

광굴절결정에서 인코히런트한 두 빔에 의해 발생하는 위상공액파의 광세기 의존성

(Intensity Dependence of Mutually Pumped Phase Conjugator in Photorefractive Crystal)

朴 曙 延*, 郭 鍾 薰*, 金 天 民**

(Seo Yeon Park, Chong Hoon Kwak, and Cheon Min Kim)

要 約

광굴절결정 BaTiO₃의 beam fanning 현상에서 기인하는 fanning grating을 이용하여 상호간에 인코히런트한 두 빔에 의해 발생하는 위상공액기에 대해 실험하고 분석하였다. 먼저 광굴절결정의 광세기의존성을 살펴보기 위해 두 빔 결합에서 흡수 및 결합계수의 광세기 의존성을 실험한 결과, 실험에 이용된 광굴절 결정의 결합계수와 흡수계수의 포화세기가 각각 0.15W/cm², 1.5W/cm²로 결정되었다. 두 빔 결합에서 얻은 포화세기를 MPPC에 적용하여 두 빔의 입사각, 세기비 및 전체 세기값에 대한 위상공액반사도의 변화를 분석한 결과, 광굴절결정의 결합 및 흡수 계수의 광세기 의존성으로 인해 MPPC에 입사되는 두 빔의 일정한 세기비에 대해 MPPC의 위상공액 반사도가 총 광세기에 따라 증가하다가 어느 광세기 이상에서는 감소하는 광세기 의존성을 가졌다.

Abstract

Mutually pumped phase conjugator(MPPC) is experimentally investigated and analyzed in terms of fanning gratings of a photorefractive BaTiO₃ crystal.

As considering the intensity-dependent absorption and coupling coefficients in photorefractive two wave mixing, the dependence of phase conjugate reflectivities on the incident angle, beam ratio, and total intensity in MPPC is analyzed.

I. 서 론

광굴절결정은 저장용량, 회절효율면에서 우수하고 결정이 갖은 실시간 및 재구성 특성과 낮은 광세기

에서의 높은 비선형 특성 때문에 광정보처리, 광신경망, 광컴퓨팅 등에서 핵심 기술을 제공할 수 있는 소자로 널리 연구되고 있다. 광굴절결정의 위상공액 특성 연구는 기존의 DFWM(degenerate four wave mixing), EPPC(externally pumped phase conjugator), SPPC(self pumped phase conjugator)에서 최근에는 MPPC(mutually pumped phase conjugator)에 관심이 모아지고 있다.

상호간에 인코히런트한 두 빔을 서로 다른 각도에서 펌프함으로써 동시에 두개의 위상공액파를 발

*正會員, 韓國電子通信研究所
(Electronic Telecommunication Research Institute)

**學生會員, 韓國科學技術院 物理學科
(Dept. of Physics, Eng., KAIST)

接受日字: 1991年 8月 16日

생시키는 MPPC는 두 빔간의 인코히런트한 특성으로 쉽게 광통신에 응용 가능하며 외부 간섭에 영향을 적게 받는다.^[1] 두개의 입사 빔으로부터 별개로 형성된 fanning 홀로그래를 통과한 빔이 서로 다른 홀로그래에서 회절되어 위상공액파가 발생하는데, 이때 한 홀로그래에서 다른 홀로그래로 빔이 진행하면서 결정 내부의 면을 반사하는 수에 따라 bridge conjugator (0번),^[2] bird wing phase conjugator (1번)^[3] mutually incoherent beam coupler (2번),^[4] flog legs phase conjugator (3번)^[5]로 구분된다. MPPC는 광정보처리 분야에서 많은 응용을 보이고 있으며,^[6] 광교환 및 광컴퓨팅 분야에서 광배선과 연결되어 연구되고 있다.^[7,8]

본 논문에서는 광굴절결정에서의 흡수 특성이 두 빔 결합에 미치는 효과가 중요시 됨에 따라,^[9,10] 광굴절결정의 흡수계수와 결합계수가 광세기에 의존하는 성질^[11-14]을 이용하여 FLPC (flog legs phase conjugator)의 이론적 분석과 실험을 수행하였다.

II. 이 론

그림1과 같은 구조를 갖는 flog-legs type MPPC (FLPC)는 광굴절결정의 beam fanning 현상에 기인한다. 레이저빔이 결정을 통과할 때 결정의 불완전성(defects)에 의해 산란되는 빔이 처음에는 입사빔에 비해 매우 약해 weak index modulation을 형성하나, 에너지 천이가 결정의 c-축 방향에 따라 일어나 점차 강한 fanning hologram을 형성한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 입사빔이 두 빔 결합에 의해 형성된 한 쪽 fanning hologram에서 빔굽힘 (beam bending) 현상이 일어나 결정 내부의 세 면에서 반사된 후 다

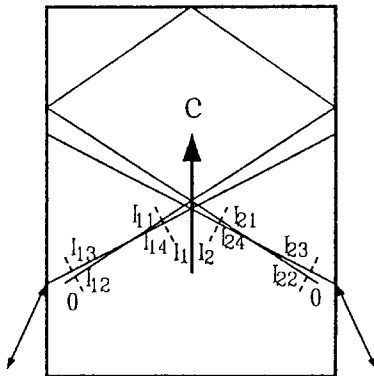


그림 1. FLPC의 구성도
Fig. 1. Diagram of FLPC.

른 fanning hologram에서 네 빔 결합을 일으켜 각 빔에 대한 위상공액파를 발생시킨다. MPPC가 실제적으로 많은 결합영역을 가지고 있으나 여기서는 두 영역으로만 구분하고, 또한 평행광인 경우만을 고려하기로 한다.^[5]

Fanning hologram은 투과형 격자에 해당하므로 4광과 혼합시 네 빔이 코히런트할 필요가 없으므로 광통신에 응용시 큰 장점이 된다. 두개의 투과형 격자가 직렬로 연결된 네 빔 결합에서의 결합방정식은

$$\begin{aligned} \frac{dA_{11}}{dz} &= \frac{\gamma_1 g_1}{I_0} A_{14} \quad \frac{dA_{12}^*}{dz} = \frac{\gamma_1 g_1}{I_0} A_{13}^* \\ \frac{dA_{13}}{dz} &= -\frac{\gamma_1 g_1}{I_0} A_{12} \quad \frac{dA_{14}^*}{dz} = -\frac{\gamma_1 g_1}{I_0} A_{11}^* \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 여기서 γ_1 과 γ_2 는 각 영역에서의 결합계수이고, 전체 빔세기합 I_{20} 과 I_{10} 는

$$I_{10} = |A_{11}|^2 + |A_{12}|^2 + |A_{13}|^2 + |A_{14}|^2, \quad i=1, 2 \quad (2)$$

이고, g_1 과 g_2 는

$$g_1 = A_{11} A_{14}^* + A_{12}^* A_{13}, \quad i=1, 2 \quad (3)$$

로 정의된다. 한편 두 빔의 가장자리에서 경계조건은

$$A_{11}(0) = 0 \quad A_{13}(l_1) = 0, \quad i=1, 2 \quad (4)$$

이고, 두 영역을 연결하는 연속 방정식은

$$A_{12}(l_1) = A_{21}(l_2) Re^{i\phi} \quad A_{22}(l_2) = A_{11}(l_1) Re^{i\phi} \quad (5)$$

이다. 여기서 R은 결정표면에서의 Fresnel-reflection 계수이고, ϕ 는 두 영역간의 반사와 전파에서 기인되는 위상천이이다. 한편 흡수와 관련된 항을 제외하면 에너지 보존으로 부터 다음의 관계가 성립한다.

$$d_{11} = I_{11} + I_{14} \quad d_{12} = I_{12} + I_{13}, \quad i=1, 2 \quad (6)$$

이때 각 값은 상수이며, 결합방정식으로 부터

$$c = A_{11} A_{12} + A_{13} A_{14}, \quad i=1, 2 \quad (7)$$

도 성립한다. 에너지 보존량으로 부터 각 영역의 경계면에서의 위상공액반사도는

$$R_1 = \frac{|A_{13}(0)|^2}{|A_{14}^*(0)|^2} = \frac{|c|}{|d_{11}|}, \quad i=1, 2 \quad (8)$$

이다. 직렬로 연결된 두개의 결합방정식을 경계조건과 연속방정식을 이용하여 풀면

$$\begin{aligned} \tanh\left[\frac{\gamma l [(d_{11}-d_{12})^2 + 4|c|^2]^{\frac{1}{2}}}{2(d_{11}+d_{12})}\right] \\ = \frac{[(d_{11}-d_{12})^2 + 4|c|^2]^{\frac{1}{2}}}{(d_{11}+d_{12})}, \quad i=1, 2 \end{aligned} \quad (9)$$

이고, 연속방정식과 에너지 보존량으로 부터

$$|c|^2 = \frac{d_{12}d_{22}}{|R|^2}, \quad i=1, 2 \quad (10)$$

를 얻는다. 식(8), (9), (10)으로 부터 수치해석적으로 입사빔세기나 결합계수에 대한 위상공액반사도를 구할 수 있다.

그림2는 흡수를 고려하지 않을 때의 결정내의 Fresnel 계수의 크기에 따른 결합 계수와 위상공액반사도의 관계이다. 이 경우 두 영역의 결합계수가 같고 두 입사빔의 세기비 q는 1이다.

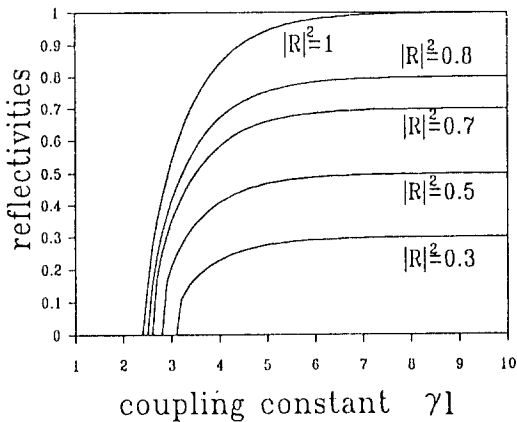


그림 2. 내부반사손실에 따른 위상공액반사도의 결합계수 의존성

Fig. 2. Dependence of phase conjugate reflectivities on the coupling constant with the internal reflection loss.

참조빔 I_{R0} 가 신호빔 I_{S0} 보다 훨씬 큰 세기를 갖는 두 빔 결합의 광세기 패턴은

$$I_0 = I(1 + m \cos Kx) \quad (11)$$

이다. 여기서 $I_0 = I_{R0} + I_{S0}$ 는 광세기합이고, $m = 2/I_{R0}$, I_{S0}/I_0 은 변조지수, $K = 2\pi/\Lambda$ 는 격자 벡터이다. 광세기 패턴에 따라 광여기된 자유 캐리어의 확산과 재결합에 의해 발생하는 공간전하장은¹⁵⁾

$$E_{sc} = \frac{iE_a}{1 + E_a/E_q} \frac{m}{1 + \beta/s/I_0} \quad (12)$$

이다. 여기서 E_q 는 최대공간전하장, E_a 는 확산전하장, β 는 열적이온화율, s 는 광흡수단 면적이다. 결합계수 $\gamma = \pi \Delta_n / \lambda \cos \theta$ 는 공간전하장에 따라 변하는 굴절률 변화 $\Delta_n = 1/2n_0^3 r_{eff} E_{sc}$ (r_{eff} : 유효전기광학계수)로 부터

$$\gamma = \gamma_0 \frac{I_0/I_{\gamma sat}}{1 + I_0/I_{\gamma sat}} \quad (13)$$

의 형태로 표현가능하다. 여기서 γ_0 는 포화결합계수이고, $I_{\gamma sat}$ 은 물질이 갖는 고유상수로 포화결합 광세기값이다. 입사광세기가 $I_{\gamma sat}$ 보다 크면 결합계수는 일정하나, $I_{\gamma sat}$ 이하의 광세기에서는 광세기의 증가에 따라 결합계수가 증가한다. 따라서 광굴절결정의 결합계수가 광세기 의존성을 갖는다.^{11,12)}

광굴절결정이 갖는 흡수계수의 광세기 의존성을 설명하기 위해 기존의 밴드 모델에 제2의 광굴절센터 (secondary photorefractive centers)를 가정한다.^{13,14)} 제 2센터가 밴드 모델에서의 광굴절센터 (primary photorefractive centers) 보다 얇은 에너지 레벨에 위치하면 상온 (room temp.)에서 크게 열적으로 이온화되므로 깊은 에너지 레벨을 갖는 트랩에서 광여기에 의해 발생된 자유 캐리어와 재트랩하여 정착 (population) 한다. 낮은 광세기에서는 적은 수의 자유 캐리어가 제 2센터에서 정착되므로 열적 이온화율이 큰 dark상태에 비해 정상상태의 농도 (concentration)의 변화가 거의 없다. 그러나 광세기가 증가함에 따라 제 1센터에서의 자유 캐리어의 발생율이 높아지고, 제 2센터의 열적 이온화율에 비례하여 제 2트랩에 채워지므로 제 2트랩의 농도가 높아진다. 따라서 높아진 제 2트랩의 농도가 흡수 센터와 작용하여 광세기에 비례하여 흡수계수가 커지다가, 어느 광세기가 넘으면 제 2센터가 모두 채워져 더 이상 흡수계수가 증가하지 않는다. 이때 광굴절결정의 흡수포화가 일어나는 광세기는 흡수단면적, 재결합계수 및 열적 이온화율에 의존한다. 따라서 광굴절결정의 흡수계수도 광세기 의존성을 가지며, 결합계수의 함수형태인

$$\alpha = \alpha_0 \frac{I_0/I_{\alpha sat}}{1 + I_0/I_{\alpha sat}} \quad (14)$$

를 갖는다고 가정한다. 여기서 α_0 는 포화흡수계수이고, $I_{\alpha sat}$ 는 포화흡수 광세기로 물질의 열적 이온화율에 크게 의존하는 상수이다.

앞에서 설명한 광세기에 따른 흡수 및 결합계수의 변화를 고려하여 식(8), 식(9), 식(10)을 다시 풀면 MP-PC의 광세기 의존성을 알 수 있다. 그림에서 알 수

있듯이 한쪽 입사빔 I_{11} 을 고정시키고 입사빔 세기비를 변화시킬 때, 초기 입사빔의 크기에 따라 최대의 위상공액반사도를 생성하는 빔세기비가 달라질 뿐 아니라, 위상공액반사도의 전체 크기가 변한다. 즉 흡수 및 결합계수의 포화치를 갖는 광세기가 다르고 또한 그 포화값이 다르기 때문이다.

6. III. 실험 및 결과고찰

MPPC의 실험에 앞서 두 빔 결합에서의 광세기 의존성에 대해 조사하였다. 실험에 사용된 광굴절결정은 $BaTiO_3$ 단결정으로 $5.6 \times 5.4 \times 5.0mm^2$ 의 크기를 가지며, c-축은 5.6mm를 따라 놓여있다. 두 빔 결합에서 입사각을 20° 로 하고, 신호빔과 참조빔의 세기비(ρ)를 고정시킨 후 두 빔의 세기합(I_0)을 증가시키면서 그때의 신호빔의 이득을 측정하였다. 여러가지 ρ 에 대해 실험한 결과, 그림3과 같은 두 빔 결합에서의 광세기 의존성을 관찰할 수 있었다. 식(13), 식(14)의 결합계수와 흡수계수의 광세기 의존성을 실험 데이터에 도입하여 분석한 결과, 포화계수 $\gamma_0 = 12.4cm^{-1}$, $\alpha_0 = 4cm^{-1}$ 와 포화세기 $I_{\gamma,sat} = 0.15W/cm^2$, $I_{\alpha,sat} = 1.5W/cm^2$ 에서 실험치와 계산치가 가장 잘 맞았다.

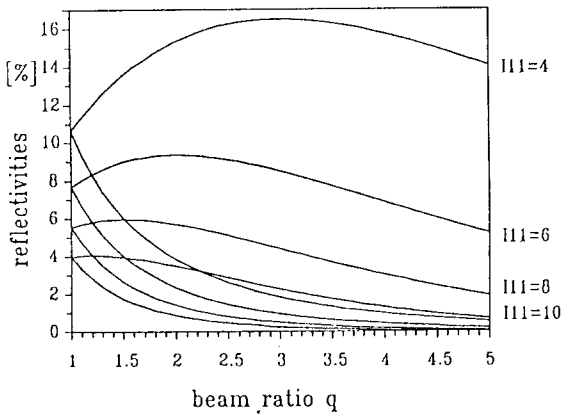


그림 3. 빔세기비에 대한 위상공액반사도의 광세기 의존성

Fig. 3. Intensity dependence of phase conjugate reflectivities on the beam ratio.

그림4는 MPPC를 위한 실험 구성도이다. 실험 구성에서 Ar^+ 레이저로부터 나오는 광원을 광굴절결정 $BaTiO_3$ 의 유효전기광학계수가 크도록 extraordinary ray로 편광을 바꾸고 빔 분할기로 분리한다. 이

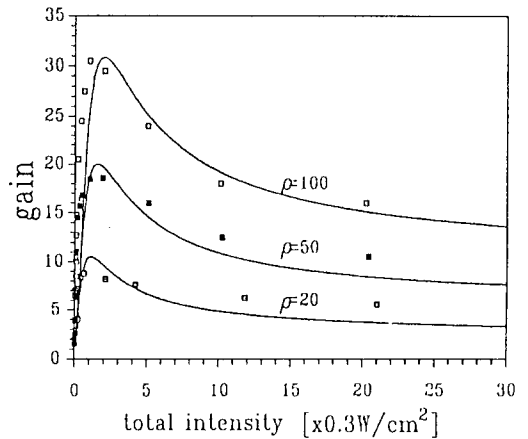


그림 4. 두 빔 결합에서 이득의 광세기 의존성
Fig. 4. Intensity dependent gain on the total intensity in two-beam coupling.

때 두 빔은 서로 인코히런트하도록 충분한 광로차 ($>50cm$)를 두어 초점거리가 30cm인 두개의 렌즈로 각각 결정에 입사시킨다. 결정에서의 spot size는 약 $200\mu m$ 로 2mW는 결정에서 $6W/cm^2$ 의 광세기에 해당한다. 그림5는 두 빔의 입사각 θ 를 27° 로 두고 FLPC에 대해 입사빔 세기비 q를 바꾸어 가면서 위상공액반사도를 측정된 결과이다. 두 빔 결합에서 얻은 포화 광세기값을 이용함으로써, 포화결합계수 $\gamma_0 = 12.8cm^{-1}$, 포화흡수계수 $\alpha_0 = 3.4cm^{-1}$ 일 때, 실험치와 가장 잘 맞았다. 이때 FLPC의 위상공액반사도는 사용하는 광굴절 결정의 종류^[5]와 입사각에 따른 흡수 및 결합계수의 변화에 따라 최대값이 다르다.

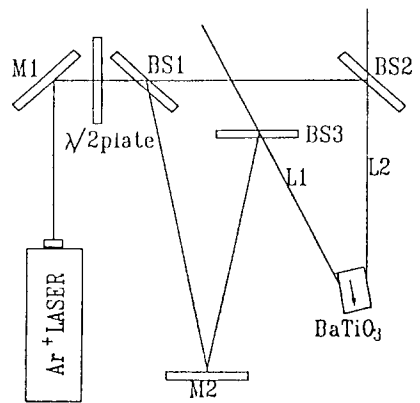


그림 5. FLPC의 실험 구성도
Fig. 5. Experimental set-up of FLPC.

MPPC에서 흡수계수의 광세기 의존성이 위상공액 반사도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 빔세기비를 1로 고정시킨 후, 총입사 빔세기합 I_0 의 변화에 대한 위상공액반사도를 측정하였다. 그림6은 $\theta = 23.5^\circ$, $\theta = 27^\circ$ 일 때의 I_0 와 빔1의 위상공액반사도(PCR1)의 관계로 실선은 앞에서 구한 포화계수와 포화 광세기로 부터 수치적으로 얻은 계산값이다. 그림에서 알 수 있듯이 어느 광세기 이상부터 위상공액 반사도가 낮아지며, 두 빔의 입사각에 따라 그 낮아지는 광세기가 다르다. 그 이유는 결합계수와 흡수계수의 광세기 의존성과, 그 계수값이 포화상태에 이르는 광세기가 다르기 때문이다.

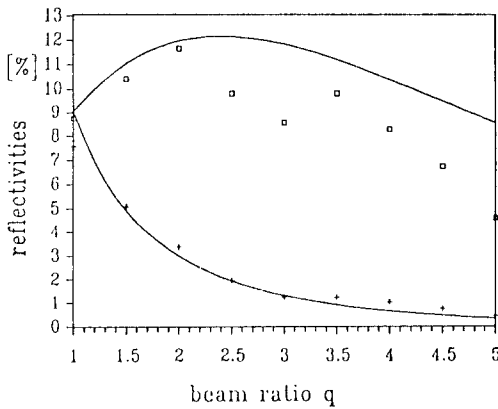


그림 6. 입사각 27° 에서의 빔세기비에 대한 위상공액반사도

Fig. 6. Phase conjugate reflectivities on the beam ratio at $\theta = 27^\circ$.

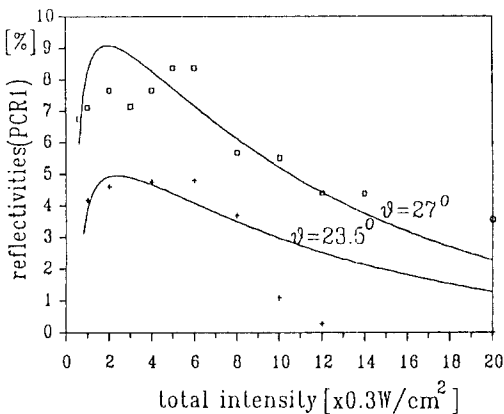


그림 7. 전체 광세기에 대한 위상공액반사도의 광세기 의존성

Fig. 7. Intensity dependence of phase conjugate reflectivities on the total intensity.

IV. 결 론

광세기 의존성을 갖는 결합계수 및 흡수계수를 MPPC에 도입하여 위상공액반사도를 측정하고 분석하였다. 광굴절결정이 갖는 입사 광세기에 따른 결합 및 흡수계수의 포화값과 그때의 총 입사 광 세기는 MPPC에서 뿐 아니라 두 빔 결합, 네 빔 결합에서 중요한 요인이 된다.

본 논문에서는 광세기 의존성을 갖는 결합 및 흡수계수에 따른 위상공액반사도의 변화를 확인하고, 포화 광세기값과 각각의 포화 계수값을 수치적으로 구하였다.

MPPC의 최적 입사각, 빔 세기비와 함께 여러 형태에 대한 연구는 큰 위상공액파의 발생에 중요하며, 광세기 의존성을 갖는 결합 및 흡수계수의 도입은 보다 정확한 분석을 가능케 한다.

MPPC에 대한 연구는 입사빔 세기비에 따른 위상공액반사도의 변화 특성으로 부터 image thresholding, edge enhancement, spatial filtering과 같은 광정보 처리와, 인코히런트한 특성을 이용 가능한 광통신, 그리고 광굴절결정의 제반 특성을 이용한 광배선 및 광교환 등에서 많은 응용이 예상된다.

參 考 文 獻

- [1] J. Shamir, H.J. Caulfield, and M. Hendrickson, "Wavefront conjugation and amplification through distorting media," *Appl. Opt.* 27, 2912(1988)
- [2] S.W. James and R.W. Eason, "Intensity-dependent thresholding and switching in the photorefractive bridge mutually pumped phase conjugator," *Opt. Lett.* 16, 551 (1991).
- [3] M.D. Ewbank, "Mechanism for photorefractive phase conjugation using incoherent beams," *Opt. Lett.*, 13, 47 (1988).
- [4] A.M.C. Smout and R.W. Eason, "Analysis of mutually incoherent beam coupling in $BaTiO_3$," *Opt. Lett.*, 12, 498 (1987).
- [5] M.D. Ewbank, R.A. Vazquez, R.R. Neurgaonkar, and J. Feinberg, "Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate: theory and experiment," *J. Opt. Soc. Am.* B7, 2306 (1990).
- [6] S. Sternklar, S. Weiss, and B. Fischer, "Optical information processing with the double phase conjugate mirror," *Opt. Eng.* 26, 423 (1987).

- [7] S. Weiss, M. Segev, S. Sternklar, and B. Fischer, "Photorefractive dynamic optical interconnects," *Appl. Opt.* 27, 3422 (1988).
- [8] J.E. Ford, S.H. Lee, and Y. Fainman, "Application of photorefractive crystals to optical interconnection," *Proc. SPIE* 1215, 155 (1990).
- [9] R.B. Bylisma, D.H. Olson, and A.M. Glass, "Photochromic gratings is photorefractive materials," *Opt. Lett.* 13, 853 (1988).
- [10] C.H. Kwak, S.Y. Park, H.K. Lee, and E.H. Lee, "Exact solution of two-wave coupling for photorefractive and photochromic gratings in photorefractive materials," *Opt. Commun.* 79, 349 (1990).
- [11] D. Rak, L. Ledoux, and J.H. Huignard, "Two-wave mixing and energy transfer in BaTiO₃ Application to laser beamsteering," *Opt. Commun.* 49, 302 (1984).
- [12] W.H. Liu, Y.S. Qiu, H.J. Zhang, J.H. Dai, P.Y. Wang, L.Y. Xu, "Energy transfer in Sr_{0.56}Ba_{0.44}Nb₂O₆: Ce at 633nm," *Opt. Commun.* 64, 81 (1987).
- [13] A. Motes and J.J. Kim, "Intensity-dependent absorption coefficient in photorefractive BaTiO₃ crystals," *J. Opt. Soc. Am. B4*, 1379 (1987).
- [14] G.A. Brost, R.A. Motes, and J.R. Rotge, "Intensity-dependent absorption and photorefractive effects in barium titanate," *J. Opt. Soc. Am. B5*, 1879 (1988).
- [15] N.V. Kukhtarev, V.M. Markov, S.G. Odulov, M.S. Soskin, and V.L. Vinetskii, "Holographic storage in eleto-optic crystals, L. Steady state," *Ferroelec.* 22, 949 (1979).

 著 者 紹 介



朴 曙 延 (正會員)

1966年 3月 16日生. 1987年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1989年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1989年 2月~현재 한국전자통신연구소 기초기술연구부 연구원. 주관 심분야는 광컴퓨팅, 광신경망, 비선형광학 등임.



金 天 民 (學生會員)

1968年 8月 11日生. 1992年 2月 한국과학기술원 물리학과 학사과정 졸업. 1992年 2月~현재 한국과학기술원 물리학과 석사과정 주관심분야는 홀로그래프, 비선형광학 등임.

郭 鍾 薰 (正會員)

1961年 3月 10日生. 1983年 2月 경북대학교 물리학과 졸업. 1985年 2月 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사). 1988年 2月 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사). 1988年 3月~현재 한국전자통신연구소 기초기술연구부 선임연구원. 주관심분야는 홀로그래프, 비선형광학, 광컴퓨팅 등임.