (34)$$

이 되어 반파장전압은 커지나 첫번째 항만큼 자연복굴절이 생겨 사용하기가 매우 어려운 문제가 있다.

따라서 광의 전파방향을 Z축으로 하여 자연복굴절의 영향을 받지 않게 사용하였다.

IV. SiO₂ 결정을 이용한 광전압 센서

전기광학효과는 거의 모든 결정에서 나타나지만 포켈스 효과는 그중 소수의 결정에서 나타나고, 또 이러한 결정가운데에서 광전압센서로 이용하려면 몇 가지 파라메타가 고려되어야 한다.

앞에서 설명된 것과 같이 고유복굴절(Natural Birefringence)이 없어야 하고 초전성 역시 없는 것이 좋은 특성을 갖게 된다. 또, 선광성이나 전기광학계수의 온도 의존성이 작을 수록 좋은 광전압 센서라 할 수 있을 것이다. 이러한 여러조건을 대체로 결정을 광전압센서로 선정하여 실험하였다.

SiO₂ 결정은 표 1과 같은 특성을 가지고 있다.

전체적인 광전압 센서부의 구성은 4개의 광학 소자로 이루어 지는데 그 원리 및 방법은 그림 1과 같다.

각각 광학소자의 기능을 검토해 보면, 먼저 광원에서 나온 자연광이 광파이버(코어/클래딩 : 100/140 μm)를 통해 렌즈를 거쳐 편광자에 입사되면 이 빛은 편광자의 방향으로 선형편광되고, 이것은 1/4 파장판을 통과하면 원편광 상태가 된다. 원편광된 빛은 포켈소자인 SiO₂ 결정을 지나면서 전계의 크기만큼 위상지연을 일으켜 타원편광상태가 되고, 이때 생긴 위상지연 δ 값을 측정하기 위하여 편광자와 90° 방향을 가지는 검광자를 통해 진폭변조된 신호를 검출한다.

표 1. SiO₂ 결정의 전기광학적 특성
Table 1. Electro-Optic Properties of SiO₂ Crystal

점 군	Matrix	Pockels [10 ⁻¹² m/V]	굴절율(파장) λ : [nm]	비유전율	온도 의존성 $\left \frac{1}{v} \frac{dV}{dT} \right $	비 고
32	r_{11} 0 0	$r_{11}=0.23$ $r_{41}=0.10$	$n_o=1.5442$	$\epsilon_{11}=4.43$ $\epsilon_{33}=4.63$	2.2×10^{-4} ($\lambda=0.633$)	상유전체 선광성있음 초전성없음
	$-r_{11}$ 0 0		$n_e=1.5533$			
	0 0 0		($\lambda=589.3$)			
	r_{41} 0 0		$n_o=1.5427$			
	0 $-r_{41}$ 0		$n_e=1.5517$			
	0 $-r_{11}$ 0		($\lambda=632.8$)			

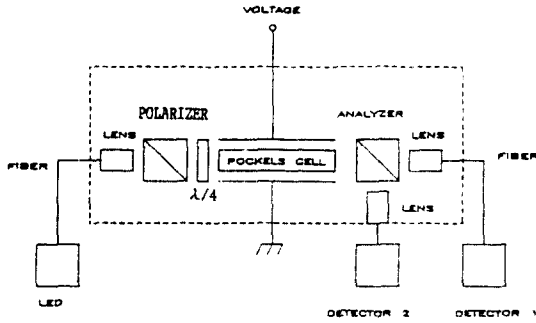


그림 1. 전체 시스템 구성도.
Fig. 1. Structure of Integrated System.

신호처리부는 그림 2와 같이 LED (NEC OD-8358)에서 발생한 광 캐리어는 센서에서 AC와 함께 변조되고 검광자를 통한 빛의 강도 변화를 포토 다이오드 (OD-8454)를 통해 전기신호로 검출하게 된다. 정밀도와 신뢰성을 높이기 위해 2중으로 구성하였고 AC와 DC를 분리하여 AC신호를 더하고 나누기를 행함으로써 광강도의 교류성분을 검출할 수 있다. 이러한 일련의 동작상태를 수식으로 알아 볼 수 있다. 우선 4개의 Stokes Parameter로 형성된 벡터를 $[As]$ 로 표시하고 (35)식으로 나타낸다.

$$[As] = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^2 + a_2^2 \\ a_1^2 - a_2^2 \\ 2a_1 a_2 \cos \delta \\ 2a_1 a_2 \sin \delta \end{bmatrix} \quad (35)$$

마지막 소자인 검광자를 통해 나오는 출사광의 벡터

$[Ao]$ 는 다음과 같이 된다.

$$[Ao] = P_{90} \cdot T\delta \cdot R_{90,90} \cdot P_0 [Ai] \quad (36)$$

여기서 $[Ai]$ 는 입력자연광으로 행렬의 형태는 (37)식과 같다.

$$[Ai] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

(36)식을 앞에서 설명된 Mueller 행렬을 이용하여 다시쓰면 (38)식과 같이 된다.

$$[Ao] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

검광자 SiO₂ λ/4파장판 검광자

(38)식을 정리하면 출력광 $[Ao]$ 는

$$[Ao] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -\cos \delta \\ -1 & +\cos \delta \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

가 된다.

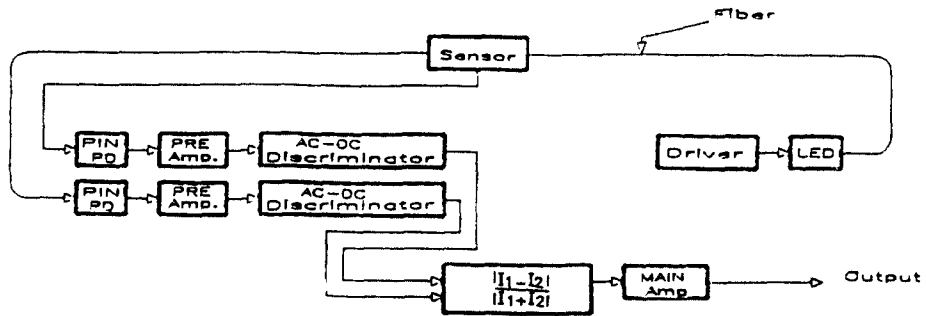


그림 2. 신호처리부 분리다이아그램
Fig. 2. Block Diagram of Signal Processing Part.

(39)식에서 광의 강도는 S₀이므로 출력광의 강도 I는

$$I = \frac{1}{4}(1 - \cos \delta) \quad (40)$$

가 되고, 위식을 최대 광강도 비율로 나타내면 다음 (41)식과 같이 된다.

$$I / I_m = \frac{1}{2}(1 - \cos \delta) \quad (41)$$

여기서 I_m은 출력광강도의 최대값으로 1/2이 된다. (41)식이 광전압 센서 시스템의 특성식이 되고, 이때의 위상지연 δ는 (40)식에서의 Γ와 같은 값으로 전계에 대한 특성식은 (42)식과 같이 된다.

$$I / I_m = \frac{1}{2}(1 - \cos(\frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} E_x l)) \quad (42)$$

지금까지 계산된 여러 수식을 이용하여 SiO₂ 결정에서 입사광의 방향과 전계인가 방향에 따른 위상지연과 반파장 전압을 계산하여 보면 표 2와 같다.

인가된 전압이 반파장전압을 초과하면 위상지연 Γ의 값은 다시 작아져 측정이 불가능해지므로 고전압

(전계) 측정에서는 반파장 전압이 큰 결정센서를 사용하여야 한다. 다른 광전압 결정 센서의 반파장전압이 10KV 정도(LiNbO₃ : 7.8KV, BGO : 6.3KV, BSO : 6.8KV, ADP : 10.5KV, KDP : 9KV, GaAs : 8.8KV, ZnSe : 3.8KV)인 것에 비하면 SiO₂ 결정의 반파장 전압은 대단히 큰것으로 고전압 측정에 적합하다.

V. 실험결과 및 고찰

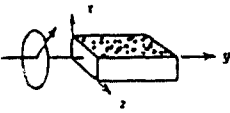
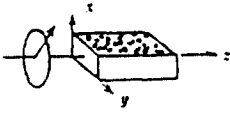
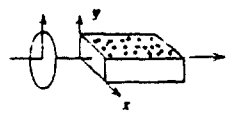
그림 3은 SiO₂를 이용한 실규모의 크기의 광전압센서의 도면이다. 구형전극으로 간격을 임의로 조정할 수 있게 하였다.

Pockels Cell에 광을 입사하면서 중형으로 교류 60Hz 표준 전압을 가하면 변조된 광의 교류성분이 출력으로 얻을 수 있다. 표준전압을 1000V~20000V 까지 변화시켜 공급하면서 출력신호를 전압계로 측정할 것을 그림 4에 표시하였다.

(a)는 Pockels 센서 중앙에서 한쪽의 간격 2.0Cm 일때의 특성이며 직선 회귀 계산식으로 구해보면 기울기는 0.086이고 오차는 3%미만이였다.

(b), (c), (d) 각각의 기울기는 0.071, 0.032, 0.026으로써 오차는 모두 2%~3% 미만으로써 직선성이

표 2. SiO₂의 위상지연과 반파장 전압
Table 1. Phase Retardation and Half-Wave Voltage of SiO₂

입사광, 전계인가방향	위 상 지 연	반 파 장 전 압
	$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o n_e) l$ $+ \frac{\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} \cdot \frac{l}{d} V$	$\lambda : 630\text{nm}$ $V_{\pi} = \frac{\lambda}{n_o r_{11}} \cdot \frac{d}{l}$ <p>[750kV]</p>
	$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{11} \cdot \frac{d}{l} V$	$\lambda : 630\text{nm}$ $V_{\pi} = 2n_o^3 r_{11} \cdot \frac{d}{l}$ <p>[375KV]</p>
		$\lambda : 870\text{nm}$ $V_{\pi} = [518KV]$

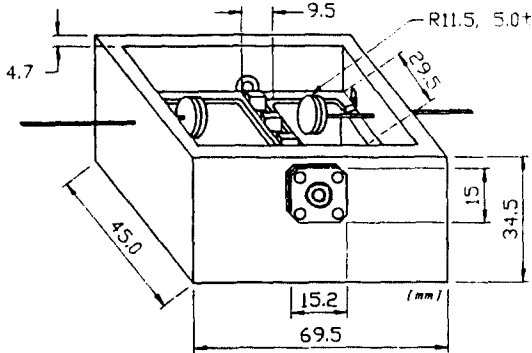


그림 3. 광전압 센서의 개발 모형
Fig. 3. Development Model of Optical Voltage Sensor

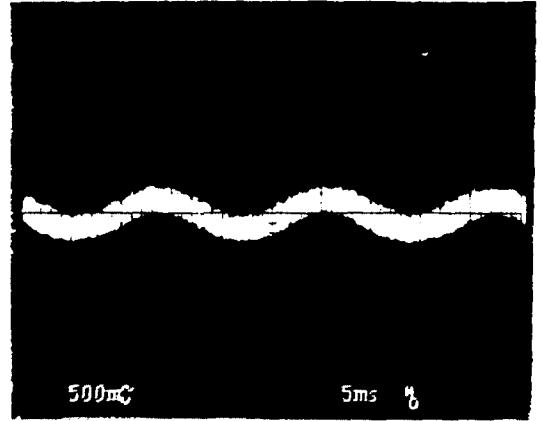


그림 5. 광전압센서의 출력파형
Fig. 5. Output Waveform of Optical Voltage Sensor

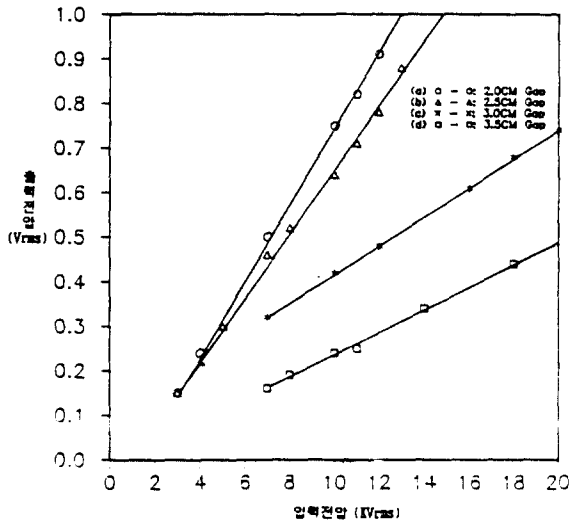


그림 4. 입출력 특성 그래프
Fig. 4. Input-Output Characteristics

매우 우수한 편이다. 그림 5는 입력 신호 (Gap간격 3.5cm 600Hz, 10000V)에 대한 광전압센서의 출력파형을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 아날로그 입력 신호의 재현성이 우수함을 확인할 수 있다.

SiO₂ 전압센서의 온도특성을 알아보기 위해서 -20℃~60℃까지 항온조의 온도를 자동조절하고 항온조 내부에 광전압 센서를 넣고 외부에서 광신호를 인가하고 센서를 통한 광신호를 다시 광파이버로 외부의 수광부에 입력하여 결과를 관측하였다. 표준전압을 1000V에 놓고 상온(20℃)을 기준으로 10℃상승/하강시 출력전압의 변화율을 측정할 결과 최대 7.

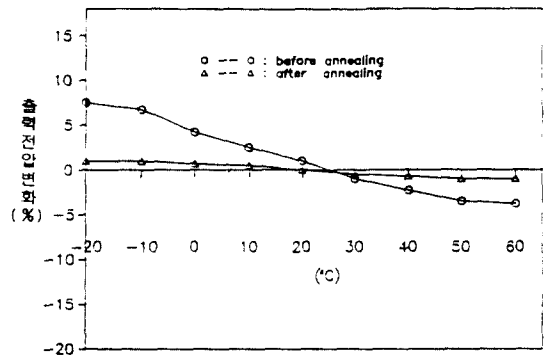


그림 6. 온도변화에 대한 SiO₂의 감도
Fig. 6. Sensitivity of SiO₂ Sensor.

5%(-20℃)로 내었다.

변화율이 크므로 이를 줄이기 위하여 SiO₂를 특수 열처리 하였다. SiO₂의 녹는점(Melting Point) 가까운 1000℃에서까지 21시간 동안간헐 서서히 온도를 상승시킨후 20시간 휴지한 다음 500℃까지는 0.3℃/min으로 하강시키고 다시 500℃~0℃까지는 1℃/min으로 하강후의 출력전압 변동율을 시험한 결과 최대 1%내외로 양호한 특성을 얻었다. 그림 6은 SiO₂의 열처리 전후의 출력전압 변동율을 보인 것이다.

VI. 결 론

지금까지 논문에는 전기광학결정을 이용하여 광파이버 전압 센서를 구성하는데 있어서 결정의 반파장 전압 및 절연 확보성등으로 측정범위가 1000V 정도로 한정되어 있었다. 반파장전압이 대단히 높고 비유전율이 작은 SiO₂를 사용할 경우의 전기광학효과 즉 반파장전압, 위상지연, 광강도 변조식을 이론적으로 유도하였다.

새로운 광학부품과 독특한 신호처리 기술로 고전압계측에 적합한 광전압 측정 시스템을 설계제작하였고 센서에 상용주파 전압을 20KV까지 공급했을때의 출력신호를 검출한 결과 오차는 3% 미만으로써 매우 우수한 직선성을 얻었다. 20KV 정도의 고전계(고전압)를 계측하는데에는 SiO₂가 최적으로 생각되며 앞으로 보다 높은 전압에 대한 계측방법과 보다 오차를 줄이기 위한 연구가 뒤따라야겠다. 그러나 대부분 우리나라의 고압 배전전압이 20KV이고 전력계통에서 광파이버 전압계측의 장점이 많기 때문에 크게 활용되리라 기대한다.

참 고 문 헌

1. A.J.Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and Current on Power System," Opt. Laser Tech., p.273-283, 1977.
2. T.G.Giallorenzi, J.A.Bucaro, A.Dandrige, et al., "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE J.Quantum Electronics, Vol. QE-18, No.4, p. 623-665, 1982.
3. T.G.Giallorenzi, "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE Trans. on Microwave Tech., Vol. MTT-30, No.4, p.472, April 1982.
4. Rutgers. W.R, H.J.M.Julshof, I.J.Laurensse & A.H.van der Wey 1987 Optical sensors for the measurement of electric current and voltage-Kema Scientific & Technical Reports 5 (110 : 281-292. ISSN0167-8590 : ISBN 90-353-0058-0).
5. R.E.Hebner, et al., "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels," Proc. IEEE, Vol.65, No.11, p.1524-1548, 1977.
6. M.Kanoi, et al., "Optical Votage and Current Measuring System for Electric Power Systems," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol PWRD-1 no.1, 1986.
7. D.C.Ericson, "The use of fiber optics for communications, measurement and control with high voltage substations," IEEE. PAS, PAS-99, No.3.
8. T.Takagi, et al., "Development and Intrastation Optical-Fiber Data Transmission System for Electric Opwer Systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No.1, Jan. /Feb.1980.
9. T.Sugiyama, et al, "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic-Field Sensor," IEEE Trans. On Opwer Delivery, PWRD-2, No.1.
10. K.Shibata, "A Fiber Optic Electric Field Sensor Using the Electro-Optic Effect of Bi₄Ge₃O₁₂," Proceedings, First International Conference on Optical Fiber Sensors, London. 164-168, 1983.
11. G.W.Day, P.Hale, M.Deeter, T.Milner, D. Conrad, and S.Etzel, "Limits to the Precision of Electro-Optic and Magento-Optic and Magneto-Optic Sensors," Natl.Bur.Stand. (U.S.) Tech. Note 1307 1987 : Electric Opwer Research Institute EL5431, Vol.1, 1987.
12. K.Kyuma, et al., "Fiberoptic Current and Voltage Sensors Using a BiGeO Single Crystal," I Lightwave Tech., Vol.LT-1, No.1, p. 93, 1983.
- 13 T.Mitski, et al., "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magneticfield Sensors," IEEE SM442-8, 1986.
14. Toshiniko Yoshino "Optical Fiber Sensors for Electric Industry," SPIE Vol.798 Fiber Optic Sensors II 1987, 259.
15. K.Lee, G.Day, "Effect of Multiple Internal Reflections on the Stabillty of Electrooptic and Magentooptic Sensors," Appl. Opt.27, 4609-1611 1988.
16. K.Lee, "New Comoensation Method for Bulk

Optical Sensors With Multiple Birefringences,"
Appl. Opt 29 2001-2011 1989.

- 17. 이대영, 김요희 "EOM-BSO 소자를 이용한 광전압센서에 관한 연구," 전자공학회 논문지 제27권 11호, 90-27-16, 1990.
- 18. 石黒浩三 外, 結晶光學, 鬱北 出版株式會社,

1987. 5.

- 19. Dennis H.Goldstein, "Infrared Material Property Measurements With Polarimetry and Spectropolarimetry," SPIE, Proceedings Volume 1307, p.448-462 1990.



金堯喜(Yo Hee KIM) 정회원
1944년10월 2 일생
1981년 : 연세대학교 산업대학원석사학위 취득.
1964년~1981년 : 한전계통운용부, 전자계산소, 기술연구원 근무(실장대리).
1981년~현재 : 한국전기연구소 계

통연구실장, 전력통신연구실장, 전력전자 연구부장(책임연구원).

- 주관심분야는 전력전자및 광 응용센서 등임.

李大寧(Dai Young LEE) 正會員
1940年 3月18日生
1968年 9月~1970年 3月 : 캘리포니아州立大學院 (工學碩士)
1976年 9月~1979年 9月 : 延世大學校大學院電子工學科(工學博士)

1971年 9月 : 慶熙大學校 工科學 電子工學科 助教授
1977年 3月 : 慶熙大學校 工科學 電子工學科 副教授
1982年 3月~現在 : 慶熙大學校 工科學 電子工學科 教授
1990年 3月~現在 : 慶熙大學校 產業情報大學院 院長