

BaTiO₃ 광굴절 결정에서 자기 펌핑에 의해 발생하는 위상공액파의 특성
 Characteristics of Optical Phase Conjugate Wave Generated by Self-Pumping
 in Photorefractive BaTiO₃ Single Crystal

이 장 두*, 이 학 규, 이 상 수
 (한국과학기술원 물리학과)

Abstract

Self-pumped phase conjugation(SPPC) in BaTiO₃ single crystal is experimentally investigated at a wavelength of 514.5nm from an Ar⁺ laser. The incident Gaussian beam enters the crystal as an extraordinary ray.

The maximum SPPC reflectivity of 48% is obtained at incident angle 80 degree. The SPPC wave demonstrates good image reconstruction. The response time (τ) of SPPC wave as a function of incident intensity is measured to be $\tau=36 \times I^{-0.79}$ sec.

1. 서 론

전자기파를 표현하는 공간성분과 시간성분중에서 공간성분에만 켈레 복소수를 취한 형태로 표현되는 파를 원래 파의 위상공액파라 한다. 이 위상공액파는 입사파면의 공간적 파면구조를 그대로 유지하면서 진행 방향만이 입사방향으로 되돌아간다.⁽¹⁾ 이 성질때문에 위상공액파는 광학계의 수차 제거와 왜곡된 파면의 보정에 응용될수 있다.

위상공액파의 발생은 1972년에 Zel'dovich등⁽²⁾이 유도 Brillouin 산란을 이용해서 처음으로 성공시킨 후로 즉위 4파 혼합(Degenerate Four Wave Mixing; DFWM)⁽³⁾을 통한 일반적인 방법이 이용되었다. 특히 발생 방법중에서 더욱 더 획기적인 것으로 1982년 J.Feinberg에 의해 DFWM실험중 우연히 발견된 자기 펌핑 위상공액(Self-Pumped Phase Conjugation; SPPC)이 있다.⁽⁴⁾

DFWM에서는 서로 반대 방향으로 진행되는 2개의 펌프파와 1개의 입사파를 비선형 매질에 입사시켜서 입사파와 반대 방향으로 진행되는 위상공액파를 발생시키지만, SPPC에서는 1개의 입사파만을 비선형 매질에 입사시켜서 높은 반사율의 위상공액파를 얻게된다. 이 현상은 광굴절 효과에 기인하는데, 즉 입사된 광에 의해서 광의 입사경로에 굴절율의 변화가 유도되고 변화된 굴절율의 영향으로 입사광이 asymmetric self-defocussing효과를 일으켜 그림(4)의 (a)와 같이 결정의 한쪽 모서리로 fanning된다. fanning된 광은 모서리에서 전반사를 두번 거쳐 그림(4)의 (b)와 같이 투과되는 광과 다시 만나게 된다. 이 곳을 작용지역(interaction region)이라고 하는데 바로 이 곳에서 DFWM이 일어나고 위상공액파가 발생하는 것이다. 결국 SPPC는 하나의 입사파에 의한 DFWM이다.

본 논문에서는 asymmetric self-defocussing 효과⁽⁵⁾와 두 개의 작용 지역이 있을 때의 SPPC의 반사율에 대한 표현⁽⁶⁾을 소개하고, 입사 각도를 변화시켜가면서 두 개의 작용 지역이 생길 때의 반사율을 측정하여 이론과 비교해 보았다. 그리고 발생하는 위상공액파의 response time을 측정하였다.

2. 이 론

2-1. Asymmetric Self-Defocussing Effect

공간 진동수 \vec{k} 로 modulation된 광에 의한 광굴절 현상으로 유도되어지는 공간 전하장 \vec{E}_{sc} 의 표현은

$$\vec{E}_{sc}(\vec{x}) = \text{Re} \left\{ i \frac{k_B T}{e} m_s \frac{\vec{k}}{1+(k/k_0)^2} e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} \right\} \quad (1)$$

으로 나타내어진다. 식에서 m_k 는 공간 진동수 \vec{k} 를 갖는 강도 성분의 modulation 길이이고, k_0 는 전하 운반자들의 밀도에 의해 정해지는 characteristic 광벡터이다. k_B 는 볼츠만 상수, T 는 온도, e 는 전하운반자의 전하량이다.

spot size w_0 를 갖는 Gaussian 강도 분포의 광이 입사되었을때 유도되는 공간 전하장은 Gaussian 강도 분포 함수를 Fourier 전개하여 각 \vec{k} 성분에 의한 E_{yQ} 를 구하고, 이것을 \vec{k} 에 대해서 적분하면 얻을 수 있다. 그 결과는

$$\vec{E}(\vec{x}) = \frac{-2k_B T (\alpha\alpha + y\bar{y})}{e \pi \omega_0^2} \exp \left\{ -[(x^2 + y^2)/\omega_0^2] \right\} \quad (2)$$

와 같다. 유도된 공간전하장으로 인해 생기는 optical susceptibility tensor의 변화는

$$\chi(\vec{x}) = -\epsilon_0 \epsilon_\omega R \vec{E}(\vec{x}) \epsilon_\omega \quad (3)$$

로 주어지는데, ϵ_0 는 자유공간의 permittivity이고, ϵ_ω 는 진동수 ω 에서의 dielectric 텐서, R 는 third-rank 전기광학 텐서이다. 이로 인한 굴절율의 변화는

$$n(\vec{x}) = (2n' \epsilon_0)^{-1} \hat{e}^* \cdot \chi \cdot \hat{e} \quad (4)$$

로 일어나는데 \hat{e} 는 입사광의 단위 편광벡터이다. n 은 방향을 고려한 매질의 굴절율이다.

Gaussian광이 입사했을때, 위에서 구한 식(2)를 식(3)과 (4)에 넣어서 실제적인 계산을 해보면 유도되는 굴절을 분포는 입사광이 상광선인 경우에는

$$n_{ord} = -\frac{n_o^3}{2} r_{13} E_y \sin\theta \quad (5)$$

이고, 이상광선인 경우에는

$$n_{ext} = -\frac{\sin\theta}{2n_e(\theta)} E_y [n_o^4 r_{13} \cos^2\theta + 2n_o^2 n_e^2 r_{51} \cos^2\theta + n_e^4 r_{33} \sin^2\theta] \quad (6)$$

이다. 위에서 구한 식들 (2)와 (5)를 그림(1)에 나타내었다. (a)는 입사광의 Gaussian 강도 분포를 나타내고, (b)는 광굴절 효과에 의해 유도된 공간 전하장 (E_y), 그리고 (c)는 입사광의 경로상에 유도되어진 굴절을 나타내는데, 강도가 강한 입사광의 중심부분에서 프리즘의 효과가 나타남을 알 수 있다. 따라서 입사된 광이 프리즘의 효과를 받아 그림에서 오른쪽으로 퍼져나가게 된다. 이 현상을 asymmetric self-

defocussing 효과라 한다. 식(5)와(6)은 상광선과 이상광선이 입사되었을때 유도되는 굴절을 변화를 비교해본 것인데 r_{51} 이 r_{13} 보다 10^2 배 더 크므로 이상광선의 효과가 상광선보다 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 따라서 자기집핑 위상공액파를 발생시키기 위해서는 이상광선을 사용해야한다.

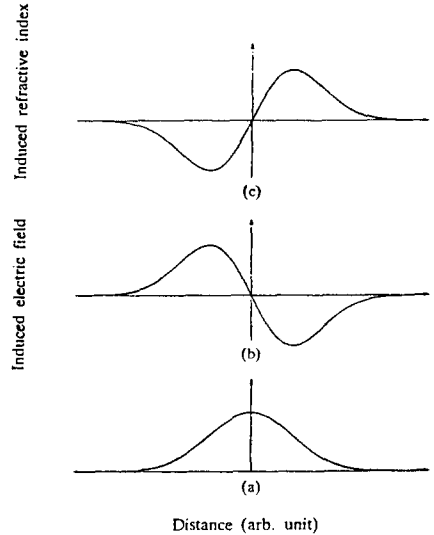


그림 1. Gaussian 강도 분포의 광이 입사된 경우 광굴절 효과에 의해 유도된 굴절을 분포: (a) 입사광의 Gaussian 강도 분포. (b) 유도된 공간전하장. (c) 유도된 굴절을 분포.

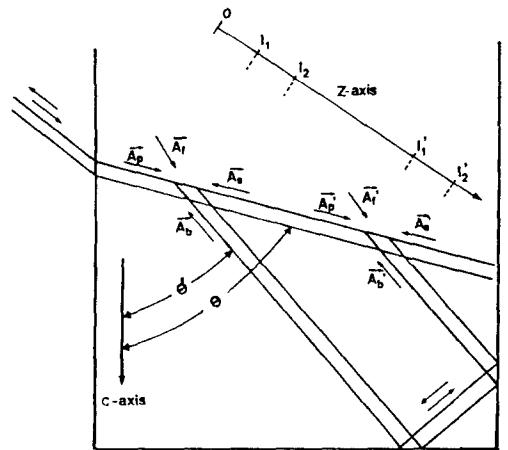


그림 2. 두 작용지역이 있을 때 4광파 혼합 mechanism.

2-2. 자기편평 위상공역의 반사율 유도

asymmetric self-defocussing 효과가 일어난 후에 생기는 작용 지역의 수는 광이 입사되는 높이에 좌우되는데, 두 개의 작용 지역만이 있는 경우에 위상공역 파의 반사율에 대한 표현을 구해보자. 이때 각 지역에서 DFWM이 일어나는 구조는 그림(2)와 같이 나타나어지므로 두개의 작용 지역에서 일어나는 DFWM의 효과를 연립해서 풀어야 하는데, 먼저 한 작용 지역에서 매질의 흡수는 없다고 간주하고 투과형 격자만을 고려해서 풀어본다. 이 때의 coupled 된 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dA_s}{dz} &= -\frac{\gamma}{I_0}(A_f A_p^* + A_b^* A_s) A_b \\ \frac{dA_p^*}{dz} &= -\frac{\gamma}{I_0}(A_f A_p^* + A_b^* A_s) A_f^* \\ \frac{dA_f}{dz} &= -\frac{\gamma}{I_0}(A_f A_p^* + A_b^* A_s) A_p \\ \frac{dA_b^*}{dz} &= -\frac{\gamma}{I_0}(A_f A_p^* + A_b^* A_s) A_s^* \end{aligned} \quad (7)$$

한 작용 지역안에서 그림(2)의 z축에 따라 다음과 같은 양들은 상수가 된다.

$$\begin{aligned} A_f A_b + A_s A_p &= c \\ I_f + I_p &= d_1 \\ I_b + I_s &= d_2 \end{aligned} \quad (8)$$

식(7)을 식(8)의 양들로 표현하고 그것을 풀어 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{A_f}{A_b^*} &= -\frac{[\Delta-r]\alpha e^{\mu z} - [\Delta+r]e^{-\mu z}}{2c^*(\alpha e^{\mu z} - e^{-\mu z})} \\ \frac{A_s}{A_p^*} &= -\frac{[\Delta-r]\beta e^{\mu z} - [\Delta+r]e^{-\mu z}}{2c^*(\beta e^{\mu z} - e^{-\mu z})} \\ \Delta &= d_2 - d_1 \\ r &= (\Delta^2 + 4|c|^2)^{1/2} \\ \mu &= \frac{\gamma r}{2I_0} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 α, β 는 적분 상수로서 경계조건으로 정해진다.

두번째 작용 지역에서도 마찬가지로 상수 c', d_1', d_2' 와 α', β' 를 취하면 똑같이 표현된다. 그리고 두 작용 지역간에 존재하는 경계 조건과 상수가 되는 양들간에 존재하는 관계들을 이용하여 위상공역의 반사율을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= |A_s(l_1) / A_p^*(l_1)|^2 \\ &= \frac{-a(r)b(r)}{4(1-r^2)\tanh^4(\frac{\gamma l}{2})} \\ a(r) &= r^2[1 - \tanh^2(\frac{\gamma l}{2})] \\ b(r) &= [r - 2\tanh(\frac{\gamma l}{2})]^2 - r^2 \tanh^2(\frac{\gamma l}{2}) \end{aligned} \quad (10)$$

결론적으로 위상공역 반사율은 γ 와 r 의 함수인데, r 은 γ 와 L 로써 정해지는 양이므로 γ 와 L 로써 정해지게 된다. 여기에서 γ 는 coupling constant로서

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\omega E_{eff}}{2nc \cos(\frac{\theta-\theta'}{2})} \\ E &= \frac{k_B T}{c} \frac{k}{1 + (k/k_0)^2} \\ r_{eff} &= [n_0^4 r_{13} \cos \theta \cos \theta' + 2n_0^2 n_0^2 r_{42} \times \cos^2(\frac{\theta + \theta'}{2}) \\ &\quad + n_0^4 r_{33} \sin \theta \sin \theta'] \times \sin(\frac{\theta + \theta'}{2}) \end{aligned} \quad (11)$$

로 주어지고, l 은 작용 지역의 유효 길이(effective length)로서

$$l = \frac{4\omega_0}{\sin(\theta - \theta')} \cos(\frac{\theta - \theta'}{2}) \quad (12)$$

로 주어진다. 그리고 L 은 한 작용 지역에서 다른 작용 지역으로 광이 진행되는 동안 생기는 loss이다.

3. 실험 및 결과

실험의 장치도는 그림(3)과 같다. 광원으로 514.5nm의 Ar⁺레이저를 사용 하였고, A는 입사 강도를 조절하기 위한 attenuator이고, P는 asymmetric self-defocussing 효과가 큰 이상광선을 만들기 위한 편광기이다. 그리고 L1과 PH는 Gaussian 강도 분포를 얻기 위한 spatial filtering 장치이다. Filtering된 광은 L2에 의해 평행광이 되고, L3에 의해 BTO에 입사되어진다. 입사 강도를 측정하기 위해 PM을 사용했고, L4와 PD 을 이용해서 입사광과 반대 방향으로 반사되어진 위상 공역파의 반사율과 시간 의존성을 측정하였다. 결정 내부의 사진 촬영은 촛점 거리가 5cm와 10cm인 렌즈 두 개를 사용하여 필름막에 두 배의 상이 맺히도록 하였다.

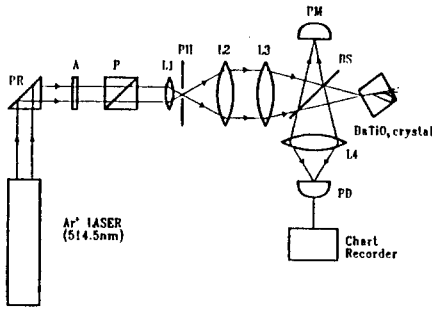
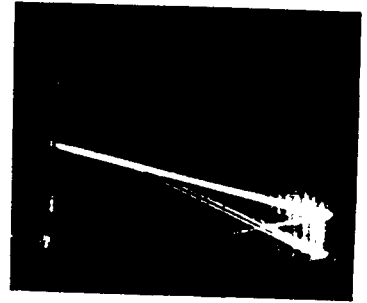


그림 3. SPPC의 실험 장치도. PR:prism, A:attenuator, P:polarizer, L:lens, PH:pin-hole, PM:power-meter, BS:beam splitter, PD:photo-diode.



(b)

그림 4. BTO 단결정내의 광의 경로 사진: (a) asymmetric self-defocussing 효과. (b) 두 작용 지역의 형성.

그림(4)의 (a)는 입사광이 한쪽 방향(광축 방향)으로 적이는 asymmetric self-defocussing effect를 보여주고 있다. 그림(4)의 (b)는 두 개의 작용 지역이 생겼을 때를 보여주는 사진이다. 이론으로 유도한 반사율과 비교해 보기위해 입사각을 변화시키면서 두 작용 지역만이 존재할 때를 찾아내어 사진을 찍었고 그 때의 위상공액 반사율을 측정하였다. 측정된 최대 반사율은 48%이다. 측정된 반사율과 이론치와의 비교는 그림(5)에 나타나 있다. 실험치와 이론치를 맞추어주는 Loss L의 값은 0.45이었다. 그림(6)은 광의 강도에 따른 위상 공액파의 반응 시간을 측정 한 것으로 강도와 반응 시간이 거의 로그적으로 비례함을 보이며 $\tau = 36I^{-0.79}$ 의 관계를 보인다. 여기에서 반응시간은 정상 상태의 신호의 e^{-1} 에 해당하는 신호에 도달하는 시간을 말한다.

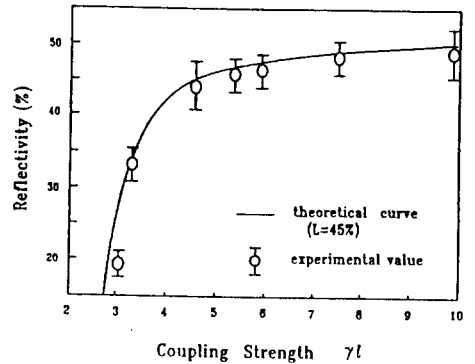
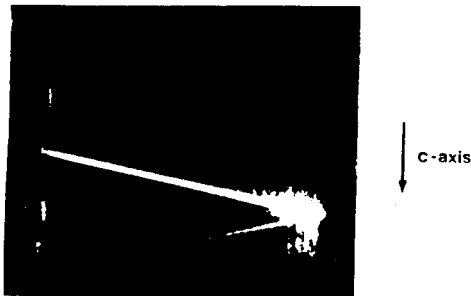


그림 5. coupling strength γ/l 에 대한 위상공액 반사율.



(a)

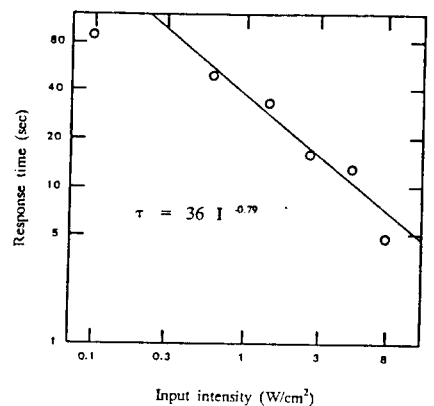
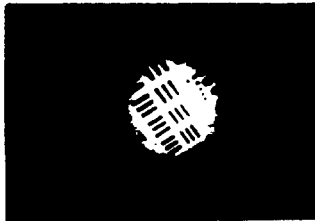


그림 6. 입사 강도에 대한 위상공액파의 response time τ . 여기서 τ 는 위상공액파의 정상치의 $1/e$ 에 해당하는 신호에 도달하는 시간을 말한다.

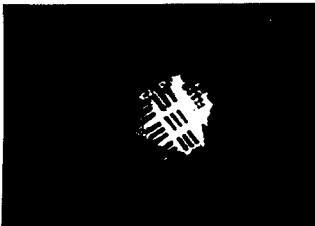
위상공액파가 실제로 발생되는가를 알아보기 위해 상 복원 실험을 하였다. 위상왜곡판은 집착제 epoxy를 유리판에 얇게 발라서 만들었고 왜곡판을 지날때 강도에는 변화를 주지않고 위상에만 왜곡을 주는 부분을 찾아내어 실험하였다. mask는 상 복원의 정도를 알아볼 수 있도록 resolution chart를 사용하였다. 그림(7)은 위상공액파의 상 복원을 보여주는 실험 결과로서 (a)는 왜곡판이 없고 위상공액경(BTO결정)만 있는 경우로서 입사되는 깨끗한 상을 보여준다. (b)는 일반적인 거울로 반사시켜 위상왜곡판만을 두 번 지난 경우로서 입사된 상이 분간할수 없을 정도로 찌그러져 있음을 볼수있다. 그리고 (c)는 SPPC에 의해 발생된 위상공액파가 (b)와 같이 찌그러진 영상을 깨끗한 원래의 영상으로 복원시켜준 것을 보여준다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. SPPC에 의한 상 재생: (a) 왜곡판이 없는 경우 위상공액 상. (b) Al 거울에 의해 반사되어 왜곡판을 두번 지난 상. (c) 왜곡판이 있을 때 위상공액경에 의해 반사되어 왜곡판을 한번 더 지난 상.

4. 결 론

광굴절 결정인 BaTiO₃ 단결정을 사용하여 SPPC 실험을 수행하였다. 그리고 작용 지역이 두 개만 생길 때에 측정된 위상공액 반사율에 일치하는 이론의 L값은 0.45이었다.

자기펄핑 위상공액파의 반사율은 최고 48%까지 측정되었으며, 높은 질의 위상 보정 능력을 갖고 있음을 판측하였다. 발생하는 위상공액파의 진폭이 정상상태의 1/e에 도달하는 response time은 입사 강도에 대해서 $\tau = 36 \times I^{-0.79}$ sec의 관계를 가진다.

참고 문헌

1. C.R. Giuliano, Physics Today April, 27(1981)
2. B.Ya. Zel'dovich, V.I. Popovichev, V.V. Ragulsky and F.S. Faizullov, JETP Lett. 15, 109 (1972)
3. R.W. Hellwarth, J. Opt. Soc. Am. 67, 1 (1977)
4. J. Feinberg, Opt. Lett. 7, 486 (1982)
5. J. Feinberg, J. Opt. Soc. Am. 72, 46 (1982)
6. K.R. MacDonald and J. Feinberg, J. Opt. Soc. Am. 73, 548 (1983)