

BaTiO₃ 단결정에서의 축퇴 4광파 혼합을 이용한 영상복원 및 Edge Enhancement에 관한 연구

(A Study on the Image Reconstruction and Edge Enhancement Using Degenerate Four Wave Mixing in a BaTiO₃ Single Crystal)

吳昌錫*, 李權淵**, 朴漢奎**

(Chang Suk Oh, Kwen Yeon Lee and Han Kyu Park)

要 約

본 논문에서는 광굴절 효과를 갖는 BaTiO₃ 단결정에서의 축퇴 4광파 혼합을 이용한 위상 공액파 발생 및 edge enhancement 효과를 기술하고, BaTiO₃ 단결정에서 위상 공액파 발생 및 왜곡보정 성질을 실험적으로 확인하였다. 또한 축퇴 4광파 혼합 실험 장치를 변형하지 않고 단지 3개 입사파의 광세기를 바꿈으로써 낮은 입사광의 세기 5.38mW/cm²로도 실시간 edge enhancement (처리시간 10초)가 가능함을 보였다.

Abstract

Optical phase conjugate mechanism and edge enhancement by degenerate four wave mixing (DFWM) in photorefractive material are described, and image reconstruction is performed successfully in BaTiO₃ single crystal. Also, the edge enhancement is carried out in the crystal by the same DFWM geometry. But the intensities of three incident beams are inverted. Good quality of edge enhancement is observed in real-time (processing time 10 sec) with low incident light intensity (5.38mW/cm²).

I. 서 론

축퇴 4광파혼합 (degenerated four wave mixing; DFWM)에 의한 위상 공액파 발생은 1971년 B.I. Stepanov¹⁾에 의해 투명한 CS₂ 매질을 사용하여 처음 시작되었고, 1977년 R. W. Hellwarth,²⁾ A. Yariv³⁾

등에 의해 투명한 매질에서의 위상 공액파 발생이 이론적으로 해석되었다. 그 후 D.M. Pepper,⁴⁾ R.W. Hellwarth⁵⁻⁷⁾ 등은 위상 공액파를 이용하여 왜곡된 영상의 복원을 수행하였다.

DFWM은 위상 공액파를 발생시키는 물리적 메커니즘에 따라 비선형 매질내에서 세 입사파가 비선형 편극을 유도하여 위상 공액파를 발생시키는 Kerr 형과 두 입사파가 간섭하여 부피격자를 형성하고 이것에 의해 3번째 입사파가 회절되어 신호파인 위상공액파를 발생시키는 비 Kerr 형으로 분류할 수 있다. 비 Kerr 형 메커니즘에는 광굴절 효과 (Photorefractive effect), 열효과 (Thermal effect), 전기수축

*正會員, 忠北大學校 電子計算機工學科 (Dept. of Computer Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

正會員, *準會員, 延世大學校 電子工學科 (Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1988年 3月 7日

(Electrostriction) 등이 있다.¹⁰⁻¹³⁾

본 연구에서는 Kogelnik의 결합파동 이론을¹⁴⁾ 도입하여 DFWM 현상을 기술하였으며, 광굴절 효과를 갖는 BaTiO₃ 단결정을 사용하여 위상 공액파를 발생시킨 다음 펌프비와 입사각에 따른 위상 공액파의 반사도를 측정하였고, 이를 이용하여 왜곡된 영상의 복원 및 edge enhancement 를 수행하였다.

II. 광굴절 매질내에서의 축퇴 4광파 혼합 이론

광굴절 효과를 갖는 매질에서 DFWM에 의해 발생하는 위상 공액파는 Kerr형 매질에서 일어나는 메카니즘과는 다르기 때문에 이러한 매질에서의 DFWM 이론은 부피격자 (Volume grating) 에 의한 실시간 홀로그래피로 해석한다. 그림 1과 같이 광굴절 매질에 4광파가 동일 주파수 ω 로써 모두 같은 편광 상태로 입사된다고 가정하면 j 번째 빔의 전계 $E_j(\vec{r}, t)$ 는 다음과 같다.^{9),15)}

$$E_j(\vec{r}, t) = A_j(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_j \cdot \vec{r} - \omega t)] + c.c. \quad (1)$$

정상 상태에서 A_j 는 time-independent 이고 그림 1에서 전파 방향은 $\vec{k}_1 = -\vec{k}_2$, $\vec{k}_3 = -\vec{k}_4$ 이다.

일반적으로 굴절률의 홀로그래픽 무늬는 광 간섭 무늬에 대하여 공간 위상차를 갖는다. 따라서 4개의 빔에 의해 유기된 격자의 기본적인 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n = n_0 &+ \frac{n_I e^{i\varphi_I}}{2} \frac{(A_1^* A_4 + A_2^* A_3)}{I_0} \exp(i\vec{k}_I \cdot \vec{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{II} e^{i\varphi_{II}}}{2} \frac{(A_1 A_3^* + A_2^* A_4)}{I_0} \exp(i\vec{k}_{II} \cdot \vec{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{III} e^{i\varphi_{III}}}{2} \frac{(A_1 A_2^*)}{I_0} \exp(i\vec{k}_{III} \cdot \vec{r}) + c.c. \\ &+ \frac{n_{IV} e^{i\varphi_{IV}}}{2} \frac{(A_3^* A_4)}{I_0} \exp(i\vec{k}_{IV} \cdot \vec{r}) + c.c. \quad (2) \end{aligned}$$

$$\text{단, } I_0 = \sum_{j=1}^4 I_j$$

간섭광과 격자 사이의 위상편이 $\psi_I, \psi_{II}, \psi_{III}, \psi_{IV}$ 는 실수이고, $n_I, n_{II}, n_{III}, n_{IV}$ 는 양의 실수이다. 생성된 격자의 위상 정합 조건은 $\vec{k}_I = \vec{k}_4 - \vec{k}_1 = \vec{k}_2 - \vec{k}_3$, $\vec{k}_{II} = \vec{k}_1 - \vec{k}_3 = \vec{k}_4 - \vec{k}_2$, $\vec{k}_{III} = 2\vec{k}_1$, $\vec{k}_{IV} = 2\vec{k}_4$ 이다. 또한 rate equation model¹⁶⁾로부터 식 (2)의 n_I 과 ψ_I 의 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_I &= -\frac{r_{eff} n_0^3 E_p}{2} \left[\frac{E_0^2 + E_a^2}{E_0^2 + (E_a + E_p)^2} \right]^{1/2} \\ \tan \psi_I &= \frac{E_a (E_a + E_p) + E_0^2}{E_0 E_p} \quad (3) \end{aligned}$$

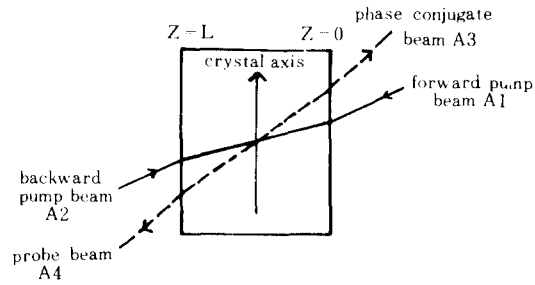


그림 1. 광굴절 매질내에서 위상공액파 발생을 위한 DFWM 구성도.

Fig. 1. DFWM arrangement appropriate to phase conjugation in a photorefractive material.

여기서 n_0 는 상굴절률, r_{eff} 는 유효 광전계 계수, E_0 는 인가된 균일 전계, E_a 는 확산에 의한 전계 그리고 E_p 는 최대 공간 전하에 의한 전계이다. 위상정합 조건과 slowly varying amplitude approximation 을 식 (2)에 대입하면 부피형 격자에서의 결합 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} &= \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3) A_4 - \alpha A_1 \\ \frac{dA_2^*}{dz} &= -\frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3) A_3^* + \alpha A_2^* \\ \frac{dA_3}{dz} &= \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3) A_2 - \alpha A_3 \\ \frac{dA_4^*}{dz} &= \frac{\gamma}{I_0} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3) A_1^* - \alpha A_4^* \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, $\hat{\alpha}, \gamma$ 는 각각 선형 흡수도, 결합 상수이고, 부피형 격자에서의 결합 상수는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{i\omega n_I e^{-i\varphi_I}}{2c \cos \theta} \quad (5)$$

이다. 단지 한 빔만이 강하게 결합된다고 가정하고, 또한 비감쇠 펌프 (즉 $I_1, I_2 \gg I_3, I_4$) 및 $Z=0, Z=L$ 에서의 경계 조건을 적용하면 식 (4)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1(z) &= A_1(0) e^{-\alpha z} \\ A_2(z) &= A_2(L) e^{\alpha z - L} \\ A_3(z) &= -\frac{A_2(L) A_4^*(0) e^{\alpha z - L + \gamma z}}{A_1^*(0)} \frac{J(z)}{J(0) - 1} \\ A_4^*(z) &= -\frac{A_1^*(0) e^{-\alpha z + \gamma z}}{A_2(L)} \left[\frac{J(z) - e^{-\gamma z}}{J(0) - 1} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{단, } J(z) = \int_{\gamma z}^{\gamma L} \frac{\exp(-x) dx}{1 + r e^{-2\hat{\alpha}\gamma} \exp(4\hat{\alpha}x)}$$

펌프비 $r = I_2(L) / I_1(0)$ 이며, 정규화된 선형흡수 $\hat{\alpha} = \alpha / \gamma$ 이고 위상공액 반사도 (phase conjugate reflectivity) 는

$$\rho \equiv \frac{A_3(0)}{A_4^*(0)} = - \frac{A_2(1) J(0) e^{-\alpha l}}{A_1^*(0) J(0) - 1} \quad (7)$$

이다. 식 (6)에서 $A_3(z) \propto A_4^*(0)$ 이므로 A_3 는 입사된 탐사파의 위상공액파이다.

III. 축퇴 4광파 혼합을 이용한 Edge enhancement 이론

Edge enhancement 를 위한 기존의 공간 필터링 기법은 사진 건판 위에 홀로그램을 제작하여야 하기 때문에 실시간 처리가 곤란하다. 그러나, 광굴절 효과를 갖는 매질을 이용하면 결정내에 굴절율의 변화로 인하여 부피격자가 발생되고 여기에 균일한 빛을 쬐이면 기록된 격자가 다시 지워지므로 실시간 처리가 가능하다.

그림 1에서 결정의 C축이 격자 벡터 \vec{k} 와 평행하도록 결정을 정렬시키면 정상 상태에 도달한 후 굴절 격자의 회절효율 R 은 interaction 길이 L 과 변조지수 m 의 제곱에 비례한다.^{(17),(18)}

$$R \propto |Lm|^2 \quad (8)$$

입사되는 A_1 과 A_4 의 편극방향이 같은 경우 변조지수 m 은 다음과 같다.

$$m = \frac{2(I_1 \times I_4)^{1/2}}{I_1 + I_2 + I_4} \quad (9)$$

이때 $I_4 \gg I_1 \gg I_2$ 이면 식 (9)로부터

$$m = 2\sqrt{I_r} / (1 + I_r) \quad (10)$$

단, $I_r = I_4 / I_1$

따라서, 격자의 회절효율 R 은 식 (8), (10)에서 탐사파 A_4 와 전방 펌프파 A_1 의 전체 세기 $I_4 + I_1$ 에 직접 관련되기 보다는 두 빔의 상대세기 I_r 에 관련됨을 알 수 있다.

또한, 탐사파를 공간 Fourier 변환하기 위해 렌즈를 사용하여 결정내에 집속시키면 $I_4(x)$ 는 균일하지 않게 되므로 국부 변조지수 $m(x)$ 는 다음과 같이 된다.

$$m(x) = 2\sqrt{I'_r} / (1 + I'_r) \quad (11)$$

여기서 $I'_r = I_4(x) / I_1$ 이다.

Fourier 변환된 탐사파의 저주파 성분은 중심에 위치하게 되므로 전방 펌프파의 세기 I_1 보다 훨씬 크다. 따라서, $I_4(x) \gg I_1$ 이므로 식 (8), (11)로부터 $m(x)$

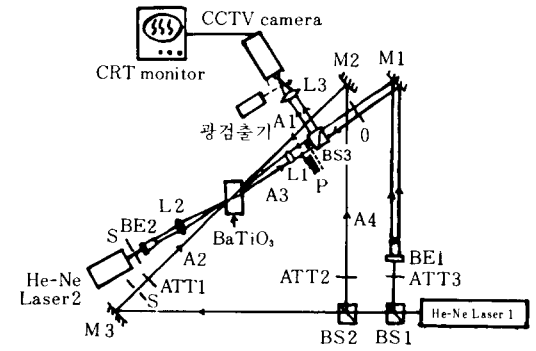
$\ll 1$ 이고 회절효율이 적은 국부 격자가 형성된다. 그러나, 중심에서 벗어난 곳에 위치하는 고주파 성분의 세기는 미약하므로 I_1 의 세기와 거의 같게 되어 $m=1$ 인 최대 변조 지수로써 회절효율이 큰 격자가 형성된다. 따라서, 입사된 영상의 저주파 성분은 감쇄되지만 가장자리에 해당하는 고주파 성분은 보강되는 현상을 나타내므로 edge enhancement 가 가능하다.⁽¹⁹⁾

또한, 집속된 탐사파가 결정내에서 전방 펌프파와 초점거리에서 정확히 교차하지 않더라도 위의 경우와 유사한 결과가 된다.

IV. 실험 및 결과 고찰

그림 2는 DFWM 을 이용하여 위상 공액파를 발생시키는 실험 구성도이다. 실험에 사용된 BaTiO₃ 단결정의 크기는 7.8×5.5×5.1mm (Sanders Co. 제작) 이고 외부 전압은 인가하지 않았다. 본 실험에서는 영상의 기록 및 소거용 광원으로 각각 5.38 mW, 2mW 출력의 He-Ne 레이저 1, 2를 사용하였다. 이 광속을 빔 분할기 BS1과 BS2를 이용하여 A_1, A_2, A_4 로 분할한 다음 전방 펌프파 A_1 과 후방 펌프파 A_2 를 각각 거울 M_2, M_3 를 사용해서 반사시킨다. 그리고 탐사파 A_4 는 빔 분할기 BS3를 거쳐 A_1 과 2θ 의 각도로 BaTiO₃ 결정에 입사시켰다. 여기서, A_1, A_2, A_4 는 BaTiO₃ 단결정내에서 위상 정합 조건이 만족되도록 입사되어야 한다.

I_4 와 I_1 을 각각 0.162 mW/cm², 0.406 mW/cm² 로 고정시키고 I_2 의 강도 변화에 따른 위상 공액 반사



- P : Phase aberrator
- M : Mirror
- S : Shutter
- O : Object
- BS : Beam splitter
- L : Lens
- BE : Beam expander
- ATT : Attenuator

그림 2. 전체 실험 구성도
Fig. 2. Experimental Set-up.

도 ρ 를 그림 3에 나타내었다. 이때 2θ 는 12° 격자 간격은 $3.03\mu\text{m}$ 이고 결정의 C축은 격자 벡터 k 와 수직으로 정렬시켰으며, 발생된 위상 공액파는 렌즈 L3을 거쳐 광 검출기로 측정하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 펌프비 γ 이 1근방에서 공액파의 최대 반사가 이루어지며, γ 이 증가하거나 감소할 때 위상 공액 반사도는 작아진다. 따라서 위상공액파의 반사도에 대한 이론치(식 7)와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

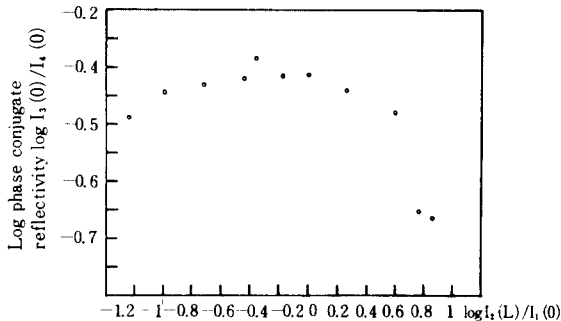


그림 3. BaTiO₃ 단결정에서 펌프비의 변화에 따른 위상공액 반사도

Fig. 3. Phase conjugate reflectivity as a function of pump ratio $I_2(L)/I_1(0)$ in BaTiO₃ single crystal.

전방 펌프파와 후방 펌프파의 세기가 동일한 경우 위상 공액파의 반사도가 최대이기 때문에 세 입사빔의 세기를 각각 $I_1=I_2=0.702\text{mW}/\text{cm}^2$, $I_4=63.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 로 고정한 다음 A_1 과 A_4 의 교각 2θ 에 따른 위상공액 반사도를 측정한 값을 그림 4에 나타내었다. 탐사파와 전방 펌프파의 교각이 12° 근처에서 최대 공액 반사도를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 근거로 입사빔의 세기를 각각 $I_1=I_2=0.702\text{mW}/\text{cm}^2$, $I_4=63.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 입사각을 12° 로 설정하여 위상 공액파의 왜곡 보정 성질을 관측하기 위해 사진 1(a)의 광속을 위상 왜곡 매질(Phase aberrator)에 통과시켜 사진 1(b)와 같이 왜곡시킨 후 결정에 입사시켰다. 사진 1(c)는 탐사파의 위상 공액파로서 시간 반전된 복원 영상을 스크린을 통해서 촬영한 사진이다. 또한, 동일한 조건하에서 탐사파 A_4 의 경로에 입력 영상으로 "OPTC"를 위치시켰을 때 원래의 영상을 사진 2(a)에 나타내었고, 사진 2(c)는 위상 교란 매질을 통과시킨 후 일그러진 입력(사진 2(b))이 복원된 출력 영상이다.

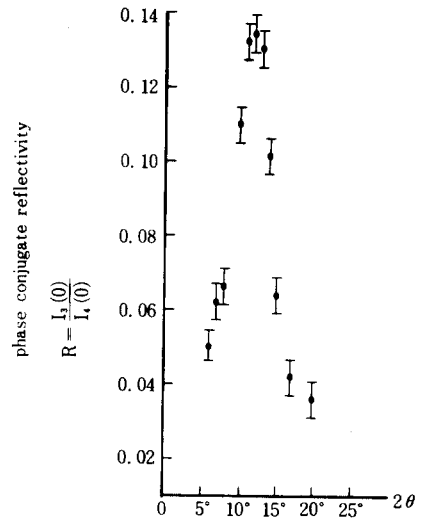
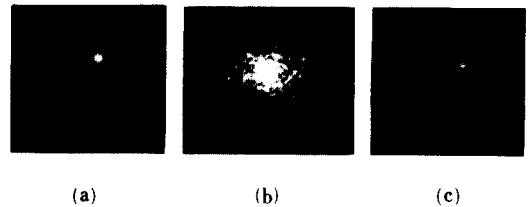


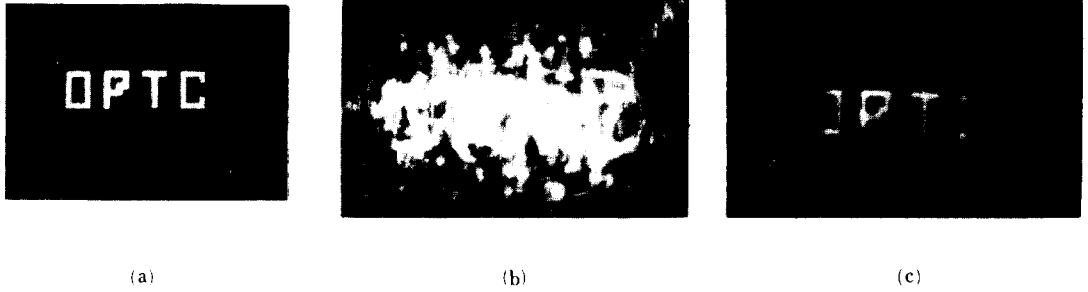
그림 4. 교각 2θ 에 따른 위상 공액 반사도 측정
Fig. 4. Phase conjugate reflectivity R versus the crossing angle 2θ .



사 진 1. (a) 레이저 빔 (b) 왜곡된 빔
(c) 위상공액 빔

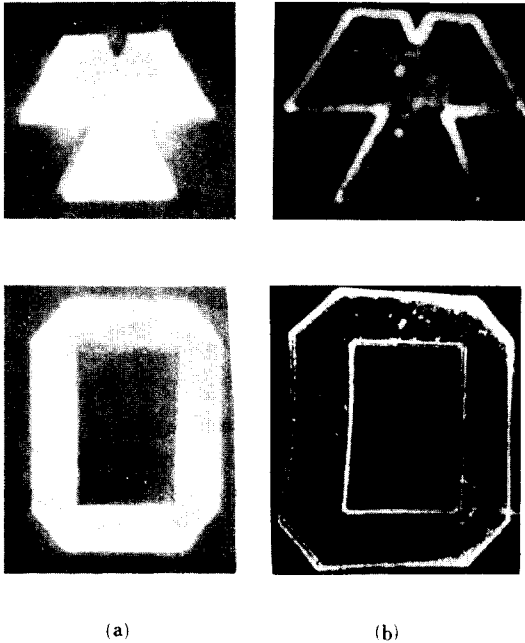
Photo. 1. (a) Laser beam, (b) distorted beam, (c) phase conjugate beam.

또한 입력된 영상의 edge enhancement를 수행하기 위하여 그림 2와 같은 DFWM 시스템을 변형시키지 않고 입사빔의 세기만을 반전시키기 위해 3개의 빔 감쇄기(ATT)를 사용하였다. 그리고, 소거빔 He-Ne 레이저 2를 사용해서 BaTiO₃ 결정에 10초간 균일하게 조사함으로써 실시간 처리가 가능하게 하였다. 이때 탐사파 A_4 와 전방 펌프파 A_1 의 교각은 12° 이며, 전방 펌프파 및 탐사파의 강도를 각각 $I_1=0.092\text{mW}/\text{cm}^2$, $I_4=1.20\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 하였고 $I_2 \ll I_1 \ll I_4$ 의 조건이 만족되도록 후방 펌프파의 강도를 작게 하였다. 사진 3(a)의 영상을 렌즈에 의해 Fourier 변환시켜 결정에 입사시킨 후 edge enhancement 된 출력 영상



사 진 2. (a) 원래의 영상 (b) 왜곡된 영상 (c) 복원된 영상
 Photo.2. (a) original image, (b) distorted image, (c) reconstructed image.

(사진3(b))을 CCTV 카메라를 통해 CRT monitor로 관측하였다. 물체의 가장자리가 중앙부보다 약 14dB 정도 증강되었으며, 사진 3 과 같이 미세한 영상에 대해서도 edge enhancement가 효과적으로 수행되었다.



사 진 3. (a) 입력 영상 (b) edge 증강된 출력영상
 Photo.3. (a) input image, (b) edge enhanced output image.

V. 결 론

본 논문에서는 Kogelnik의 결합 파동이론을 도입하여 DFWM 현상에 대하여 기술하였으며, BaTiO₃ 단결정을 이용하여 위상 공액파를 발생시킨 결과 펄프비에 따른 위상 공액 반사도가 이론치와 거의 일치하였다. 탐사파와 전방 펄프파와의 교각을 12°로 하여 왜곡보정 성질을 실험한 결과 왜곡된 입력영상이 원래대로 재생되었다. 또한 DFWM실험 장치를 변형시키지 않고 단지 입사빔의 세기만을 바꿈으로써 입력된 영상의 edge를 증강시키는 효과를 얻을 수 있었고, 별도의 소거빔을 사용하여 형성된 격자를 지우므로써 약 10초 정도의 실시간 처리가 가능하였다. 앞으로 BaTiO₃ 결정을 이용한 실시간 영상 처리 및 실시간 홀로그래프 연상 메모리 광 컴퓨터 등의 응용에 많은 연구가 되어야 하겠다.

參 考 文 獻

- [1] B.I. Stepanov, E.V. Ivakin, A.S. Rubanov, *Sov. Phy. Doki.*, 16, 1971.
- [2] R.W. Hellwarth, *J. Opt. Soc. Am.*, 67, 1, 1977.
- [3] A. Yariv and D.M. Pepper, *J. Opt. Lett.*, 1, 16, 1977.
- [4] D.M. Pepper et al, *Appl. Phys. Lett.*, 32, 635, 1978.
- [5] R.W. Hellwarth, *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 1050, 1978.
- [6] 박일홍, 허세현, 김은수, 양인웅, 대한 전자공학회 추계 종합 학술대회 논문집, 8,2,310, 1985.

- [7] 임승찬, 신상영, 대한 전자 공학회 추계 종합 학술대회 논문집, 8,2,300,1985.
- [8] J. Feinberg et al, *J. Appl. Phys.*, 51, 1297, 1980.
- [9] M. Cronin-Golomb et al, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-20, 1, 12, 1984.
- [10] D.M. Pepper, *Opt. Eng.*, 21, 156, 1982.
- [11] D.L. Staebler, J.J. Amode, *J. Appl. Phys.*, 43, 1042, 1972.
- [12] D.W. Vahey, *J. Appl. Phys.*, 46, 5208, 1975.
- [13] R.A. Fisher, Academic Press, 417, New York, 1983.
- [14] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, 48, 2909, 1969.
- [15] B. Fischer et al, *Opt. Lett.*, 6, 519, 1981.
- [16] N.V. Kukhtarev, et al, *Ferroelectrics*, 22, 949, 1979.
- [17] J. Feinberg, *Opt. Lett.*, 59, 330, 1980.
- [18] N.A. Vainos, R.W. Eason, *Opt. Com.*, 59, 167, 1986.
- [19] 오창석, 이권연, 박한규, 대한 전자 공학회 파동 및 레이저 학술 발표회 논문집, 3,113, 1988.