

축퇴 4 광파 혼합에 의한 광섬유에서의 광영상 직접전송에 관한 연구

(A Study on the One-way Optical Image Transmission Through
Optical Fiber by Degenerate Four Wave Mixing)

安秉求*, 李禹相*, 金恩洙*, 楊仁應*

(Byung Koo Ahn, Woo Sang Lee, Eun Soo Kim and In Eung Yang)

要 約

본 논문에서는 BSO 단결정을 사용한 축퇴 4 광파혼합에서 위상공액파를 이용하여 단일 광섬유에서 광영상의 직접전송에 관한 이론적 분석과 실험을 하였다. 이론적 분석 결과 BSO 단결정의 위상공액파 회절효율은 인가된 전장의 세기, 결정내에 형성된 회절격자 주기 및 각광파의 강도비에 크게 의존하였으며 이는 실험적 결과와도 일치하였다. 그리고 본 실험에서 최적의 조건으로 외부전장을 5kV/cm , 회절격자 주기를 $3\mu\text{m}$ 로 하고 신호파 대(對) 후방펌프파의 강도비를 2.7로 하여 전형적인 축퇴 4 광파 혼합시스템을 구성하고 후방펌프파에 광영상을 실어보내는 one-way 전송방식을 사용하여 광섬유를 통한 광영상의 직접전송을 실현하였다.

Abstract

In this paper, the theory and experiments on the one-way optical image transmission through optical fiber by using degenerate four wave mixing in BSO single crystal are demonstrated.

From the theoretical analysis, the diffraction efficiency of phase conjugate wave in BSO single crystal is greatly dependent on applied electric field intensity, diffraction grating period formed in the crystal and incident beam ratio, those are also in good agreement with the experimental results. Based on the experimental results, we have arranged the typical degenerate four wave mixing system in the optimal conditions (applied electric field, $E = 5\text{kV/cm}$; diffraction grating period, $3\mu\text{m}$; beam ratio of backward pump wave versus signal wave, 2.7) and realized one-way optical image transmission system through optical fiber using BSO single crystal.

I. 서 론

최근 비선형 광학 분야에서 광위상 공액 (Optical

Phase Conjugation)이라는 새로운 기술의 출현으로 광을 포함한 모든 전자파 정보의 실시간 처리가 가능하게 되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1]

광위상 공액이란 비선형적 광학 현상을 이용하여 임의의 전자파의 위상을 정확히 반전시키는 기술로

*正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kwang Woon Univ.)

接受日字：1986年 12月 22日

서 위상공액파는 입사시의 파의 진행로를 정확히 되돌아 가는 성질 때문에 시반전파(time-reversal wave)라고도 하는데 이러한 성질을 이용하여 왜곡 보상,^[2] 광정보 처리,^[3] 비선형 레이저 분광학,^[4] 실시간 광영상 처리^[5] 등 여러분야에 응용되고 있으며, 특히 최근에는 광섬유를 통한 광영상의 직접 전송에 관한 연구가 시도되고 있다.

일반적으로 광섬유를 통한 광영상의 전송은 광섬유의 모드 분산에 의한 왜곡 현상 때문에 직접 전송이 불가능하나, 최근 개발된 광위상 공액 기술에 의한, 광섬유의 광영상 왜곡 보상이 시도되고 있다.

1976년 A. Yariv^[6] 처음으로 광위상 공액에 의한 광섬유에서 모드 분산 보상 가능성을 이론적으로 분석한 이후 1982년 Dunning^[7] 등은 광굴절매질(photorefractive material)인 BaTiO₃를 비선형 매질로 사용하여 실험하였으나, 신호파에 광영상을 실어 보내 상의 왜곡을 보상하는 전형적인 축퇴 4 광파 혼합 실험에서는 광영상이 왜곡파를 두번 통과 할 때 왜곡이 보상되므로 광섬유를 통한 광영상 전송에는 응용할 수 없었다.

그후 1982년 A. Yariv^[8]는 후방 펌프파에 정보를 실어 보냄으로써 왜곡파를 통한 광영상 전송이 가능한 one-way 방식에 관한 이론을 제시하였고, 1982, 1985년에 Fischer^[9,10] 등이 BaTiO₃를 비선형 매질로 사용하여 실험하였다.

그러나 지금까지 사용된 비선형 매질인 BaTiO₃ 단 결정은 반사도가 커서 낮은 입력 강도에서도 사용 가능한 장점이 있지만, 응답 속도가 느리고, 온도에 따른 상전이 성질 때문에 실제 응용에서는 커다란 문제점을 가지고 있다.^[11] 따라서 본 논문에서는 광감도가 좋고 응답 시간이 빠르며, 온도나 습도에 따른 결정의 상태 변화가 적은 Bi₁₂SiO₂₀ 단결정을 사용하여 단일 광섬유를 통한 one-way 광영상 전송에 관한 이론적 해석과 실험에 대해 논하고자 한다.

II. 이론

1. 위상 공액파 발생

광굴절 매질내에서 축퇴 4 광파 혼합에 의한 광위상 공액파 발생은 일반적으로 기존 흔로그램에서 기록과 재생이 동시에 이루어지는 실시간 흔로그램으로 설명할 수 있다. 이러한 광굴절 매질에 의한 실시간 흔로그램에는 매질내에 회절격자를 형성시키기 위해 입사되는 간섭파사이의 각도와, 가간섭 거리에 밀접하게 관련하여 반사형 흔로그램(reflection type hologram)과 투과형 흔로그램(transmission type holo-

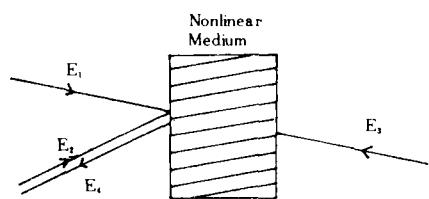


그림 1. 투과형 흔로그램

Fig. 1. Transmission type hologram.

gram)으로 나누어 지는데 일반적으로 광영상 전송시 투과형 흔로그램이 사용된다.

그림 1은 투과형 흔로그램을 나타낸 그림으로 전방 펌프파 E_1 과 신호파 E_2 를 서로 간섭시키고, 후방 펌프파 E_3 는 비간섭성을 부여하여 E_2 와 E_3 는 간섭이 이루어지지 않도록 함으로써 매질내에 신호파 E_2 와 전방 펌프파 E_1 에 의한 회절격자가 형성되고 동시에 후방 펌프파 E_3 가 회절격자에서 회절하여 위상공액파 E_4 가 발생하게 된다.^[5] 즉, 두개의 간섭파(coherent wave)와 하나의 비간섭파가 동시에 광굴절 매질에 입사되어 위상 공액파가 발생하는 전형적인 축퇴 4 광파 혼합(degenerate four wave mixing; DFWM)을 살펴보면 그림 1에서 축퇴 4 광파 혼합에 관련된 광파는

$$\begin{aligned} E_1 &= 1/2 A_1 \exp(i(wt - \mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r})) + C.C (\text{전방 펌프파}) \\ E_2 &= 1/2 A_2 \exp(i(wt - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r})) + C.C (\text{신호파}) \\ E_3 &= 1/2 A_3 \exp(i(wt - \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{r})) + C.C (\text{후방 펌프파}) \\ E_4 &= 1/2 A_4 \exp(i(wt - \mathbf{K}_4 \cdot \mathbf{r})) + C.C (\text{위상공액파}) \end{aligned} \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 4개의 파가 모두 같은 주파수(ω)로 축퇴되고, 전후방 펌프파 및 신호파, 위상 공액파는 각각, 동일 선상에서 서로 정반대 방향으로 진행하므로 전파 벡터는 $\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_3 = 0$, $\mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_4 = 0$ 임을 알 수 있다.

축퇴 4 광파 혼합에 의한 투과형 흔로그램에서 전방 펌프파(E_1)와 신호파(E_2)의 간섭에 의해 형성된 회절격자를 흔로그램의 투과함수(transmission function)로 나타내면

$$\begin{aligned} T\alpha |E_1 + E_2|^2 &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* \exp(i(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{r}) + A_2 A_1^* \exp(i(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 주어진다.

따라서 E_1, E_2 와 비간섭적인 후방 펌프파 E_3 는 식

(2)와 같은 투과함수를 갖는 회절격자에 의해 회절되어 신호파 E_1 가 위상공액된 E_4 를 발생시키게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} E_4 &= TE_1 \alpha (|A_1|^2 + |A_2|^2) A_3 + A_1 A_3 A_2^* \exp(i(2\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{r}) \\ &\quad + A_1 A_3 A_2^* \exp(i\mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 표현된다.

윗식에서 첫 항은 A_3 에 비례하는 일정한 양으로 위상 공액파와는 무관한 항이며, 둘째항은 위상 부정합(phase mismatch)에 의해 두꺼운 홀로그램(thick hologram)에서는 방출되지 못하므로, 결국 축퇴 4 광파혼합에 의해 매질에서 회절된 출력은

$$E_4 \alpha A_1 A_3 A_2^* \exp(i\mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}) = A_1 A_3 A_2^* \exp(-i\mathbf{K}_4 \cdot \mathbf{r}) \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 윗식에서 보면 투과형 홀로그램의 회절격자에서 회절된 파인 E_4 는 신호파 E_1 의 위상이 복소 공액되어 ($\mathbf{K}_2 = -\mathbf{K}_4$) 입사시의 신호파의 경로를 정확히 되돌아 가는 위상 공액파의 성질을 갖는다.

2. One-way 광영상 전송이론

신호파에 광영상을 실어보내 상의 왜곡을 보상하는 전형적인 축퇴 4 광파혼합은 그림 2와 같이 광속분리기 BS 3에서 두개의 파로 나누어져서 하나는 후방 펌프파(E_3)로, 다른 한 파는 광속분리기 BS 1에서 전방 펌프파(E_1)와 신호파(E_2)로 나누어진다. 광 영상을 신호파 진행선상인 P_1 에 위치시키므로 광굴절 매질에서 축퇴 4 광파 혼합에 의해 발생한 신호파가 위상 공액된 위상 공액파는 광섬유를 다시 통과하여 왜곡을 보상하게 된다. 따라서 광영상이 왜곡파를 두번 통과 할 때 왜곡이 보상되므로 광영상 직접 전송에는 응용할 수 없다. 그러나 후방 펌프파에 광영상을 실어 보내므로서 왜곡이 존재하는 경로

를 통해서 상 전송이 가능하다. 즉, one-way 영상전송은 그림 2에서 영상을 P_1 에 놓는 대신 후방 펌프파 E_3 의 진행선상인 P_1' 에 놓게된다. 그러므로 비선형 매질에 입사되는 신호파 E_2 는 단지 왜곡 정보만을 갖게되고 후방 펌프파 E_3 에 영상 정보가 실리게 되며, 축퇴 4 광파혼합에 의해 비선형 매질에서 발생하는 위상 공액파가 광섬유를 한번 통과할 때의 왜곡 정보에 의해 전체 왜곡 정보는 제거되고 복원된 영상 정보만을 얻게된다.

광파의 진폭(A) 만을 고려하여 그림 2와 같은 one-way 전송방법을 고찰하면 다음과 같다.^[9]

즉, 비선형 매질의 중심을 나타내는 점 Q에서의 신호파 A_2 는

$$A_2(Q) \alpha A(Q') = A_2 \exp(i\Phi(Q')) \quad (5)$$

로서 나타낼 수 있다. 이때 $\Phi(Q')$ 는 신호파 A_2 가 광섬유로 입사되어 진행할 때 점 Q' 에서의 위상 지연을 의미한다. 그리고 비선형 매질내에서의 축퇴 4 광파 혼합에 의한 위상 공액파의 근원이 되는 비선형 분극을 표현하면

$$P(Q) \alpha A_1 A_3(Q) (A_2(Q'))^* = A_1 A_3(Q) A_2^* \exp(-i\Phi(Q')) \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

광섬유를 통과해서 Q'' 에서 위상 공액파 A_4 는

$$\begin{aligned} A_4(Q'') &= A_2^*(Q') \exp((i\Phi(Q')) \alpha A_1 A_3(Q) A_2^* \\ &\quad \exp(-i(\Phi(Q') - \Phi(Q''))) \end{aligned} \quad (7)$$

이고, 따라서 $A_4(Q'') \alpha A_1 A_3(Q) A_2^*$ 이다. $A_1 A_2^*$ 는 영상 정보와 상관없는 상수이므로 Q'' 에서의 위상 공액파 A_4 는 광영상 정보 $A_3(Q)$ 를 포함하여 단일 방향으로 광섬유를 통한 왜곡 보상과 동시에 전송이 가능하게 된다.

3. 광굴절 매질의 회절효율

일반적으로 광굴절 매질에서 축퇴 4 광파 혼합에 의한 위상 공액파 발생의 기본 매카니즘은 광굴절 매질내에서 광전하의 확산과 표동에 의해 발생하는 전장에 따라 형성되는 광굴절을 변화 효과로 설명할 수 있으며 광굴절을 변화로 형성된 회절격자에서 회절되어 발생하는 위상 공액파의 회절 효율은 입사된 신호파와 축퇴 4 광파 혼합에 의해 발생된 위상 공액파의 강도비로 정의되며 실험에 관련된 여러 파라미터 즉, 광굴절 매질에 인가되는 외부 전장, 회절격자 주기 및 각파의 강도비등에 크게 의존한다.

따라서 외부 전장이 가해질 때와 가해지지 않을 때에

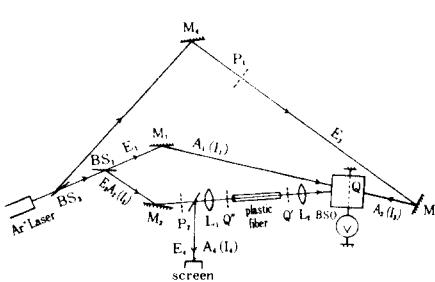


그림 2. 단일 방향 광영상 전송 시스템
Fig. 2. Experimental system of one-way optical image transmission.

대해 위상 공액파 회절 효율에 대한 Kukhtarev의 이론적 결과를 정리 해보면 다음과 같다.^[14] 먼저 외부 전장이 가해지지 않은 경우 즉, 확산이 지배적인 경우의 위상 공액파 회절 효율은

$$\eta = R (A^2 \Lambda^{-2}) / (1 + (A/B) \Lambda^{-2})^2 * (4n^2 \Lambda^2) / (4n\Lambda^2 - \lambda^2) \quad (8)$$

와 같이 주어진다.

위 식에서 n 은 광굴절매질의 굴절율이고, λ 는 광원의 파장, R 은 상수이다. 그리고 외부전장을 가한 경우 즉, 표동이 지배적인 경우 회절 효율은

$$\eta = RE_\theta^2 / (1 + B^{-2} E_\theta^2 \Lambda^{-2}) * (4n^2 \Lambda^2) / (4n^2 \Lambda^2 - \lambda^2) \quad (9)$$

와 같이 주어진다.

(8), (9)식에서 $E_T = A\Lambda^{-1}$, $A = (2\pi kT)/e$, $E_\theta = BA$, $B = 2eN/\epsilon_0 \epsilon_r$ 로 주어지며 E_T 는 확산에 의해 형성된 전장이고 E_θ 는 공간 체적전하에 의해 형성된 최대 전장을 나타낸다. 그리고 K 는 Boltzman 상수, T 는 절대온도, ϵ_r 는 광굴절매질의 비유전율, ϵ_0 는 진공의 유전율, N 은 광굴절매질의 트랩수를 나타낸다.

(8), (9)식에서 외부 전장을 가하지 않은 경우 ($E_0 = 0 \text{ kV/cm}$) 회절격자 주기가 $\Lambda > 1 \mu\text{m}$ 이면 $E_\theta > E_T$ 가 되어 회절 효율은 Λ^{-2} 에 비례하게 되어 회절 격자 주기가 증가함에 따라 급격히 감소하여 약 $\Lambda = 3 \mu\text{m}$ 이상에서는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 확산에 의한 전자의 이동거리가 짧아서 그 이상되는 회절격자 주기에 대해서는 전자의 이동도가 떨어져서 나타나는 현상으로 분석된다.

한편 외부 전장을 가한 경우 ($E_0 \neq 0 \text{ kV/cm}$) 일 때는 (8)식에서 알 수 있는 바와 같이 외부전장 (E_0)와 회절격자 주기 (Λ)에 의해 회절 효율이 크게 의존하게 된다. 즉, 외부 전장의 세기와 회절 격자 주기가 증가함에 따라 효율이 향상되는 것을 알 수 있으며, 이는 외부전장의 세기를 증가시킴에 따라 확산에 의한 전자의 이동보다 표동에 의한 전자의 이동이 더욱 증가하여 이에 의한 광굴절 매질내의 미소굴절율 변화가 크게 나타나 위상 공액파 회절효율이 증가한 현상이다. 그리고 일정한 외부전장에 대해서 회절격자 주기가 $3 \mu\text{m}$ 이상 되면 회절효율은 포화상태가 되어 회절격자 주기에 의존하지 않게되는데 이는 광굴절 매질내의 트랩에서 광에 의해 여기되는 전자의 수와 트랩에 재포획 되는 전자의 수가 같아지므로 더 이상 미소굴절율 변화가 나타나지 않아 회절효율이 포화되는 현상이다.^[15]

III. 실험 및 결과고찰

1. 위상공액파의 회절 효율측정

광섬유를 통한 효과적인 광영상 전송시 최적의 위상공액파 회절효율을 얻기 위하여 이론적인 분석을 토대로 광굴절매질의 회절효율을 결정하는 주요 파라미터인 회절 격자주기, 매질에 입사하는 각 광파의 강도비, 그리고 외부전장등의 변화에 따른 위상공액파 회절효율을 측정하였다.

본 실험에서는 514.5nm 파장의 Ar^+ 이온 레이저를 사용하고 광굴절 매질로는 크기가 $10 * 10 * 10\text{mm}^3$ 인 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 단결정을 사용하였다.

그림 3은 위상공액파 회절효율을 측정하기 위한 실험구성도로서 광속분리기 BS_1 에 의해 기준파 (I_1)과 탐사파 (I_2)로 나누어 지고 BSO 단결정에서 회절되는 위상공액파를 연속적으로 관찰하기 위해 그림과 같이 반사경 (M_3)을 사용하여 기준파를 되반사시켰다. 간섭되는 두 광파의 강도는 $I_1 = 6\text{mW/cm}^2$, $I_2 = 14\text{mW/cm}^2$ 로 하고 회절 격자주기는 $\Lambda = 0, 3, 5(\mu\text{m})$, 외부전장은 $E_0 = 0, 3, 5(\text{kV/cm})$ 로 각각 변화시키면서 BSO 단결정의 위상공액파 회절효율을 측정하였으며 그 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 외부전장을 가하지 않은 경우 이론적인 결과에 의하면 회절 격자 주기가 $3\mu\text{m}$ 이상에서는 거의 없어지게 되는데, 이는 확산에 의한 전자의 이동거리가 짧아서 그 이상이 되는 회절격자 주기에 대해서는 전자의 이동도가 떨어져서 나타나는 현상으로, 본 실험에서도 $\Lambda = 1.5\mu\text{m}$ 에서 $\eta \approx 0.1 \times 10^{-3}$, $\Lambda = 3\mu\text{m}$ 에서 $\eta \approx 0.02 \times 10^{-3}$, $\Lambda = 5\mu\text{m}$ 에서는 $\eta \approx 0$ 로 나타나 이론치와 같은 결과를 얻었다.

외부전장을 가한 경우는 이와는 반대로 회절격자 주기가 증가함에 따라 회절효율이 증가되었으며 외부전장이 클수록 그 현상이 크게 나타났다.

즉, 외부전장이 3kV/cm 인 경우 회절격자 주기가

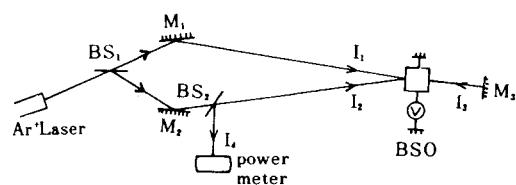


그림 3. 위상 공액파의 회절효율 측정을 위한 실험 구성도 (I)

Fig. 3. Experimental set-up (I) for diffraction efficiency measurement of phase conjugate wave.

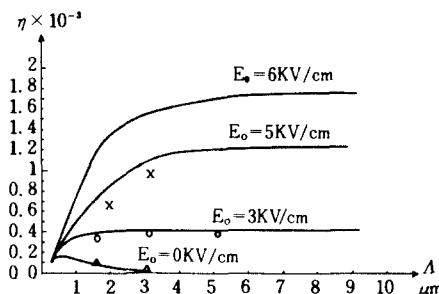


그림 4. 간섭무늬 간격과 외부전장에 따른 위상공액파의 회절효율(x, ○, △; 실험치, - 이론치)

Fig. 4. Diffraction efficiency versus fringe spacing for different values of applied field.
(x, ○, △; experimental values, - ; theoretical values).

$\Lambda = 1.5, 3, 5 (\mu\text{m})$ 에서 회절효율은 $\eta = 0.33 \times 10^{-3}, 0.38 \times 10^{-3}, 0.38 \times 10^{-3}$ 으로 각각 나타났으며 외부전장이 5kV/cm 인 경우는 같은 회절격자 주기에서 $\eta = 0.7 \times 10^{-3}, 1.1 \times 10^{-3}, 1.2 \times 10^{-3}$ 으로 각각 나타났다. 이는 외부전장(E_0)을 증가시킴에 따라 확산에 의한 전자의 이동보다 표동에 의한 전자의 이동이 더욱 증가하여 BSO단결정내의 미소굴절율 변화가 크게 나타나게 되어 위상공액파 회절효율이 증가한 현상이다.

이같은 결과는 Kukhtarev,^[13] Huignard^[14]의 이론 및 실험적 결과와도 일치하는 것으로 간섭무늬 간격이 $3 \mu\text{m}$ 이상이 되면 더이상 회절효율이 증가하지 않게 되는데 이를 포화상태라고 하며 이런 현상은 트랩에서 광에 의해 여기되는 전자의 수와 트랩에 재포획되는 전자의 수가 같아지므로 더이상 미소굴절율 변화를 일으키지 않기 때문이다.

단일 방향 영상전송 실험이 후방 펌프파에 광 영상을 실어 보내므로 그림 5와 같이 광속 분리기 BS₃, BS₁을 이용하여 I_3 증가에 따른 회절효율변화를 실험하였다. 이때 각 광파의 강도는 $I_1 = 6 \text{ mW/cm}^2, I_2 = 14 \text{ mW/cm}^2, I_3 = 18 \text{ mW/cm}^2$ 와 36 mW/cm^2 로 각각 변화 시켰으며 측정된 결과는 그림 6과 같다. 그림 6과 같이 I_3 가 증가함에 따라 회절효율이 증가함을 알 수 있으나 I_3 가 어느정도 이상 증가되면 BSO 단결정 내부의 격자들 사이의 열적 에너지에 의한 회절 격자의 지위점이 커서 오히려 위상공액파의 회절효율이 감소하게 될 것으로 기대된다.^[15]

2. one-way 광영상 전송실험.

BSO 단결정의 위상공액파 회절효율에 대한 이론

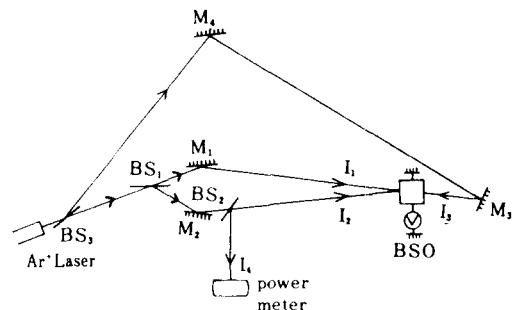


그림 5. 위상 공액파의 회절효율 측정을 위한 실험 구성도(II)

Fig. 5. Experimental set-up (II) for diffraction efficiency measurement of phase conjugate wave.

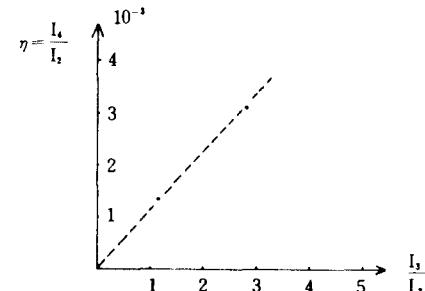


그림 6. I_3/I_2 에 대한 위상 공액파의 회절효율 (·; 실험치)

Fig. 6. Diffraction efficiency for intensity ratio I_3/I_2 . (·; experimental data).

및 실험결과를 토대로 본 논문에서는 그림 2와 같이 광섬유를 통한 효과적인 one-way 광영상 전송 시스템을 구성하였다.

광속분리기 BS₃, BS₁을 이용하여 입사광을 신호파(I_1), 전방펌프파(I_2)로 나누어지며 이때 각 광파의 강도는 $I_1 = 6 \text{ mW/cm}^2, I_2 = 14 \text{ mW/cm}^2, I_3 = 38 \text{ mW/cm}^2$ 이었다. 그리고 BSO 단결정내에서는 신호파와 후방 펌프파에 의한 반사형 회절격자가 형성될 수 있으나 본 실험에서는 신호파와 후방 펌프파의 광로차는 Ar이온 레이저의 가간섭거리 보다 길게하고 신호파와 전방 펌프파의 광로차는 가간섭거리 보다 짧게 하여 투과형 회절격자만 형성되도록 하였다.

전방 펌프파와 신호파사이의 각을 조정하므로 BSO 결정에 형성되는 회절격자주기를 $\Lambda = 3 \mu\text{m}$ 로

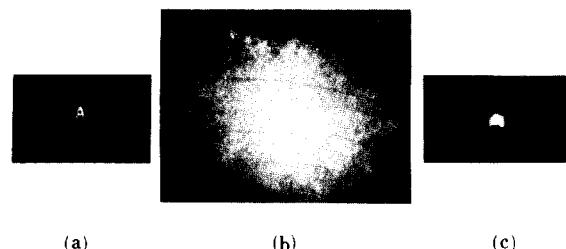
하였으며 외부전장은 $E_0 = 5\text{kV/cm}$ 로 인가하여 효과적인 위상공액파와 회절효율을 갖도록 하였다. BSO 단결정에서 전방 펌프파와 신호파에 의해 회절 격자가 형성되고 비간섭파이며 광영상(영문 알파벳 "A")을 포함한 후방 펌프파가 회절 격자로 부터 회절되어 신호파가 진행해온 경로를 역으로 통과하여 광섬유를 지나 광속분리기 BS2에 의해 스크린에 투영되며 투영된 광영상은 ASA 100인 코닥필름을 사용하여 검출하였다.

후방 펌프파의 광경로에 설치된 광영상은 BSO 매질, 광섬유, 그리고 광속분리기 BS2를 지나 스크린으로 전송되므로 광섬유를 통한 광영상의 직접전송이라 할 수 있다. 즉, 그림에서 P₁에서 S 까지가 one-way 광영상 전송 구간이고, 광섬유는 직경이 1mm이고 길이가 18cm인 다중모드 플라스틱 광섬유를 사용하였으며 광섬유의 양끝면을 잘 연마하여 광파의 입출력시 광섬유 표면에서의 산란현상을 줄였다.

그림 7은 광섬유를 통한 광영상의 전송한 결과이다. 그림 7(a)는 P₁에 위치 시켜놓은 입력 광영상 ("A")이고 그림 7(b)는 신호파가 광섬유를 한번 통과하여 모드 분산에 의해 왜곡된 결과이며 그림 7(c)는 입력 광영상이 광섬유를 통과하여 직접 전송된 결과를 나타낸 것이다. 전송된 광영상은 입력 영상에 비해 약간의 손상이 나타났는데 이는 신호파가 BSO 단결정에서 위상 공액 되어 위상보상은 가능하나 광섬유가 이상적인 위상왜곡판이 아니므로 전송된 각 모드의 간섭이 각기 달리 나타나고 광섬유의 입출력 평면에서 광파의 회절 등에 의해 광영상이 손상된 결과로 분석된다. 일반적으로 BSO 단결정은 응답시간 ($\sim 200\text{msec}$)이 다른 광굴절 매질에 비해 빠르므로 실시간으로 많은 정보량을 전송할 수 있으며 특히 투파형 홀로그램의 경우는 비선형 매질에 투파형 격자가 형성되는데 필요한 시간만 경과하면 후방 펌프파에 설치한 광영상 정보를 격자새김 시간에 관계없이 바꿀 수 있으므로 단시간에 많은 정보를 전송 할 수 있다.

N. 결 론

본 논문에서는 광굴절 매질인 BSO 단결정을 사용한 축퇴 4광파혼합에서 위상공액파를 이용하여 단일 광섬유에서 광영상의 직접전송에 관한 이론적 분석과 실험을 하였다. 이론 및 실험적 결과와 효과적인 광영상 전송에서 중요한 BSO 단결정의 위상 공액파 회절효율은 결정내에 형성되는 회절격자 주기, 외부에서 인가되는 전장세기 및 매질내에 임사하는 각광파의 강도비 변화에 의존하였다.



(a) (b) (c)

그림 7. 광영상 전송 결과

(a) 입력 광영상 (b) 왜곡된 광영상
(c) 위상 공액에 의해 전송된 영상

Fig. 7. Results of optical image transmission experiments.

(a) input optical image.
(b) distorted optical image.
(c) transmitted optical image by phase conjugation.

즉, 외부전장을 가하지 않은 경우 회절격자 주기가 증가함에 따라 회절효율은 크게 감소하여 $3\mu\text{m}$ 이상에서는 거의 나타나지 않았으며 외부전장을 가한 경우는 이와 반대로 회절격자 주기가 증가함에 따라 증가하여 $3\mu\text{m}$ 이상에서는 포화상태가 되는 실험적 결과를 얻었다. 그리고 이상의 실험적 결과를 토대로 본 실험에서는 외부전장을 5kV/cm , 회절격자 주기를 $3\mu\text{m}$ 로 하고 신호파 대 후방 펌프파의 강도비를 2.7로 하여 전형적인 축퇴 4광파 혼합시스템을 구성하고 후방 펌프파에 광영상(영문 알파벳 "A")를 실어 보내는 one-way 전송방식을 사용하여 광섬유를 통한 광영상의 왜곡보상과 동시에 직접전송을 실현하였다.

参 考 文 献

- [1] D.M. Pepper, "Special issue on nonlinear optical phase conjugation," *Opt. Eng.*, vol. 21, no. 2, 1982.
- [2] J.P. Huignard et al., "Phase conjugate wave-front generation via real time holography in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals," *Opt. Lett.*, vol. 4, p. 21, 1979.
- [3] J.O. White & A. Yariv, "Real time image processing via four wave mixing in a photorefractive medium," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 37, p. 5, 1980.
- [4] D.C. Haueisen, "Doppler-free two-photon spectroscopy using degenerate four wave

- mixing," *Opt. Lett.*, vol. 28, p. 183, 1979.
- [5] A. Yariv, "Four wave nonlinear optical mixing as real time holography," *Opt. Comm.*, vol. 25, p. 23, 1978.
- [6] Amnon. Yariv, "On transmission & recovery of three dimensional image information in optical waveguide," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, no. 4, p. 301, 1976.
- [7] Gilmore J. Dunning & R.C. Lind, "Demonstration of image transmission through fibers by optical phase conjugation," *Opt. Lett.*, vol. 7, no. 11, p. 558, 1982.
- [8] A. Yariv & T.L. Koch, "One-way coherent imaging through a distorting medium using four wave mixing," *Opt. Lett.*, vol. 77, no. 3, p. 113, 1982.
- [9] Baruch Fischer et al., "Real-time phase conjugate window for one-way optical field imaging through a distortion," *Appl. Phys. Lett.*, 41(2), no. 15, p. 141, 1982.
- [10] Baruch Fischer & David Peri, "Real-time three dimension imaging through fiber bundles by for wave mixing," *Opt. Lett.*, vol. 10, no. 4, p. 182, 1985.
- [11] G.C. Valley, M.B. Klein, "Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing," *Opt. Eng.*, vol. 22, no. 6, p. 704, 1983.
- [12] Mark Cronin-Golomb et al., "Theory & applications of four wave mixing in photorefractive media," *IEEE J.Q.E.*, vol. QE-20, no. 1, p. 12, 1984.
- [13] J.P. Huignard et al., "Phase-conjugation & spatial frequency dependence of wave-front reflectivity in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals," *Opt. Lett.*, vol. 5. no. 3, p. 102, 1980.
- [14] N.V. Kukhtarev et al., "Holographic storage in electrooptic crystals," *Ferroelectrics*, vol. 22, p. 949-960, 1979.
- [15] J. Feinberg & R.W. Hellwarth, "Phase conjugating mirror with continuous wave gain," *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 12, p. 519, 1980.