

論文93-30A-3-4

입사빔의 위치 및 세기에 따른 자기펌핑 위상공액파의 특성 (Dependence of Optical Phase Conjugation on Incident Beam Position and Intensity)

孫東煥*, 全炯旭*, 李林杰*, 孫廷榮*, 任東健**

(Dong Hwan Son, Hyung Wook Jeon, Yim Kul Lee, Jung Young Son and Dong Kun Lim)

要 約

광굴절성 BaTiO₃를 위상공액기로 사용하여 입사빔의 위치 및 세기에 따른 자기펌핑 위상공액 (self-pumped phase conjugation: SPPC)과의 변화를 실험적으로 관찰하였다. 결정에 입사되는 빔의 위치에 따라 불규칙적인 펄스, 규칙적인 펄스, 안정된 출력, 불안정한 진동영역으로 구분되었으며 규칙적인 펄스영역에서 입사빔의 세기 I_{in} 과 주파수는 $\propto I_{in}^{-1}$, 진폭은 $\propto I_{in}^{0.85}$ 의 비례관계를 보였다. 불규칙적인 진동영역에서 첫 번째 얻어지는 펄스의 rising time과 출력의 세기는 각각 $\propto I_{in}^{0.92}$, $\propto I_{in}^{0.81}$ 의 관계를 보였다. 또한 SPPC에 의한 광 간섭계를 구성하여 얻은 간섭무늬의 이동 관찰을 통해 빔 fanning에 의한 주파수 이동이 있음을 논의하였다.

Abstract

Effects of incident beam position and intensity on self-pumped optical phase conjugation are presented using barium titanate as an optical phase conjugator. Depending on the position of incident beam, the crystal used consists of four major operating regions: irregular pulsing, regular pulsing, stable phase conjugation, and unstable oscillating regions. In the second region, the pulsing frequency and amplitude of phase conjugate beam are proportional to I_{in} and $I_{in}^{0.85}$, respectively, where I_{in} is the incident beam intensity. In the fourth region, the rising time and intensity of the first-generated pulse are proportional to $I_{in}^{0.92}$ and $I_{in}^{0.81}$, respectively. A frequency shift by beam fanning is also discussed by observing interference pattern from an interferometer.

1. 서 론

위상공액파(optical phase conjugation, OPC)는 입사되는 전자파의 위상이나 파면이 비선형매질에 의해 복소공액(complex conjugation)을 취한 것과 같이 반전되는 것으로 보통거울의 성질과는 달리 입사

광의 경로를 역으로 진행하므로 입사광의 전파통로에 놓인 확산매질에 의한 퍼짐이나 왜(distortion)를 보상할 수 있다. 이러한 광 위상공액파의 특성을 이용하여 광파이버에 의한 직접화상처리, 광연산처리, 실시간 화상 및 패턴 인식 등의 정보처리를 위한 응용에 많은 연구가 이루어 지고 있다.^{1,2)}

위상공액파를 얻기 위해 다양한 광학시스템 구성이 가능하지만 그 중에서 시스템이 간단하고 self-alignment가 가능한 자기펌핑 위상공액(self-pumped phase conjugation, SPPC)은 Pockels 효과로 인해 입사빔으로부터 fanning^{3,4)}된 빔이 생성되고, 이들 fanning된 빔은 결정의 내부 반사에

*正會員, 韓國科學技術研究院 光電子研究室
(Optical Electronics Lab., KIST)

**正會員, 高麗大學校 物理學科
(Dept. of Physics, Korea Univ.)

接受日字: 1992年 8月 31日

의해 펌프빔으로 작용하여 optical phase conjugation (OPC)을 형성한다. 따라서 SPPC는 외부 펌프빔이 필요치 않으며 낮은 광세기 ($1W/cm^2$ 이하)에서도 20%에서 50% 정도의 높은 반사율의 복소공액 출력을 얻을 수 있다.¹² SPPC의 현상을 설명한 모델들은 몇 가지 있는데 일반적으로 받아들여지고 있는 two-coupled interaction region model¹²에 의하면 그림 1에서처럼 A, B 두 영역에서 자체 형성되는 degerated four wave mixing (DFWM)으로 설명하는데 이는 입사빔에서 fanning된 빔 I_{A1} 이 A 영역의 전방 펌프가 되고 결정 모서리에서 전반사되어 B영역의 후방 펌프 I_{B2} 가 되며, B영역에서 fanning된 빔 I_{B1} 이 B영역의 전방 펌프 I_{B1} 이 되고 결정 모서리에서 전반사되어 A영역의 후방 펌프 I_{A2} 가 된다고 보는 견해이다. 따라서 광굴절성 결정에 입사되는 빔의 크기, 위치, 입사각, 수렴하는 빔과 발산하는 빔, 결정의 크기와 모양^{16,17} 등에 따라 결정의 내부에서의 빔 경로와 세기가 달라지므로 OPC 생성에 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 안정된 광 정보처리를 위해 광굴절성 결정인 BaTiO₃에 입사되는 빔의 위치와 세기에 따른 SPPC의 특성을 실험적으로 고찰한다.

II. 실험

그림 2는 실험장치의 개략도인데 PBS는 polarizing beam splitter로 우측으로 입력빔을 분리하여 결정 내에 형성된 광 굴절격자를 제거할 때 사용한다. 그림 2의 상단의 왼쪽 사진은 M2(mirror)를 shutter로 차단했을 때 screen에 나타나는 복소공액 출력의 상이고 오른쪽 사진은 M2와 OPC에 의한 Michelson 간섭계 구성으로 생기는 간섭무늬이다. 본 실험에 사용된 BaTiO₃ 결정(Sanders사)은 poling에 의해 single domain을 가지며 깨끗하게 표면처리된 것이다. BaTiO₃의 크기는 5.0mm x 4.8mm x 4.2mm 이며 4.2mm가 c-축에 평행하다. 입사빔의 조건을 바꾸어 가면서 실험하기 위해 기울림과 상하 좌우이동 및 각도를 정밀하게 조절할 수 있는 소형 stage위에 결정을 부착하였다. 실험에 사용된 laser(Lexel 3500 Ar이온)의 파장은 514nm이고, etalon을 장착하여 stable single longitudinal mode에서 실험하였다. Isolator를 사용치 않을 때 문제가 되는, 복소공액 출력의 시간역전(time reversal)에 의한 laser cavity와의 되먹임¹ (feedback)으로 생기는 laser 출력의 불안정을 방지하기 위해 BS1(beam splitter)의 반사도를 충분히 크게 하여 laser 출력과 BaTiO₃에 입사하는 입사빔의 강도비가 40:1인 상태에서 실험하였다. 이때, 복소공액 출력의 강도는 입사빔 강도의 20-30% 정도였으므로, laser cavity로 되먹임되는 복소공액 출력

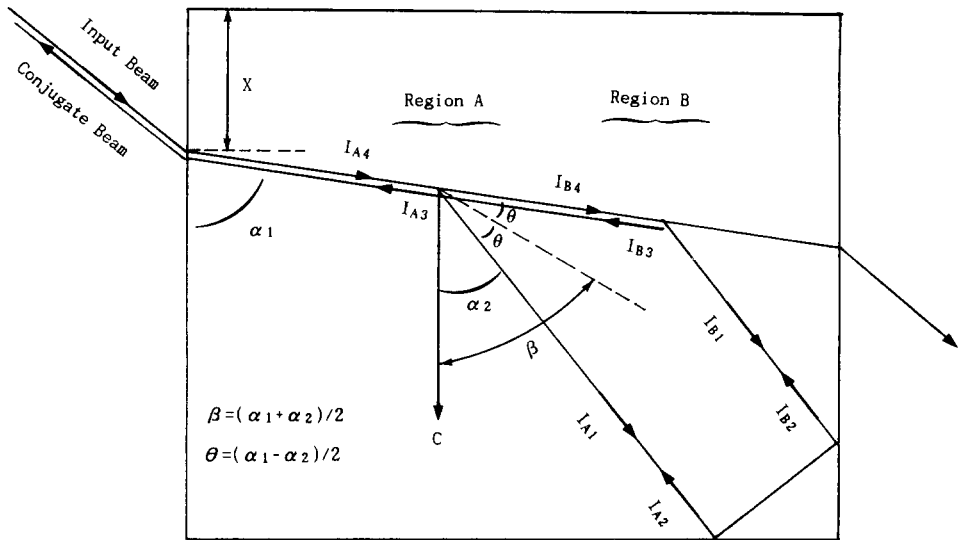


그림 1. Two coupled interaction region model: 내부의 전반사에 의해 A, B 두 영역에서 four wave mixing이 있다

Fig. 1. Two coupled interaction region model: four-wave mixing is formed in both regions A and B.

강도에 대한 laser 출력의 비는 약 1:8000 정도의 작은 값이며, PD1 (photo detector)에 의한 출력의 감시는 laser mode가 바뀌는 순간 (mode가 바뀌는 시간 간격은 10분 이상) 외에는 안정된 출력을 나타내었다. 특히, 입사빔의 강도 조절은 laser 자체의 출력을 조절한 뒤 안정된 상태가 될 때까지 기다린 후 실험하였다. 점선 안의 $\lambda/2$ 파장판(wave plate)은 입사빔을 ordinary polarized 빔으로 만들어 이미 형성된 결정 내의 굴절률 격자를 1차적으로 지울 때만 사용된 것이며, 2차적으로 mechanical shutter로 빔을 차단한 뒤 PBS(polarization beam splitter)에서 나오는 ordinary polarized 빔을 확대시켜 결정 전체를 비추어 기록을 가능한 모두 제거하여 연속되는 실험에 영향이 미치지 않게 하였다.

M2는 복소공액 출력의 위상을 관찰하기 위한 간섭계 구성에 사용되었으며, 선 간섭 무늬(line fringe)

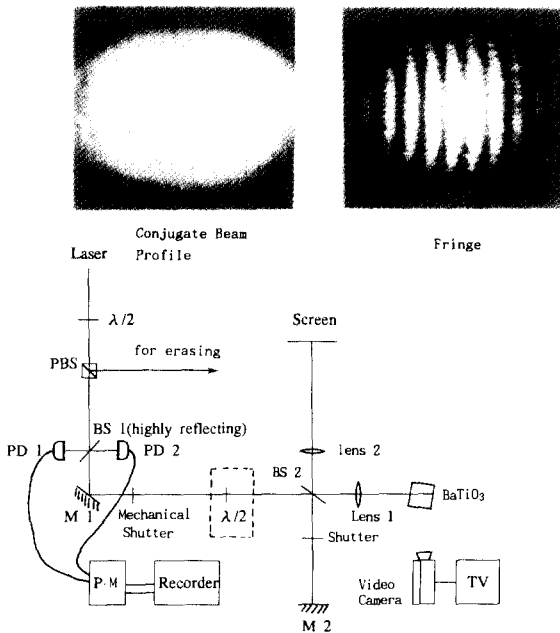


그림 2. 위상공액을 관찰하기 위한 광학시스템: (상단 왼쪽) M2 앞의 shutter를 닫아서 얻은 결과: (상단 오른쪽) shutter를 열어 얻은 간섭패턴

Fig. 2. Optical set-up for observing phase conjugation: (upper-left) phase conjugate beam without shutter: (upper-right) phase conjugate beam with shutter.

를 만들기 위한 기울임(tilt)이 있으므로 laser에 직접 되돌아가는 광의 양은 무시할 정도였다. Shutter는 conjugated-beam profile을 관찰할 때 사용되었다. Lens 1의 초점 거리는 30cm이고, 입사빔의 직경을 0.6mm로 수렴하는 빔이 되도록 하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

복소공액 출력은 입사빔의 입사각, 빔의 크기, 입사빔의 위치 X(그림 1, 참고), 결정의 크기, 수렴하는 빔과 발산하는 빔 등에 모두 영향을 받는다. 이때 입사빔의 위치만을 바꾸어 가며 관찰한 복소공액 출력의 시간에 따른 변화는 그림 3과 같다. 이때, 입사빔의 강도는 $4W/cm^2$ 이며, 입사빔의 진행각 α_1 은 82° 이었다.

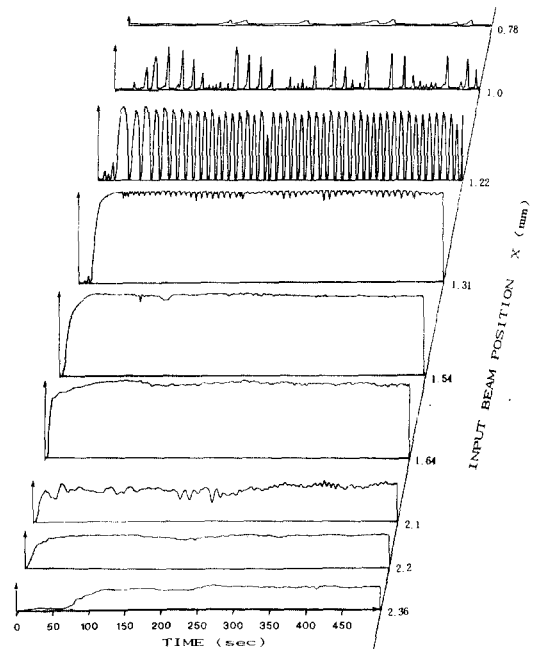


그림 3. 입사빔의 위치에 따른 위상공액 반사도: 입사빔의 세기는 $4W/cm^2$ 이고 입사각은 normal 방향과 82° 이루고, 빔의 직경을 0.6mm로 하였다

Fig. 3. Reflectivity of phase conjugation for various incident beam positions: incident beam intensity is $4W/cm^2$: indident angle 82° to normal direction: beam diameter 0.6mm.

그림 3에서 보듯이 주어진 입사빔의 진행각 α_1 에 대해 어떤 X(본 연구에서 사용한 결정의 경우 $\alpha_1=82^\circ$ 일 때 $X=1.31\text{mm}$)를 전후로 펄스를 내는 영역과 펄스를 내지 않는 영역으로 나눌 수 있으며, 이러한 경향은 α_1 을 달리해도 마찬가지이다. (물론 경계가 되는 X는 달라짐)

1. 펄스를 내는 영역

$X = 0.78\text{mm}$ 이전에는 뚜렷한 loop의 형성이 없고 fanning현상을 뚜렷이 볼 수 있으며 복소공역 출력은 거의 기록되지 않았다. $X = 1.22\text{mm}$ 이전에는 불규칙한 펄스가 관찰되었다. 간섭무늬의 이동이 있었으며 peak의 형태에 따라 좌우로 방향을 달리했고 이동 속도도 불규칙적이었다. $X = 1.22\text{mm}$ 근처에서는 규칙적이며 오래도록 지속되는 펄스가 관찰되었는데, 그림 4와 같이 강한 loop가 형성되면서 결정 전체에 퍼져있던 빔은 사라지고 빔의 경로가 뚜렷해지다가 출력이 최대치에 달하면 강한 빔 경로가 서서히 사라지고 결정 전체가 밝아진다. 최대치에 이를 때까지 간섭무늬의 이동은 관찰되지 않았으며 최대치에서 떨어질 때 수 Hz의 간섭무늬 이동이 생겼다.

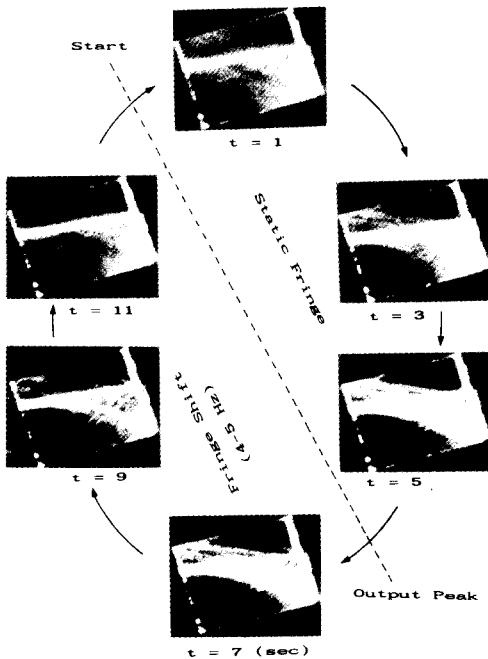


그림 4. Pulse 발생 시의 순환 과정으로 주기가 약 12초 정도가 된다

Fig. 4. Example of pulsation with an period of about 12 seconds.

그림 4는 주기가 12초 정도인 펄스발생시 BaTiO3 결정내의 fanning에 의한 되먹임 loop형성과 소멸 과정을 보여준다. 입사빔 강도를 약 400mW/cm^2 에서 4000mW/cm^2 로 변화시킬 때 시간에 따른 규칙적인 펄스의 모양은 그림 5와 같다. 초기 상태를 제외하면 각각의 입사빔 강도에 따라 그림 5와 같은 규칙성은 계속 유지된다.

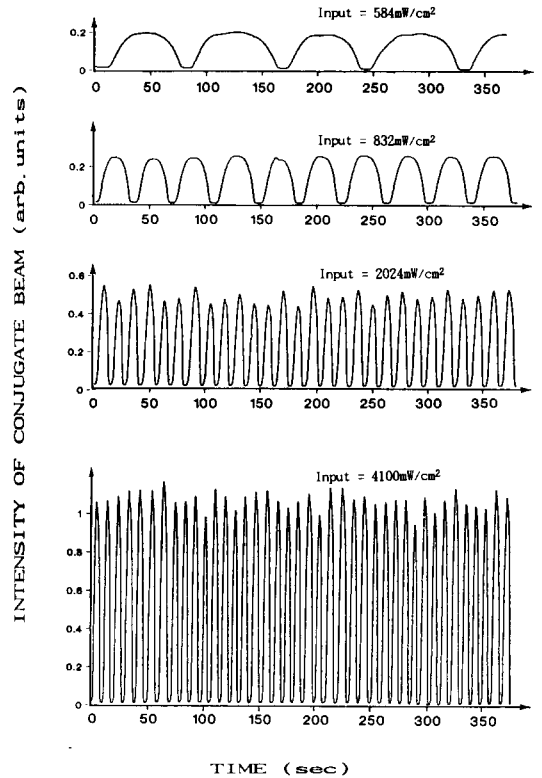


그림 5. Pulse가 발생하는 조건에서 입사빔의 세기를 변화시키면서 발생된 위상공역 반사도

Fig. 5. Reflectivity for varying incident beam intensity under pulsing condition.

그림 6(a)는 입사빔 강도에 대한 pulsing 주기를 log-log로 그린 것인데 최소 자승법으로 fitting한 기울기는 1.0 이었다. 입사각이 변화했을 때 이 기울기는 1.0 근처에서 다소 변화하였다. 그림 6(b)는 펄스의 진폭을 나타내는데 기울기는 0.85 이다. 참고문헌 8은 펄스 진폭 기울기 0.89, 참고문헌 9는 기울기 0.8의 실험 결과를 얻었다. 물질 내에서의 흡수를 고려할 때^(10,13) 펄스진폭 기울기는 1보다 작은 것이 타당하다.

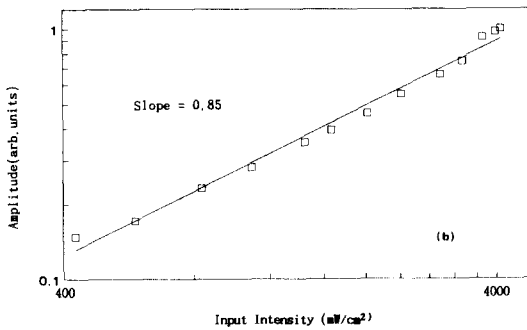
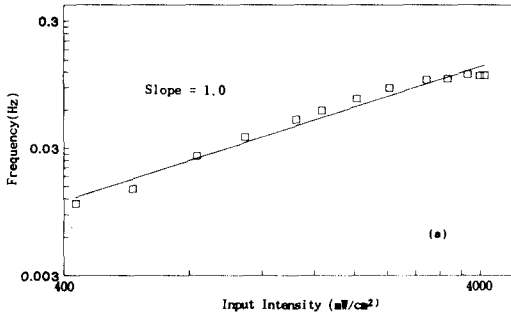


그림 6. Pulse가 발생하는 조건에서 입사빔의 세기를 변화시키면서 발생된 위상공액 반사의 pulsing 주파수와 pulse의 진폭

Fig. 6. Pulsing frequency and amplitude versus beam intensity under pulsing condition.

2. 펄스를 내지 않는 영역

X = 1.31mm 에서 X = 1.64mm까지(결정의 입사면 10% 정도 해당됨)는 안정된 출력을 나타냈으며, 간섭무늬의 이동은 관찰되지 않았다. X = 1.64mm에서 X = 2.36mm 까지는 불안정한 oscillation을 나타냈으며 결정내의 fanning loop는 2-3개가 나타나기도 하였다. 간섭무늬 이동은 좌우로 느리게 (0.1-0.2 Hz) 조금씩 진동하였다. X = 2.2mm 위치에서는 비교적 안정된 출력을 얻었다.

그림 7(a)와 (b)는 불안정한 진동(oscillation) 영역에서 입사빔의 강도에 대한 첫 번째 최대치에 도달하는데 걸리는 시간과 최대치의 높이를 log-log로 그린 것인데 기울기는 각각 -0.92, 0.81 이었다. 입사빔의 진행각 α_1 이 작아질수록 출력의 불안정 정도가 강해지고 안정된 영역의 폭이 작아짐을 볼 수 있었다.

펌프빔은 입사빔 강도의 일정한 비율로 자체 형성되므로 입사빔의 세기변화에 영향을 받지 않는다. 그러나 laser출력을 고정시킨 상태에서 filter를 이용해

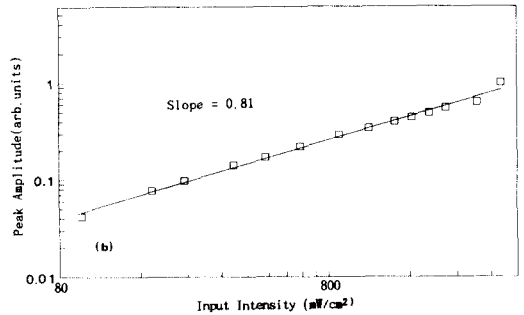
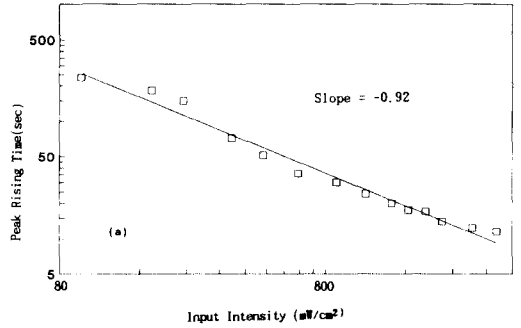


그림 7. 불안정한 진동영역에서 입사빔의 세기에 대한 광 위상공액파가 첫 번째 최대치에 도달하는 시간과 최대치의 크기를 나타낸 결과.

Fig. 7. Peak rising time and amplitude of first-generated pulse versus input intensity.

입사빔의 강도를 조절할 경우 laser cavity로 되먹임되는 복소공액 출력의 양이 커서 laser의 출력에 영향을 미치므로 인하여 레이저의 출력은 불안정하게 된다.

따라서 불안정한 출력에 의해 위상공액파는 불안정하게 되므로 안정된 복소공액파를 얻으려고 할 경우에는 레이저 앞에 레이저 cavity 안으로 되돌아가는 광을 차단하는 장치가 필요하다. 본 실험에서 BSI를 제거할 경우 laser 출력의 심한 불안정을 관찰할 수 있었다.

3. 입사빔 위치 X에 따른 결합 강도

빔 fanning을 입사빔과 산란빔의 TWM에 의한 증폭으로 생각할 때 $\gamma > 10$. 입사빔과 산란된 빔의 방향에 따른 두 빔 결합상수 γ 가 되므로 산란된 빛은 방향에 따라 이에 지수적으로 비례하여 증폭될 것이다. 일반적으로 두 빔 결합상수는 입사빔과 산란빔

사이의 각 $\alpha_1 - \alpha_2 = 2\theta$ 가 $8^\circ - 12^\circ$ 정도일 때 최대가 되며, 2θ 가 커질수록 작아진다.^{9,10} 입사빔과 산란빔의 결합 길이 l 도 산란빔의 방향에 따라 결정된다. θ 가 산란원인(scattering source)의 위치에 의존하는 어떤 각보다 클 때, $l(\theta) \propto 1/\sin(2\theta)$ 이 됨을 알 수 있다. 결과적으로 산란각 α_2 가 α_1 에 가까울수록 (θ 가 작을 수록) 결합강도 γl 이 커진다. 각 α_2 로 산란된 빔은 결정의 corner에서 두 번 내부반사 되어 상대영역의 펌프빔이 되는데, 산란각 α_2 에 따른 내부반사도를 고려해 보면 전반사가 일어나는 영역은 α_2 가 $22^\circ - 67^\circ$ 사이일 때이므로, α_2 가 67° 이상으로 fanning될 경우 γl 은 강하지만 내부반사도가 작아서 fanning 빔이 결정의 외부로 투과되어서 loop를 형성하기가 어려워진다. 본 실험에서 X의 증가에 따라 α_2 가 50° 에서 60° 로 증가 되는 loop 형성을 관찰할 수 있었다.

결론적으로, X가 작으면 ($\alpha_1=82^\circ$ 일 때 $X=1.31\text{mm}$ 이하) 산란원인 (scattering source)과 내부반사에 기여하는 결정의 corner간의 거리가 멀어져 진행 중에 있는 빔 fanning이 뚜렷해지고 loop로 형성되는 산란각 α_2 가 작게 되어 결합강도 γl (θ)이 너무 작아져¹² 출력이 안정되지 못하게(pulsing) 되는 것으로 생각된다. X가 충분히 커서 ($\alpha_1=82^\circ$ 일 때 $X=1.31\text{mm}$ 이상) γl 이 강할 때 생기는 불안정(oscillation)은 다중격자에 의한 효과¹¹ 일 수 있으며, 실험적 관찰에 의하면 강한 loop 2-3개가 서로 경쟁하는 경우도 있으므로 우세한 loop가 바뀌면서 생기는 불안정으로 생각할 수도 있다.

4. 비정상적 위상이동에 대한 논의

간섭무늬의 이동은 외부전압 E_0 가 0이 아닐 때 가능한데¹¹², 실험시 외부전기장을 가하지 않았으므로 E_0 는 photovoltaic voltage^{110,113} 에 의한 기여만이 있다. 그러나, 실험에서 관찰되는 불연속적 이동, 좌우 양쪽 방향으로의 이동, 빠른 속도의 이동 등은 photovoltaic voltage로 설명될 수 없다.^{111,14} 특히, 규칙적인 펄스를 내는 영역에서의 실험 결과는 복소공액 출력이 최대치에 달할 때까지는 간섭무늬의 이동이 거의 없다가, 최대치에서 떨어질 때 수 Hz의 이동이 관찰 되었다.

이러한 복소공액 출력의 비정상적인 위상이동¹¹⁴ (anomalous frequency and phase shift)은 결정 내에서 자체 형성되는 펌프빔의 위상이 불안정하게 변하고 있다고 가정할 때 가능하다. $E_0=0$ 일 때, DFWM에 의한 복소공액 출력의 위상 $\psi_3(0)$ 는 probe의 위상 $\psi_4(0)$ 와 전방 펌프의 위상 $\psi_1(0)$ 과 후

방 펌프의 위상 $\psi_2(l)$ 에 의해서 $\psi_3(0)=\psi_1(0)+\psi_2(l)-\psi_4(0)$ 이 된다¹¹⁵. 펌프 빔의 위상 $\psi_2(l)$ 는 입사빔에서 fanning에 의해 생겨난 빔이 내부 전반사를 통해 상대 영역의 펌프빔이 되기까지 진행한 거리 L에 의해 결정되며, L의 시간에 따른 변화 $\Delta L(t)$ 은 펌프빔의 위상을 시간에 따라 $\Delta L(t)/\lambda$ 만큼 변화시킨다. loop의 길이 변화 ΔL 은 그림 8과 같이 two interaction region loop를 형성한 fanning 빔이 점점 강해져서 어떤 임계강도에 도달하면 자기 자신도 fanning에 의해 꺾이게 되고, 그로 인해 진행거리 L의 크기가 커지거나 작아진다고 생각할 때 가능해진다. 이런 현상은 그림 4에서 실제로 관찰할 수 있는데 이를 도식화한 그림 8에 의하면 A영역에서 fanning된 빔의 fanning에 의한 진행거리의 변화 ΔL 과 B영역에서 fanning된 빔의 fanning에 의한 ΔL 은 서로 반대 부호를 가지며 이는 위상의 좌우이동을 설명할 수 있다.

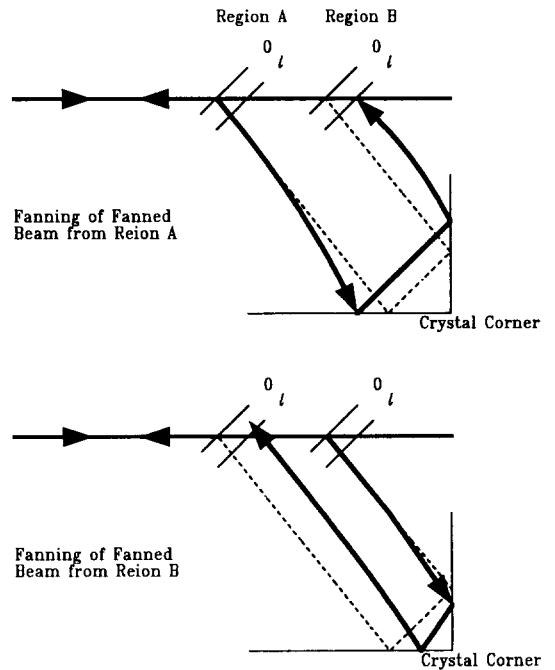


그림 8. Fanning된 빔 자신의 fanning에 의한 빔의 경로 길이의 변화 (점선은 초기의 빔경로): (상단) A 영역에서의 빔경로의 변화:(하단) B영역에서의 빔경로의 변화
 Fig. 8. Change of beam path by the fanning of fanned beam:(top) beam fanning in region A:(bottom) beam fanning in region B.

결론적으로 SPPC의 복소공액 출력이 가지는 비정상적 위상이동은 임계 강도에 도달한 fanning 빔 자신의 fanning을 가정할 때 설명될 수 있다. 또한 SPPC와 마찬가지로 보통의 DFWM보다 적은 수의 외부 펌프로 optical phase conjugation이 가능한 BWPC(Bird-Wing Phase Conjugator)^[6], Mutually Pumped Phase Conjugator^[7], Frogs 'Legs'^[8] 등의 비정상적 위상이동도 fanning에 의해 자체 형성되는 펌프빔 자신의 fanning에 의한 위상의 변화라고 생각할 때 설명될 수 있다.

IV. 결론

광굴절성을 갖고 있는 BaTiO₃ 결정을 이용해 laser와 복소공액 출력과의 되먹임이 일어나지 않는 상태에서 안정된 단일 모드(single mode)의 laser 출력으로 입사빔의 위치 및 강도에 따른 SPPC의 복소공액 출력이 보이는 시간적 불안정성(instability)을 실험적으로 관찰하였다. 입사빔의 위치 X의 증가에 따라 불규칙적인 펄스, 규칙적인 펄스, 안정된 출력, 불안정한 진동(oscillation) 등을 관찰하였다. 펄스 현상이 일어나고 있는 영역에서 입사빔의 강도 I_{in}를 약 400mW/cm²에서 4000mW/cm²로 변화시켰을 때 주기적인 펄스의 진동수와 진폭은 각각 $\propto I_{in}^{-1}$, $\propto I_{in}^{-0.5}$ 의 관계를 보였다. Oscillation 영역에서 입사빔의 강도 I₀에 대한 rising time과 출력의 강도는 각각 $\propto I_{in}^{-0.5}$, $\propto I_{in}^{-0.5}$ 의 관계를 보였다.

입사빔과 위상공액 출력과의 간섭계를 구성하여 각 영역의 간섭무늬 이동을 관찰하였는데 간섭무늬의 이동은 불안정한 공액출력에서 나타났으며 출력이 최대치에서 떨어질 때 수 Hz의 이동이 관찰되었다. 이 주파수 이동의 원인은 임계 강도에 도달한 fanning 빔 자신의 fanning에 의한 것으로 고찰된다.

參考文獻

- [1] J. Feinberg, "Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection," *Opt. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 486-478, 1982.
- [2] K. R. MacDonald and J. Feinberg, "Theory of a self-pumped phase conjugator with two-coupled interaction regions," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 73, no. 5, pp.548-553, 1983.
- [3] J. Feinberg, "Asymmetric self-defocusing of an optical beam from the photorefractive effect," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, pp. 46-51, 1982.
- [4] G. Zhang, Qing-Xin Li, Ping-Pei Ho, S. Liu, Z. K. Wu and R. Alfano, "Dependence of specklon size on the laser beam size via photo-induced light scattering in LiNbO₃:Fe," *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 17, pp. 2955-2959, 1986.
- [5] M. B. Klein and G. C. Valley, "Beam coupling in BaTiO₃ at 442nm", *J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 11, pp. 4901-4905, 1985.
- [6] M. D. Ewbank, "Mechanism for photorefractive phase conjugation using incoherent beams," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 47-49, 1988.
- [7] M. Cronin-Golomb, A. Yariv, "Self-induced frequency scanning and distributed Bragg reflection in semiconductor lasers with phase-conjugate feedback," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 455-457, 1986.
- [8] P. Gunter, E. Voit, M. Z. Zha, and J. Albers, "Self-pulsation and optical chaos in self-pumped photorefractive BaTiO₃", *Opt. Comm.* vol. 55, no. 3, pp. 210-214, 1985.
- [9] M. C. Gower and P. Hribek, "Mechanisms for internally self-pumped phase-conjugate emission from BaTiO₃ crystals," *J. Opt. Soc. Am. B.* vol. 5, no. 8, pp. 1750-1757, 1988.
- [10] J. F. Lam, "Origin of phase conjugate waves in self-pumped photorefractive mirrors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, no. 10, pp. 909-911, 1985.
- [11] D. J. Gauthier, P. Narum, and R. W. Boyd, "Observation of deterministic chaos in a phase-conjugate mirror", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 16, pp. 1640-1643, 1987.
- [12] B. Fischer, "Theory of self-frequency detuning of oscillations by wave mixing in photorefractive crystals," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 236-238, 1986.

- [13] M. C. Gower, "Photoinduced voltages and frequency shifts in a self-pumped phase-conjugating BaTiO₃ crystal," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 458-460, 1986.
- [14] K. R. MacDonald and J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 1, no. 12, pp. 1213, 1984.
- [15] Sze-Keung Kwong, A. Yariv, M. Cronin-Golomb, and B. Fischer, "Phase of phase conjugation and its effect in the double phase-conjugate resonator," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 3, no. 1, pp. 157, 1986.
- [16] G. Hussain, S. W. James, R. W. Eason, "Observation and modeling of dynamic instabilities in the mutually pumped bird-wing phase conjugator in BaTiO₃," *J. Opt. Soc. Am., B*, vol. 7, no. 12, pp. 2294-2298, 1990.
- [17] D. Wang, Z. Zhang, X. Wu, and P. Ye, "Instabilities in a mutually pumped phase conjugator of BaTiO₃," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 12, pp. 2289-2293, 1990.
- [18] M. D. Ewbank, R. A. Vazquez, and R. R. NeurGaonkar, J. Feinberg, "Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate: theory and experiment," *J. Opt. Soc. Am., B*, vol. 7, no. 12, pp. 2306-2316, 1990.

著者紹介

孫 東 煥(正會員)

1966年 10月 30日生. 1990年 2月 고려대학교 물리학과 졸업(학사). 고려 대학원에서 석사학위(1992年 2月) 현재 한국과학기술원 위촉 연구원임. 주관심분야는 비선형 광학 및 광정보처리 등임.

孫 廷 榮(正會員)

1973年 2月 한국 항공대학교 전자공학과 졸업(학사). 미국 University of Tennessee 전자공학과에서 석사학위(1982년) 및 응용광학에서 박사학위(1985年). 1989년까지 Tennessee Space Institute 기관 및 Georgia Tech Research Center에서 선임 연구원으로서 광정보처리 분야에서 연구활동. 1989年 이후 한국과학기술연구원 광전자연구실에서 연구활동(책임연구원). 주관심분야는 광영상 및 신호처리, 패턴인식, 광컴퓨팅, 광위상공액(optical phase conjugation)을 이용한 정보처리, 광파이버 신호처리, 디지털 영상 및 신호처리 등임.

任 東 健(正會員)

1942年 6月 28日生. 1964年 6月 서울대학교 문리과 대학 물리학과(학사), 1970年 미국 Johns Hopkins 대학 물리학과 석사. 1973年 미국 Johns Hopkins 대학 물리학과 박사. 1973年 ~ 1975年 미국 Columbia 대학 화학과 post doc. 1975年~1977年 미국 Minnesota 대학 생화학부 특수연구원. 1978年~1981年 한국 표준연구소 광학실장. 1981年~현재 고려대학교 이과대학 물리학과 교수 주관심분야는 광산란을 이용한 Aggregate의 Fractal구조연구, Deterministic chaos에 관한 연구, 유기 고분자들의 비선형 광특성 연구.



孫 炯 旭(正會員)

1985年 2月 연세대학교 물리학과 졸업(학사). 동 대학원에서 석사학위 (1987年 8月). 1990年 7月 이후 한국과학기술연구원 광전자연구실에서 연구활동(연구원). 연구분야는 광영상 및 신호처리, 패턴인식, 광 컴퓨팅, 광위상공액 (optical phase conjugation)을 이용한 정보처리, 광파이버 신호처리 등임.



李 林 杰(正會員)

1982年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업(학사). 미국 Georgia Institute of Technology 전기과에서 석사학위(1987年 6月) 및 박사학위 (1991年 3月). 1991年 Georgia Tech 전기과 및 Georgia Tech Research Center에서 연구원으로서 광정보처리 분야에서 연구활동. 1991年 12月 이후 한국과학기술연구원 광전자연구실에서 연구활동(선임연구원). 주관심분야는 광영상 및 신호처리, 패턴인식, 광컴퓨팅, 광위상공액 (optical phase conjugation)을 이용한 정보처리, 광파이버 신호처리, 디지털 영상 및 신호처리 등임.