

## BGO 光전압 센서의 안정화 및 동작특성

(Stabilization and Characteristics of An Electro-optical  
BGO Voltage Sensor)

李 景 植\*

(Kyung Shik Lee)

## 要 約

결정 bismuth germanate ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )를 이용한 광전압센서를 소개한다. 광전압센서에 이용될 bismuth germanate에는, 측정결과  $1.7 \times 10^{-5}$ 에서  $5.4 \times 10^{-4}$  정도의 linear birefringence가 존재하고 있었으며, 이들 linear birefringence의 온도의존성은 상당히 높은 것으로 판명되었다. 광전압센서의 안전성을 높이기 위해서 annealing 방법이나 보상방법을 시도하였는데, 이 보상방법을 사용하였을때 센서의 온도 안전성, 진동에 대한 안정성, 압력에 대한 안정성을 크게 높일 수 있었다. 또한 측정된 센서의 noise equivalent voltage는  $1 \sim 2 \text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$  이었다.

## Abstract

We present an electro-optical voltage sensor. Crystalline bismuth germanate ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) used as the electrooptical crystal exhibited linear birefringences of  $1.7 \times 10^{-5}$  to  $5.4 \times 10^{-4}$ . And these birefringences were observed to be strongly temperature dependent. In order to improve the stability of the electro-optical voltage sensor, crystals ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) were annealed and a compensation method was used. After applying this compensation method to the voltage sensor, the temperature stability, pressure stability, and vibration stability of the sensor were highly improved. Noise Equivalent Voltage of this sensor was a few  $\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

## I. 서 론

어떤 결정에 광파 전달방향과 수직이 되게 전계를 가해주면, 결정내부의 굴절률이 광파 진동방향에 따라서 증가 혹은 감소되는데 이러한 현상을 광전효과(electro-optic effect)라고 한다. 이와 같이 굴절률의 증가 또는 감소되는 2개의 주축을 지축(slow axis)또

는 속축(fast axis)이라고 각각 말하며, 이 두축 방향에 평행하게 진동하면서 전파되는 두 광파 성분사이에는 위상차  $\delta$ 가 생긴다. 이 위상차는 두축 사이의 굴절률의 차, 즉 복굴절의 크기에 비례하므로, 위상차는 전계에 의해 인가되는 복굴절에 의해서 생긴다고 할 수 있다. 또한 이 위상차는 광전결정(electro-optic crystal)을 두개의 편광자 사이에 놓고 쉽게 측정할 수 있다. 광전결정 안에서의 위상차 혹은 복굴절의 크기를 측정함으로써 전압을 측정하는 방법이 지금까지 여러사람들에 의해 연구되어 왔다.<sup>[1-4]</sup>

\*正會員, 成均館大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Sungkyunkwan Univ.)  
接受日字: 1990年 9月 3日

전압을 측정하는데 사용되는 광전결정에는  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  등 여러가지가 사용되어 왔는데, 그중 BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )는 안정된 전압센서를 만드는데 적합하다고 주장되어 왔다.<sup>11)</sup> 이것은 BGO가 crystal class  $\bar{4}3m$ 에 속해 있으면서 온도의존도가 높은 natural birefringence나 optical activity가 없기 때문이다. 그러나 BGO결정 또한 제품 공정과정 및 제품제조처에 따라 그 정도가 다르지만 어느 정도의 linear birefringence가 있는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup> 이 linear birefringence는 광전결정내에서 전계(혹은, 전압)에 의해서 생기는 linear birefringence에 중첩이 되어 위상차에 영향을 준다. 따라서 이 linear birefringence가 온도에 따라서 변화될 때, 이 위상차(혹은 전압센서의 출력)또한 온도에 따라서 변화된다. 이때문에 안정성이 높은 전압센서를 만들기 위해서는 이 복굴절(birefringence)을 제거시키거나 전압센서의 출력(혹은 위상차)에 미치는 영향을 없애 주어야 하겠다.

본 논문에서는 우선 BGO 결정 안에 있는 복굴절이 온도에 따라서 어떻게 변화하는지, 따라서 전압센서의 출력에 어떠한 영향을 주는지를 고찰하였다. 다음에는 전압센서의 안정성을 높이기 위한 방법으로 annealing을 하여 결정이 갖고 있는 복굴절을 직접 제거하려고 하였으며, 아울러 이 복굴절이 전압센서의 출력에 주는 영향을 한 보상방법을 이용해서 없애려 하였다. 마지막으로 위의 사항을 고려해서 만든 광(electrooptic)전압센서의 동작특성을 조사하였다.

II. 복굴절 Annealing 및 보상방법

Cubic 보다 낮은 대칭성을 갖고 있는 결정은 대부분 natural birefringence를 갖고 있으며, Cubic crystal 이라 하더라도 많은 경우에 제품 공정과정에서 복굴절이 생기게 된다. 이 복굴절은 대부분 온도의존성이 높으며, 따라서 이 복굴절이 센서에 미치는 영향을 없애주기 위한 여러가지 보상방법이 여러 사람들에 의해 시도 되어왔다.<sup>15-16)</sup>

여기서는 악조건(harsh environment) 하에서 안정성이 높은 전압센서를 만들기 위해서 우선 광전결정으로 BGO를 선택하였으며, 실험을 통해서 이 BGO에 존재하는 복굴절의 크기가 얼마나 되는지를 추정하여 보았다. 또한 온도에 따라서 이 복굴절의 크기가 어떻게 변화하는지도 조사해 보았다. 파장 830nm에서 측정된 복굴절은  $1.7 \times 10^{-5} \sim 5.4 \times 10^{-5}$  정도였다. 복굴절의 온도 변화는 직사각형 BGO 결정을 오븐에 넣고 오븐 온도를 한 온도에 고정시킨뒤, 열평

형 상태에 이르렀을 때 복굴절의 크기를 측정했다. 이렇게 오븐온도를 상온에서 80°C에까지 변화시키면서 복굴절을 여러 온도에서 측정하여 보았다. 그림 1은 복굴절이 온도에 따라서 어떻게 변화하는지를 나타내 주고 있다. 이 그림으로 부터 정규화된 복굴절의 온도 변화는 대략  $-1 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있다.

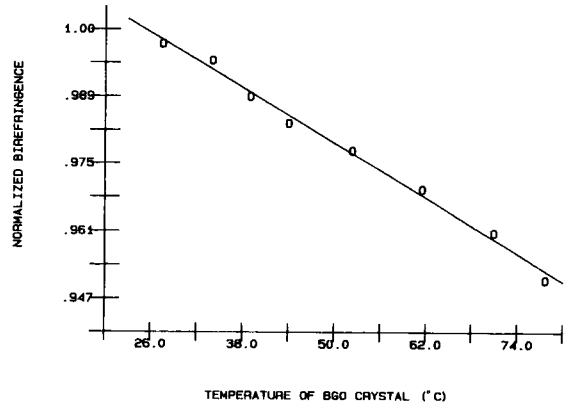


그림 1. 복굴절의 온도 의존성(파장 0.83μm)  
Fig. 1. Temperature dependence of Birefringence (λ=0.83μm).

이와같이 온도에 따라서 크기가 변화하는 복굴절을 전압센서의 출력 안정을 위해서, 다음에는 BGO 결정을 annealing해 보았다. 이 annealing은 광 물질 안에 복굴절을 일으키는 strain이나 stress를 제거하기 위해 자주 사용되어 왔다.<sup>17)</sup> Annealing 공정은 먼저 오븐온도를 870°C로 높이고 오븐에 결정 샘플을 24시간 이상 870°C에 방치한 뒤 서서히 상온으로 온도를 낮추면서 이루어졌다.<sup>14)</sup>

그림 2는 복굴절의 크기 B에 비례하여 나타나는 결정 샘플의 축축과 지축사이의 위상차(=B·2π/λ·L, λ:파장, L:결정의 길이)가 annealing 하기전과 후에 어떻게 온도에 따라서 변화하는지를 보여주고 있다. 여기서 ○-마크는 annealing 하기전, ●-마크는 annealing 한 뒤의 두개의 샘플(crystal technology 産:윗 data, Crimatec 産:아래 data)이 갖고 있는 굴절률의 상대적 크기를 온도의 함수로 나타낸 것이다. 그림 2에 나타난 화살표는 두개의 편광자를 이용해서(복굴절에 의해 생기는) 위상차를 측정할 때, 결정 안의 depolarization에 의해서 잡음으로 나타나는 위

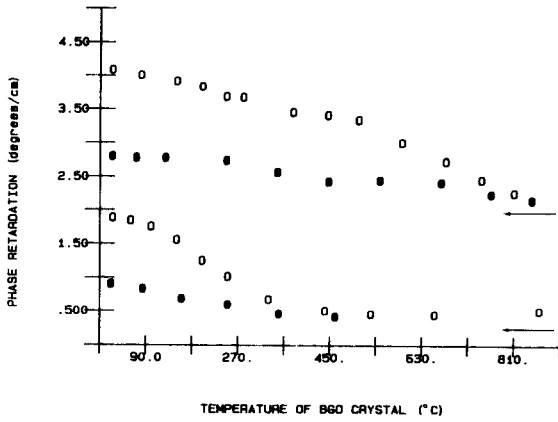


그림 2. Annealing 하기 전과 후에 측정된, 복굴절의 크기  $B(=\lambda\delta/2\pi L)$ 에 비례하는, 단위길이 1cm에 해당하는 위상차  $\delta$ , 위쪽 데이터(화살표 포함)들은 Crystal technology 산 BGO 결정으로부터 얻어졌으며 아래쪽 데이터들은 Crismatec 산 결정으로부터 얻어졌다.

Fig. 2. Birefringences before and after annealing top data are for the crystal from crystal technology, and bottom data are for the crystal from crismatec moisty phase retardations caused by the depandization in the crystals of crystal technology and crismatec, respectively.

상차의 크기를 표시해 주고 있다. 이 그림은 annealing을 함으로써 복굴절을 많이 없애 줄 수 있다는 것을 설명해 준다. 이와같이 annealing을 해서 복굴절을 많이 없애 줄 수는 있겠으나, 이 annealing 방법은 복굴절을 완전히 없애 주기가 어렵고 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 이에 비해서 다음에 설명할 보상 방법은 시간이 절약되고 1st order 까지 복굴절이 센서에 주는 영향을 없애 줄 수 있다는 잇점이 있다.

여기서 사용될 보상방법은 이미 참고문헌<sup>6)</sup>에서 제안되었으며, 그림 3에서 보여주듯이 입력쪽 편광자,  $\lambda/4$  plate, 전광결정 외에 두개의 검광자 역할을 하는 polarizing beam splitter (PBS)를 사용한다. 전계(혹은 전압)는 직육면체 BGO의 (110)면에 가해지고 입사광은 BGO의  $(\bar{1}10)$ 면에 그림 4와 같이 통과시킨다. 여기서 전광효과에 의해 생기는 BGO의 두 주축과  $\lambda/4$  plate의 두 주축 방향은 입사광의 방향과 수직인 면에 평행하며 입력쪽 편광자의 편광축에 대해

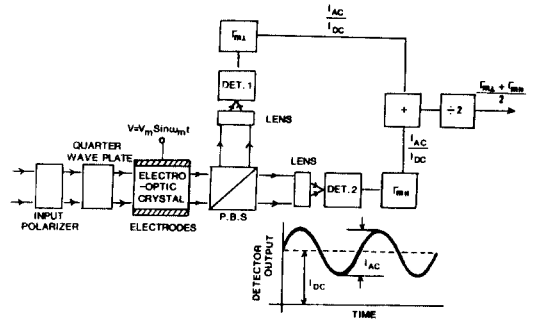


그림 3. 광전압센서의 보상 방법

Fig. 3. Compensation scheme of an EO voltage sensor.

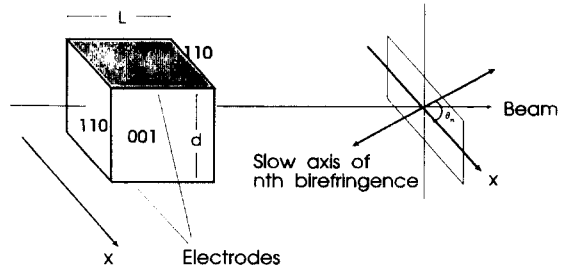


그림 4. 광전압센서에 이용된 BGO결정의 orientation

Fig. 4. Orientation of BGO crystal for an EO voltage sensor.

서  $45^\circ$ 가 되게 orientation 되어 있다.

어떤 전압( $V = V_m \sin \omega_m t$ ;  $\omega_m$  - 주파수)이 BGO에 인가되면 이 전압의 크기에 비례하는 굴절률 및 위상차가 생긴다. 이 위상차는 PBS로부터 통과 또는 반사되어 나오는 광신호들로부터 AC신호(peak to peak value)와 DC신호의 비로 정의되는 Modulation depth를 구함으로써 얻어지며, 또한 modulation depth와 전압과의 관계로부터 인가전압의 크기  $V_m$ 이 구해진다. 참고적으로 위상차가  $\pi$ 라디안보다 훨씬 작은 경우 위상차와 modulation depth가 서로 근사하게 된다.

여기서 편의상 PBS로부터 통과되어 나오는 modulation depth를  $\Gamma_{m\parallel}$ 이라고 하고 반사되어 나오는 modulation depth를  $\Gamma_{m\perp}$ 이라고 하자. 이 경우 만일 전압에 의해 인가되는 복굴절외에는 BGO 안에 복굴절이 존재하지 않는다면  $\Gamma_{m\parallel}$ 과  $\Gamma_{m\perp}$ 는 다같이

modulation depth  $\Gamma_m (= (2\pi/\lambda)n_0^3 r_{41} V_m L/d)$ 이 된다. 여기서  $n_0, r_{41}, d$ 는 각각 결정의 굴절률, 결정의 linear electrooptic 계수, 결정의 두께이다. 하지만 만일 BGO 안에 복굴절이 존재하면,  $\Gamma_{m\parallel}$ 과  $\Gamma_{m\perp}$ 는 서로 다르게 되어  $n$ 개의 복굴절이 존재하는 경우 아래와 같이 된다.<sup>14,6)</sup>

$$\Gamma_{m\parallel} = \frac{\Gamma_m}{1 - \sum_{n=1}^N \delta_n \sin 2\theta_n} \quad (1)$$

$$\Gamma_{m\perp} = \frac{\Gamma_m}{1 + \sum_{n=1}^N \delta_n \sin 2\theta_n} \quad (2)$$

여기서  $\delta_n$ 는  $n$ 번째 linear birefringence에 의한 위상차를 나타내어주고  $\theta_n$ 는 그림 4와 같이  $n$ 번째 linear birefringence 지축의 azimuth angle이다. 위식(1)과 (2)는 BGO안에 내재하고 있는 복굴절에 의해서 modulation depth(혹은 위상차)  $\Gamma_{m\parallel}, \Gamma_{m\perp}$ 가  $\Gamma_m$ 으로 부터 변화된다는 것을 나타내 주고있다. 즉 (1)식에 따라서  $\Gamma_{m\parallel}$ 이 증가(감소)하면,  $\Gamma_{m\perp}$ 은 (2)식에 따라서 반대로 감소(증가)한다. 하지만,  $\Gamma_{m\parallel}$ 와  $\Gamma_{m\perp}$ 의 평균값은 근사치  $\Gamma_m$ 으로써 modulation depth에 무관하여 광전압센서의 출력을  $\Gamma_{m\parallel}$ 와  $\Gamma_{m\perp}$ 의 평균치를 취함으로써 복굴절에 의한 이들 센서의 출력불안정(modulation depth의 변화)을 없애줄 수 있겠다.

그림 5는 외부 온도가  $-5$ 에서  $65^\circ\text{C}$ 까지 변화할때 광전압센서의 출력이 보상방법을 사용했을 경우와 사용하지 않았을때, 각각 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 위 그림에서 보여주는 것과 같이 보상방법을 적용한 경우, 센서의 온도 안정성(온도변화에 대한 출력변화 정도)이 보상 방법을 적용하지 않은 경우의  $\pm 7\%$ 에서  $\pm 0.75\%$ 로 개선이 되었다.

### III. 광전압센서의 동작특성

광전압센서는 LED(파장  $0.83\mu\text{m}$ ), Multimode optical fiber, 센서 소자부, 수광소자, 신호처리부등으로 구성하고 있다. LED에서 발광되어진 광이 광섬유를 통하여 광파전달순서에 따라서 입력편광자,  $\lambda/4$ 판, BGO결정, PBS등으로 구성된 센서 소자부에 전달된다. 센서 소자부에 도달한 광은 우선 입력 편광자에서 직선 편광상태가,  $\lambda/4$ 판에서 원 편광상태가, BGO 결정에서 인가전압에 의한 편광상태의 변조로 타원 편광 상태가 된뒤에 PBS를 통해서 두개의 서로 직교하는 직선 편광성분이 분류된다. 분류된 두개의 성분은 각각 다른 광섬유를 통해서 photodiode에 수광되며, 신호처리 과정을 거쳐서 출력신호, 즉,

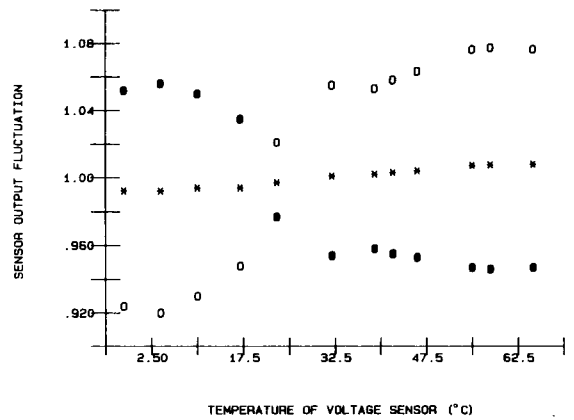


그림 5. 보상방법을 사용했을 때와 사용하지 않았을 때의 광전압센서의 온도 안정성. ○-마크와 ●-마크는 보상방법을 사용하지 않았을 때, 온도변화에 따른 정규화된 출력 변화를 나타내고 있으며, \*-마크는 보상방법을 사용했을때의 온도 변화에 대한 출력변화를 보여주고 있다. 여기서 사용된 BGO 샘플은 Crimatec 회사 제품이다.

Fig. 5. Temperature stability of an EO voltage sensor with and without compensation open and solid dots are the voltage sensor outputs, and \* marks represent the voltage sensor outputs with the compensation

전압이 얻어진다.

광전압센서에 이용된 BGO결정의 orientation은 그림 4와 같으며 길이와 두께는 각각  $20\text{mm}$ 와  $\sim 5\text{mm}$ 이다. 또한 파장  $0.83\mu\text{m}$ 에서의 결정의 linear electrooptic 계수,  $r_{41}$ 과 결정의 굴절률  $n_0$ 는 각각  $1.11\text{pm/v}$ 과  $2.068$ 이며,<sup>18)</sup> 따라서 위상차  $((2\pi/\lambda)n_0^3 r_{41} V L/d)$ 가  $\pi$ 가 되는 인가전압  $V$ , 즉,  $V\pi$ 는  $10.6\text{KV}$ 이다. 그림 6은  $10\text{mV}$ 의 입력신호가 광전압센서에 인가되었을때 나오는 출력을 대역폭  $1\text{Hz}$ 로 놓고 그린 것이다. 이 그림에 나타난 RMS잡음과 신호로부터 이 센서의 noise equivalent voltage (NEV)가  $1\sim 2\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 임을 알 수 있겠다.

외부온도, 압력 변동에 따른 광전압센서의 출력안정성은 조사해본 결과  $-5^\circ\text{C}$ 에서  $65^\circ\text{C}$ 사이의 온도변화에서  $\pm 0.75\%$ 이내의 안정성을 보여주었고, BGO 결정에 압력을  $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  이상 가해준 경우에도  $\pm 0.2\%$ 이내의 좋은 안정성을 보여 주었다. 또한 센서의 진동에 대한 안정성을 조사해 보기위해 전압센서를 스피커위에 고정시켜 놓고 진동 주파수를  $10\text{Hz}$

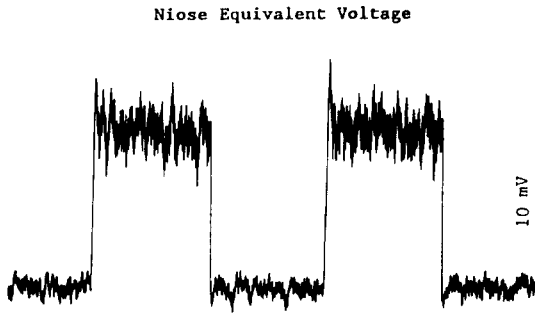


그림 6. 광전압센서의 noise equivalent voltage (NEV)

Fig. 6. Noise equivalent voltage (NEV) of the EO voltage sensor.

에서 200Hz까지 변화시켜가며 진동시켜 보았다. 이때의 진동변위는 1.5mm 정도이었으며, 이 진동에 대해서 전압센서는  $\pm 0.5\%$ 이내의 안정성을 보여 주었다.

마지막으로 측정된 광전압센서의 주파수 대역폭은 검광기, 증폭기등 전기적인 부품에 의해서 다소 제한 되었으나  $\sim 100\text{MHz}$  이었다.

#### IV. 결 론

본 연구를 통해서 BGO 결정 안에 존재하는 불균질이  $1.7 \times 10^5 \sim 5.4 \times 10^5$  정도로 상당히 크다는 것을 알 수 있었으며, 이들이 온도에 의존한다는 것도 알 수 있었다. 이어서 광전압센서의 안정성을 높여주기 위해서, annealing을 하여 이들 불균질을 크게 줄여 줄 수는 있었으나, 완전히 없애 줄 수는 없었다. 그러나 보상방법을 사용한 뒤에는 이들 불균질(압력에 의해서 생기는 불균질 포함)에 의한 영향을 거의 없애 줄 수 있었다. 즉,  $-2^\circ\text{C}$ 에서  $65^\circ\text{C}$ 까지의 온도변화에 대한 전압센서의 출력 안정성은 보상방법을 사용하였을 때 보상방법을 사용하지 않았을 때보다  $\pm 7.0\%$ 에서  $\pm 0.75\%$ 로 높여 줄 수 있었고, 압력  $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 까지의 변화에 대한 안정성은 보상방법을 쓰지

않았을 때의  $\pm 2\%$ 에서  $\pm 0.2\%$ 로 향상시킬 수가 있었다. 또한 광전압센서는 진동(주파수 10~200Hz, 진동변위 1.5mm)에 대해서도  $\pm 0.5\%$ 이내의 출력안정성을 보여 주었다. 마지막으로 이 센서의 NEV는  $1 \sim 2 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었으며 주파수 대역폭은 100MHz 정도 였다.

#### 參 考 文 獻

- [1] K. Shibata, "A Fiber Optic Electric Field Sensor using the Electro-optic Effect of  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ," *Proceedings, First International Conference on Optical Fiber Sensors*, London, 164-168, 1983.
- [2] Y. Kuroda, Y. Abe, H. Kuwahara, K. Yoshinaga, "Field Test of Fiber-Optic Voltage and Current Sensors applied to Gas Insulated Substation," *SPIE* vol. 586 Fiber Optic Sensors, 1985.
- [3] G.W. Day, K.S. Lee, A.H. Rose, L.R. Veaser, B.J. Papatheofaui, and H.K. Whitesel, "Optical Fiber Sensors for Electromagnetic Quantities," *Proceeding of the Department of Defenses, Fiber Optics Conference '88*
- [4] K.S. Lee, "Electro-optic Voltage Sensor: Birefringence Effects and Compensation Methods," *Applied Optics*, 20 Oct. 1990,
- [5] R.T. Denton, F.S. Chen, and A.A. Ballman, "Lithium Tantalate Light Modulator," *J of Appl. Phys*, 38, 1611-1617, 1967.
- [6] K.S. Lee, "New Compensation for Bulk Optical Sensors with Multiple Birefringences," *Appl. Opt.* 28, 2001-2011, 1989.
- [7] G.W. Morey, *The Properties of Glass*, (Reinhold Publishing Corporation, NY, 1954.
- [8] K.S. Lee, D. Conrad, G.W. Day and P.D. Hale, "Measurement of Optical, Electro-optical, and Photoelastic Properties of Crystalline  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ," *Applied Optics*, to be published.

---

著 者 紹 介

---

李 景 植 (正會員)

1979年 2月 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1978年 12月~1980年 8月 전자통신연구소 근무. 1982年 2月 University of Colorado (Boulden) 대석사. 1985年 8月 Univ. of Colorado대 박사학위 취득 (Electrical Engineering Dept.). 1985年 9月~1986年 8月 University of Colorado대 연구원. 1986年 9月~1988年 7月 미국립표준연구소 (NIST) 근무. 1988年 7月~1990年 2月 美 TACAN Corp. 근무. 1990年 3月~현재 성균관대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야는 광센서, 광통신, Optical data storage 및 Material research 등임.