

전기장에 의한 Bi₁₂GeO₂₀ 단결정의 굴절률 표시타원체의 변형

Variation of the Representation Ellipsoid for Refractive Index of Bi₁₂GeO₂₀ Single Crystal by an Electric Field

이수대^{1,a}, 이찬구¹

(Su-Dae Lee^{1,a} and Chan-Ku Lee¹)

Abstract

We derived a formula which can calculate the space distribution of refractive index variation by an applied electric field about Bi₁₂GeO₂₀ single crystal. Stereographic projection maps of refractive index variation by an applied electric field were made out using numerical value to be calculated by this formula. By the calculated results, since an electric field had applied to $[\bar{1}11]$ direction and $[1\bar{1}1]$ direction of Bi₁₂GeO₂₀ crystal, positive variation of the refractive index of $[\bar{1}11]$ direction and $[1\bar{1}1]$ direction was the largest. The incremented refractive index per unit electric field was $+3.2410 \times 10^{11} \text{ V}^{-1}$ for the wavelength of 6328 Å. Since an electric field had applied to $[111]$ direction and $[\bar{1}\bar{1}1]$ direction, negative variation of the refractive index of $[111]$ direction and $[\bar{1}\bar{1}1]$ direction was the largest. The decremented refractive index per unit electric field was $-3.2410 \times 10^{11} \text{ V}^{-1}$ for the wavelength of 6328 Å.

Key Words : Bi₁₂GeO₂₀ single crystal, Refractive index, Electro-optic effect

1. 서 론

Bi₁₂GeO₂₀ 단결정은 1966년 A. A. Ballman[1]에 의하여 Czochralski법으로 성장된 이후, 광학적 양질의 단결정을 얻기 위한 많은 연구자들[2,3]의 연구 결과에 힘입어 광 편향기, 광 변조기, 광굴절률 효과를 이용한 홀로그래프 기억 소자 등, 광-전기 소자의 응용에 이용되고 있다[4-6].

S. C. Abrahams 등[7]의 결정구조 연구에 의하여 밝혀진 바에 의하면, Bi₁₂GeO₂₀ 단결정은

$[111]$ 방향으로 압축하면 압전효과가 나타난다. 특히 이들의 보고에 의하면, 공간군이 I23인 체심 입방구조 속에서 Ge 원자는 사면체 구조로 되어 있고, Bi 원자는 7개의 O 원자로 둘러싸여 있는데, 그 중에서 5개의 O 원자는 불완전한 팔면체를 이루고 있으며, 나머지 2개의 O 원자는 Bi³⁺의 6S² 궤도에 존재하는 불활성 전자쌍과 정전기적으로 결합하고 있으므로 Bi 원자와 O 원자까지의 거리는 각각 3.082 Å과 3.170 Å이라고 하였다. 따라서 Bi 원자는 비등방적인 열진동을 한다. 이러한 구조적 특징 때문에 Bi₁₂GeO₂₀ 단결정의 $[111]$ 방향으로 압전효과가 나타난다. 특히 압전효과를 가지는 물질은 전기광학효과가 현저하게 크게 나타나며, 그 방향도 압전성이 나타나는 방향과 매우 밀접한 관계를 가진다. 따라서 이러한 특성 때문에 Bi₁₂GeO₂₀ 단결정은 전기광학효과를 이용한 응용성

1. 경남대학교 응용수리학부
(마산시 월영동 449)

a. Corresponding Author : leesudae@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2004. 10. 1
1차 심사 : 2004. 12. 3
심사완료 : 2004. 12. 13

이 높은 물질이다[8].

특히 전기광학효과를 이용하는데 기초자료가 되는 Bi₁₂GeO₂₀ 단결정의 전기광학상수는 몇몇의 연구자들[4,9]에 의하여 측정되었다. D. G. Papazoglou 등[4]이 측정한 방법은 편광자와 검광자 사이에 시료를 놓고 전압을 가하면서 통과한 광의 밝기 변화로부터 전기광학상수를 측정하였으나, 이수대 등[9]은 Mach-zehnder 간섭계를 이용하여 시료를 통과하는 광과 참조광을 간섭시킨 간섭무늬의 변화로부터 전기광학상수를 측정하였다. 이 두 연구자들의 결과를 비교하면 매우 잘 일치하였다.

본 연구에서는 이수대 등[9]이 측정한 굴절률, 1차 전기광학상수 및 2차 전기광학상수를 이용하여, 전기장에 의한 Bi₁₂GeO₂₀ 단결정의 굴절률 표시타원체의 변형을 계산하는 방법을 제시하고, 수치계산을 하였다. 여기서 전기장에 의한 물질의 길이 변화와 같은 결보기 물리량에 의존하는 광행로길이 보다는 물질 고유의 값인 굴절률 변화로 나타내는 것이 더 변용의 폭이 넓은 장점 때문에 굴절률 표시타원체를 계산하였다. Bi₁₂GeO₂₀ 단결정의 점군이 23이므로 전기장을 가하지 않았을 경우, 굴절률 표시타원체의 모양은 구형이다. 그러나 여기에 전기장을 가하면 굴절률 표시타원체의 모양이 변한다. 따라서 본 연구에서는 전기장에 의하여 굴절률 표시타원체의 모양이 가장 많이 변하는 전기장의 방향을 찾아서, 그 방향으로 전기장을 가한 결과 생기는 굴절률 표시타원체의 변화량을 입체투영법으로 결정의 a-b 평면에 그려, 전기-광학 소자 설계에 이용하도록 하였다.

2. 계산을 위한 이론

Bi₁₂GeO₂₀ 단결정에 전기장을 가하면서 광을 통과시키면 통과하는 광의 굴절률이 변한다. 굴절률의 변화를 유발하는 원인은 전기장에 의한 전기분극의 변화와 역압전효과에 의한 내부 변형의 결과로 생긴 광탄성효과에 의한 분극의 변화이다. 단결정에 가해지는 전기장의 세기에 따른 분극상수의 변화를 전기장의 2차 항까지만 고려하여 식을 만들면 다음과 같다.

$$B_{ij} - B_{ij}^0 = \sum_k R_{ijk} E_k + \sum_k \sum_l K_{ijkl} E_k E_l \quad (1)$$

식 (1)에서 R_{ijk}는 변형력이 가해지지 않은 상태에

서 측정된 1차 전기광학상수(Pockels의 선형광학상수)이고, K_{ijkl}은 2차 전기광학상수(Kerr의 이차광학상수)이다. 전기장의 1차에 비례하는 Pockels 효과는 변형이 없도록 한 상태에서 측정된 순수한 1차 전기광학효과와 역압전효과에 의한 내부 변형의 결과로 생기는 광탄성효과의 합이다. 그리고 전기장의 2차 항에 관련된 Kerr효과는 변형이 없도록 한 상태에서 측정된 순수한 전기장에 의한 2차 전기광학효과와 전왜효과에 의한 변형의 결과로 생기는 광탄성효과의 합이다.

특히 전기장이 결정에 가해졌을 때의 분극상수 B_{ij}와 전기장이 결정에 가해지지 않은 매질내의 분극상수 B_{ij}⁰와의 차는 다음과 같이 굴절률과 관계 있다.

$$B_{ij} - B_{ij}^0 = \left(\frac{1}{n_{ij}}\right)^2 - \left(\frac{1}{n_{ij}^0}\right)^2 \approx -\frac{2\Delta n_{ij}}{(n_{ij}^0)^3} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 굴절률의 변화 Δn_{ij}에 대하여 정리하면

$$\Delta n_{ij} \approx -\frac{1}{2} (n_{ij}^0)^3 \left(\sum_k R_{ijk} E_k + \sum_k \sum_l K_{ijkl} E_k E_l \right) \quad (3)$$

이 된다.

만약 시료에 임의의 방향으로 전기장을 가하는 식을 만들기 위하여 식 (3)을 좌표변환하면 다음과 같다.

$$\Delta n'_{ij} \approx -\frac{1}{2} (n_{ij}^0)^3 \left(\sum_k R'_{ijk} E'_k + \sum_k \sum_l K'_{ijkl} E'_k E'_l \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 Δn'_{ij}는 변환된 좌표계에서 전기장에 의한 굴절률의 변화량이고, n'_{ij}⁰는 변환된 좌표계에서 굴절률의 값이며, R'_{ijk}와 K'_{ijkl}는 각각 변환된 좌표계에서 1차 전기광학상수와 2차 전기광학상수이다. 그리고 E'_k는 변환된 좌표계에서 시료에 가하는 전기장의 세기이다. 시료에 가하는 전기장의 방향은 변환된 좌표계에서 나타내어야 되는 양이므로 그대로 두고 나머지 상수들은 변환되지 않은 좌표계, 즉 결정축계에 관련된 좌표계에서의 양과 관련시키면 다음과 같다.

$$n_{ij}^{\circ} = \sum_k \sum_l \sum_m a_{ik} a_{jl} n_{kl}^{\circ} \quad (5)$$

$$R_{ijk}^{\circ} = \sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} R_{lmn} \quad (6)$$

$$K_{ijkl}^{\circ} = \sum_m \sum_n \sum_o \sum_p a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} K_{mnop} \quad (7)$$

식 (5), (6), (7)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta n_{ij} &\simeq -\frac{1}{2} \left(\sum_k \sum_l \sum_m a_{ik} a_{jl} n_{kl}^{\circ} \right)^3 \\ &\times \left\{ \sum_k \left(\sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} R_{lmn} \right) E_k \right. \\ &\left. + \sum_k \sum_l \left(\sum_m \sum_n \sum_o \sum_p a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} K_{mnop} \right) E_k E_l \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

식 (8)이 의미하는 것은 변환된 좌표계에서 임의의 방향으로 가하는 전기장의 세기와 변환되지 않은 좌표계(결정계의 축과 일치)에서 이미 측정되어 있는 굴절률, 1차 전기광학상수, 그리고 2차 전기광학상수를 대입하면 변환된 좌표계에서 굴절률의 변화 Δn_{ij} 을 구하는 식이다. 따라서 변환된 좌표계에서 굴절률의 변화량을 계산할 필요가 있을 경우에는 식 (8)을 사용하면 되나 일반적으로 우리가 필요로 하는 결과는 결정축과 일치하는 변환되지 않은 좌표계에서 굴절률의 변화량이다. 그러므로 Δn_{ij} 를 역변환시켜 Δn_{ij}° 를 구하여야 한다. 따라서 식 (8)을 역변환시키면

$$\begin{aligned} \Delta n_{qr} &\simeq -\frac{1}{2} \sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} \left[\left(\sum_k \sum_l \sum_m a_{ik} a_{jl} n_{kl}^{\circ} \right)^3 \right. \\ &\times \left\{ \sum_k \left(\sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} R_{lmn} \right) E_k \right. \\ &\left. + \sum_k \sum_l \left(\sum_m \sum_n \sum_o \sum_p a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} K_{mnop} \right) E_k E_l \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

이 되어, 변환된 좌표계에서 전기장을 가하고 변환되지 않은 좌표계에서 굴절률의 변화량에 대한 행렬요소 Δn_{qr} 를 구하는 식을 얻는다. 변환되지 않은 좌표계에서 광이 통과하는 방향을 나타내는 방향여현 벡터 $\hat{1}(l_1, l_2, l_3)$ 방향의 굴절률 변화량 $\Delta n(\hat{1}, E_i^{\circ})$ 은

$$\Delta n(\hat{1}, E_i^{\circ}) = \sum_q \sum_r \Delta n_{qr} l_q l_r \quad (10)$$

이 된다. 따라서 식 (9)를 식 (10)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta n(\hat{1}, E_i^{\circ}) &\simeq -\frac{1}{2} \sum_q \sum_r \left[\sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} \right. \\ &\left[\left(\sum_k \sum_l \sum_m a_{ik} a_{jl} n_{kl}^{\circ} \right)^3 \times \left\{ \sum_k \left(\sum_l \sum_m \sum_n a_{il} a_{jm} a_{kn} R_{lmn} \right) E_k \right. \right. \\ &\left. \left. + \sum_k \sum_l \left(\sum_m \sum_n \sum_o \sum_p a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} K_{mnop} \right) E_k E_l \right\} \right] l_q l_r \quad (11) \end{aligned}$$

이 된다. 식 (11)은 전기장 E_i° 를 변환된 좌표계에 서 가하고 광을 변환되지 않은 좌표계의 $\hat{1}(l_1, l_2, l_3)$ 방향으로 통과시킬 때 굴절률의 변화량을 계산하는 식이다.

3. 계산 및 결과

전기장을 가하는 방향을 설정하기 위하여 단결정의 c축을 Z축과 일치시키고, a축을 X축과 그리고 b축을 Y축과 일치시킨 직각좌표계를 생각하자. 전기장을 (X, Y, Z) 좌표계의 원점에서 임의의 방향으로 가한다고 가정한다면, 계산을 간단히 하기 위하여 임의의 방향이 변환된 좌표계의 Z'축 방향이 되면 편리하다. 따라서 (X, Y, Z) 좌표계의 관점에서 임의의 방향이 되기 위하여서는 좌표변환을 이용하면 된다. (X, Y, Z) 좌표계의 Z축에 관하여 ϕ 만큼 시계반대방향으로 회전하여 형성된 좌표계의 Y''축에 관하여 다시 시계반대방향으로 θ 만큼 회전한 좌표계를 (X', Y', Z')라 한다면, 좌표 변환행렬의 행렬요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \theta \cos \phi & a_{12} &= \cos \theta \sin \phi & a_{13} &= -\sin \theta \\ a_{21} &= -\sin \phi & a_{22} &= \cos \phi & a_{23} &= 0 \\ a_{31} &= \sin \theta \cos \phi & a_{32} &= \sin \theta \sin \phi & a_{33} &= \cos \theta \end{aligned} \quad (12)$$

그리고 굴절률의 변화를 계산하고자 하는 방향을 나타내는 방향여현은 결정축계와 일치하는 변환되지 않은 좌표계인 (X, Y, Z)에서 나타내되, 그 방향의 천정각을 ζ , 방위각을 η 라 하면 방향여현의 각 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} l_1 &= \sin \zeta \cos \eta \\ l_2 &= \sin \zeta \sin \eta \\ l_3 &= \cos \zeta \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x(\zeta, \eta) &= \tan\left(\frac{\zeta}{2}\right) \cos \eta, \\ y(\zeta, \eta) &= \tan\left(\frac{\zeta}{2}\right) \sin \eta \end{aligned} \quad (15)$$

앞에서 언급하였던 바와 같이 변환된 좌표계에서 Z'축 방향으로 전기장을 가한다면 식 (11)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta n(\hat{1}, E_3') &\approx -\frac{1}{2} \sum_q \sum_r \left[\sum_i \sum_j a_{iq} a_{jr} \right. \\ &\left. \left[\left(\sum_k \sum_l a_{ik} a_{jl} n_{kl}^0 \right)^3 \times \left(\sum_m \sum_n \sum_o a_{im} a_{jn} a_{3o} R_{1mn} \right) E_3' \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(\sum_m \sum_n \sum_o \sum_p a_{im} a_{jn} a_{3o} a_{3p} K_{mnop} \right) E_3' E_3' \right] \right] l_{q1} l_r \quad (14) \end{aligned}$$

식 (14)에 굴절률(n_{kl}^0)의 행렬요소 값[9], 1차 전기광학상수(R_{1mn})의 행렬요소 값[9] 및 2차 전기광학상수(K_{mnop})의 행렬요소 값[9]을 대입하여, 전기장의 방향을 나타내는 식 (12)와 굴절률의 변화를 계산하고자 하는 방향을 나타내는 식 (13)을 대입하여 수치 계산하면, (θ, ϕ) 방향으로 가한 전기장의 영향으로 (ζ, η) 방향으로 통과하는 파장 6328 Å인 광의 굴절률 변화 값이 계산된다. 식 (14)로 계산된 $\Delta n(\hat{1}, E_3')$ 은 (θ, ϕ) 만큼 변환된 좌표계의 Z'축 방향으로 전기장을 가하고 광이 (ζ, η) 방향으로 통과할 때, 전기장에 의한 굴절률의 변화량이다.

식 (14)에서 ζ 와 η 를 변화시키면서 얻은 $\Delta n(\hat{1}, E_3')$ 의 값은 공간분포를 이룬다. 이 공간분포를 결정축계와 일치하는 (X, Y, Z) 좌표계의 XY-평면에 입체투영(stereographic projection)법으로 투영시켜 나타내면 공간상의 곡면을 평면에 나타낼 수 있다. 입체투영법으로 투영시킬 때 굴절률의 변화량을 계산하고자 하는 방향, 즉 광이 통과하는 방향인 $\hat{1}(l_1, l_2, l_3)$ 는 XY-평면상의 점 $(x(\zeta, \eta), y(\zeta, \eta))$ 에 대응된다. 여기서 광이 통과하는 방향을 나타내는 방향여현의 성분 l_1, l_2 및 l_3 는 식 (13)에서 ζ 와 η 에 관련되어 있다. 입체 투영법으로 XY-평면에 투영시킬 경우, X축 상의 위치 x 와 Y축 상의 위치 y 는 ζ 와 η 의 각과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$\hat{1}(l_1, l_2, l_3)$ 방향에 대응되는 XY-평면의 점 $(x(\zeta, \eta), y(\zeta, \eta))$ 에서 Z축 방향으로 $\Delta n(\hat{1}, E_3')$ 의 값에 해당되는 높이로 나타내면, XY-평면 위에 $\Delta n(\hat{1}, E_3')$ 의 값에 따른 곡면이 형성된다. 이 곡면을 XY-평면에 등고선 형태로 나타내면 입체투영법에 의한 투영이 완료된다.

앞에서 기술한 식 (14)를 이용하여 굴절률의 변화가 최대가 나타나는 전기장의 방향과 굴절률의 변화가 최대가 되는 광의 통과 방향을 계산한 결과, 단위전기장 당 굴절률의 변화가 가장 큰 방향 중 양(+)의 값을 가지는 경우는 전기장을 $(\theta, \phi) = (54.7^\circ, 135.0^\circ)$ 방향으로 가하고 광을 전기장과 같은 방향인 $(\zeta, \eta) = (54.7^\circ, 135.0^\circ)$ 방향으로 통과시킬 때와 전기장을 $(\theta, \phi) = (54.7^\circ, 315.0^\circ)$ 방향으로 가하고 광을 전기장과 같은 방향으로 통과시킬 경우이다. 이 경우 단위전기장 당 굴절률 변화의 증가량 Δn_+ 은 $+3.2410 \times 10^{-11} \text{ V}^{-1}$ 이었다. 또 굴절률의 변화가 가장 큰 방향 중 음(-)의 값을 가지는 경우는 전기장을 $(\theta, \phi) = (54.7^\circ, 45.0^\circ)$ 방향으로 가하고 광을 전기장과 같은 방향인 $(\zeta, \eta) = (54.7^\circ, 45.0^\circ)$ 방향으로 통과시킬 때와 전기장을 $(\theta, \phi) = (54.7^\circ, 225.0^\circ)$ 방향으로 가하고 광을 전기장과 같은 방향으로 통과시킬 경우이다. 이 경우 단위전기장 당 굴절률 변화의 감소량 Δn_- 은 $-3.2410 \times 10^{-11} \text{ V}^{-1}$ 이었다.

전기장을 가하는 방향을 나타내는 각 (θ, ϕ) 와 굴절률을 계산하고자 하는 광의 통과 방향을 나타내는 각 (ζ, η) 의 값이 $(54.7^\circ, 135.0^\circ)$ 인 경우, 이 방향을 결정의 방향지수로 나타내면 $[\bar{1}11]$ 이고, $(54.7^\circ, 315.0^\circ)$ 인 경우는 $[1\bar{1}1]$ 이며, $(54.7^\circ, 45.0^\circ)$ 인 경우는 $[111]$ 이고, $(54.7^\circ, 225.0^\circ)$ 인 경우는 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 이다.

전기장을 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 단결정의 $[\bar{1}11]$ 이나 $[1\bar{1}1]$ 방향으로 가할 때 굴절률의 증가량이 가장 크게 나타나므로, 이 방향으로 단위전기장을 가하고 +Z에 해당하는 공간에 대한 굴절률 변화의 분포를 알기 위하여 입체투영법으로 투영하여 그렸다.

그림 1은 단위전기장을 $[\bar{1}11]$ 방향으로 가하고 파장이 6328 Å인 광의 통과 방향을 ζ 가 0°에서 90°까지, η 는 0°에서 360°까지 변화시키면서 계산한 굴절률의 변화량 $\Delta n(\hat{i}, [\bar{1}11])$ 이 형성하는 곡면의 높낮이를 입체투영법으로 그린 그림이다. 그리고 그림 2는 단위전기장을 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 가한 경우, 굴절률의 변화량 $\Delta n(\hat{i}, [1\bar{1}\bar{1}])$ 이 형성하는 곡면을 입체 투영한 그림이다. 그림 1과 그림 2에 나타난 바와 같이 전기장의 방향으로 통과하는 광의 굴절률 변화가 최대가 됨을 알 수 있다. 이 경우 굴절률의 최대 변화 값은 $+3.2410 \times 10^{-11} V^{-1}$ 이었다. 그리고 그림에 나타난 값들은 선평의 중앙값이다. 특히 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정에서 $[\bar{1}11]$ 방향과 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 압력을 가했을 때 압전효과에 의한 전기분극이 최대가 되는 방향이다. 따라서 이 방향으로 가하여지는 전기장에 의하여 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정 내부의 굴절률 변화를 유발하는 전기장에 의한 전기분극의 변화와 역압전효과에 의한 내부 변형의 결과로 생긴 광탄성효과에 의한 분극이 최대가 됨을 알 수 있다. 만약 전기장의 방향을 바꾸면, 즉 $[\bar{1}11]$ 방향이나 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향 대신에 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향과 $[\bar{1}11]$ 방향으로 전기장을 가하면서, 이 방향으로 파장 6328 Å인 광을 통과시킬 때의 굴절률 변화량은 $-3.2410 \times 10^{-11} V^{-1}$ 이 된다. 따라서 전기장의 방향이 바뀌면 굴절률 변화량의 절댓값은 같고 부호만 바뀌므로 압전성에 의한 효과가 지배적이며, 전왜효과의 영향은 무시할 정도였다. 파장이 6328 Å인 광에 대한 반파장전압 5,580 V를 (14)식에 대입하여 계산한 결과 전왜효과에 의한 굴절률의 변화량은 유효숫자 이하였다.

또 전기장을 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정의 $[111]$ 방향이나 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 가할 경우 굴절률의 감소량이 가장 크게 나타나므로, 이 방향으로 단위전기장을 가하고 굴절률 변화의 공간분포를 입체 투영하여 그렸다. 그림 3은 단위전기장을 $[111]$ 방향으로 가하고 파장이 6328 Å인 광의 통과 방향을 ζ 가 0°에서 90°까지, η 는 0°에서 360°까지 변화시키면서 계산한 굴절률의 변화량 $\Delta n(\hat{i}, [111])$ 이 형성하는 곡면의 높낮이를 입체투영법으로 그린 그림이다. 그리고 그림 4는 단위전기장을 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 가한 경우의 굴절률 변화량 $\Delta n(\hat{i}, [\bar{1}\bar{1}\bar{1}])$ 이 형성하는 곡면을 입체 투영한 그림이다.

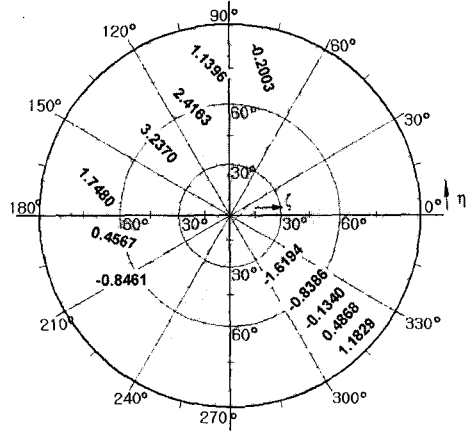


그림 1. $[\bar{1}11]$ 방향으로 전기장을 가할 경우 나타나는 굴절률 변화의 입체투영도($\times 10^{-11} V^{-1}$).

Fig. 1. A stereographic projection map of refractive index variation by an applied electric field to $[\bar{1}11]$ direction($\times 10^{-11} V^{-1}$).

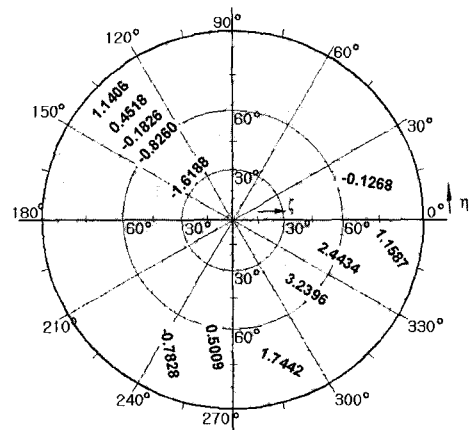


그림 2. $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 전기장을 가할 경우 나타나는 굴절률 변화의 입체투영도($\times 10^{-11} V^{-1}$).

Fig. 2. A stereographic projection map of refractive index variation by an applied electric field to $[1\bar{1}\bar{1}]$ direction($\times 10^{-11} V^{-1}$).

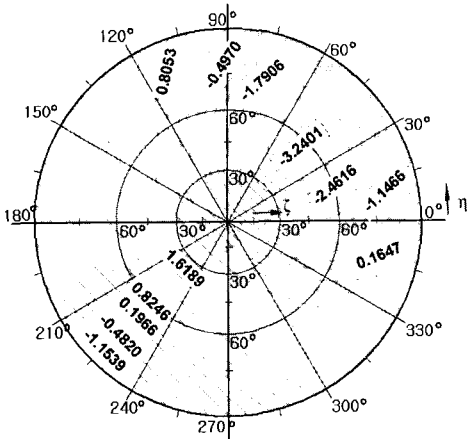


그림 3. [111] 방향으로 전기장을 가할 경우 나타나는 굴절률 변화의 입체투영도($\times 10^{-11} V^{-1}$).

Fig. 3. A stereographic projection map of refractive index variation by an applied electric field to [111] direction($\times 10^{-11} V^{-1}$).

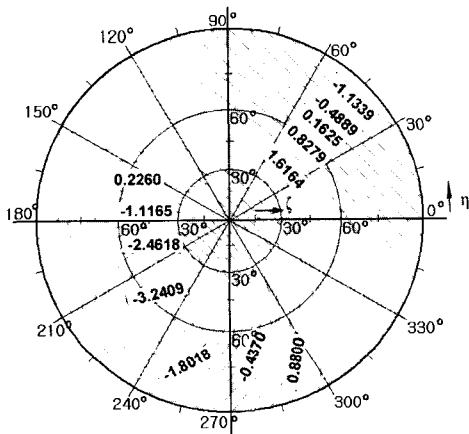


그림 4. $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 전기장을 가할 경우 나타나는 굴절률 변화의 입체투영도($\times 10^{-11} V^{-1}$).

Fig. 4. A stereographic projection map of refractive index variation by an applied electric field to $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ direction($\times 10^{-11} V^{-1}$).

그림 3과 그림 4에 나타낸 바와 같이 전기장의 방향으로 통과하는 광의 굴절률 변화가 가장 크게 감소함을 알 수 있다. 이 경우 굴절률의 변화 값은 $-3.2410 \times 10^{-11} V^{-1}$ 이었다. 만약 앞에서 기술한 바와 같이 전기장의 방향을 바꾸면, 즉 $[111]$ 방향이나 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향 대신에 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향이나 $[11\bar{1}]$ 방향으로 전기장을 가하면서 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향과 $[11\bar{1}]$ 방향으로 광을 통과시킬 때의 굴절률 변화량은 $+3.2410 \times 10^{-11} V^{-1}$ 이 된다.

입방정계인 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정의 체대각선 방향으로 전기장이 가하여 질 때 굴절률의 변화가 가장 크게 생겼다. 이와 같은 현상은 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정의 구조와 연관되어 나타나는 것으로 압전성이 크게 나타나는 방향과 일치한다. 일반적으로 압전성이 크게 나타나는 방향은 전기장에 의한 유도분극이 잘 생기는 방향이며, 또 유도분극이 잘 생기는 방향은 결정을 이루는 하전 입자들의 공간분포가 전기장에 의하여 잘 변형이 되는 방향이다. 전기장에 의하여 변형된 전하분포는 에너지 상태밀도를 증가시키고, 이 증가된 에너지 상태밀도 속을 지나가는 광은 변형된 전하분포가 갖는 에너지 계도 사이의 천이에 의한 흡수와 재방출의 과정을 반복하면서 광이 지나간다. 굴절률이 커지거나 적어지는 현상은 광의 전기장의 흡수와 재방출의 기회가 많아지거나 적어짐을 의미함과 동시에 또 재방출의 지연시간이 길어지거나 짧아짐을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서 전기장에 의한 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정에 대한 굴절률 표시타원체의 변형을 계산하는 방법을 제시하고, 수치계산을 하였다. 전기장에 의하여 굴절률 표시타원체의 모양이 가장 많이 변하는 전기장의 방향을 찾아서, 그 방향으로 전기장을 가한 결과 생기는 굴절률 표시타원체의 변화량을 입체투영 방법으로 결정의 a-b 평면에 그렸다.

전기장을 $Bi_{12}GeO_{20}$ 단결정의 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 이나 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 가하고 파장이 6328 Å인 광을 전기장의 방향과 같은 방향으로 통과시킬 때 단위 전기장 당 굴절률의 증가량이 가장 크며, 그 값은 $+3.2410 \times 10^{-11} V^{-1}$ 이었다. 그리고 전기장을 $[111]$ 방향 및 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 방향으로 가하고 광을 전기장의 방향과 같은 방향으로 통과시킬 경우 단위

전기장 당 굴절률의 감소량이 가장 크며, 그 값은 $-3.2410 \times 10^{11} \text{ V}^{-1}$ 이었다.

입방구조를 갖는 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 단결정은 체대각선 방향으로 압전성을 가지기 때문에 전기장에 의한 결정 내의 유도분극의 변화가 가장 크게 생기는 이 체대각선 방향으로 전기장을 가할 때 굴절률의 변화가 가장 크게 일어남을 알 수 있었다. 체대각선 방향으로 전기장을 가할 경우 압전성에 의한 굴절률 변화의 절대량은 단위전압 당 $3.2410 \times 10^{11} \text{ V}^{-1}$ 로서, 물질의 뒤틀림 현상으로 나타나는 전왜효과에 의한 굴절률의 변화량 $2.6 \times 10^{17} \text{ V}^{-1}$ 보다는 현저하게 컸다.

감사의 글

본 연구는 2004년 경남대학교 학술논문게재연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] A. A. Ballman, "The growth and properties of piezoelectric bismuth germanium oxide $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ", J. Cryst. Growth., vol. 1, p. 37, 1967.

[2] K. E. Youden, R. W. Eason, M. G. Gower, and N. A. Vainos, "Epitaxial growth of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ thin-film optical waveguides using excimer laser ablation", Appl. Phys. Lett., vol. 59, No. 16, p. 1929, 1991.

[3] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, "Defects in epitaxial multilayers", J. Cryst. Growth, vol. 27, p. 118, 1974.

[4] D. G. Papazoglou, A. G. Apostolidis, and E. D. Vanidhis, "Measurement of the electro-optic coefficient of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO), $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) crystals", Synthetic Metals, Vol. 83, p. 281, 1996.

[5] 이수대, 이찬구, 이호섭, 김재형, "Bismuth germanium oxide 단결정의 탄성 및 광탄성에 관한 연구", 새물리, 33권, 2호, p. 283, 1993.

[6] J. P. Huignard and F. Micheron, "High-sensitivity read-write volume holographic storage in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystals", Applied Physics Letters, vol. 29, No. 9, p. 591, 1976.

[7] S. C. Abrahams, P. B. Jamieson, and J. L. Bernstein, "Crystal structure of bismuth germanium oxide $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ", J. Chem. Phys., vol. 47, No. 10, p. 4034, 1967.

[8] Claire Gu, Yuan Xu, Yisi Liu, J. J. Pan, Fengqing Zhou, and Henry He, "Applications of photorefractive materials in information storage, processing and communication", Optical Materials, vol. 23, p. 219, 2003.

[9] 이수대, 이찬구, 김정윤, 박옥수, " $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 및 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 단결정의 전기광학효과에 관한 연구", 경남대학교 대학원 논총, 제 9집, p. 143, 1994.