

## LiNbO<sub>3</sub>:MgO 결정에서 광굴절 격자의 회절 특성

이재철 · 장지웅 · 김준태 · 신승호

강원대학교 물리학과

(1999년 6월 18일 받음, 1999년 9월 22일 수정본 받음)

4% 몰의 MgO가 도핑된 광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 결정에 기록된 광굴절 격자의 회절 효율과 응답시간을 측정하였다. 이 실험에는 고출력 펄스 Nd:YAG 레이저(Q-switch mode,  $\lambda = 532$  nm)와 연속 발진 아르곤 이온 레이저( $\lambda = 514.5$  nm)가 사용되었다. 두 종류의 레이저 광속에 대한 실험에서 광학계의 배열을 동일하게 하고 2광과 혼합 조건에서 레이저 광속의 세기를 1.6~100W/cm<sup>2</sup>까지 변화시켜가며 최대 회절 효율과 기록 및 소거시의 응답시간을 측정하였다. 두 실험에서 얻은 결과를 비교하고 분석하였다.

### I. 서 론

광굴절 효과는 A. Ashkin 등에 의해 1966년 처음 발견된 이후 이론적으로 또 실험적으로 많이 연구되어 왔다.<sup>[1]</sup> 그 후 광굴절 효과는 BaTiO<sub>3</sub>, KNbO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, Sr<sub>1-x</sub>Ba<sub>x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (SBN), Ba<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>K<sub>1-y</sub>Na<sub>y</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>15</sub>(KNSBN), Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>(BSO), Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>(BGO), GaAs, InP, CdTe 등의 전기광학 결정에서 나타나는 것으로 밝혀졌으며,<sup>[2]</sup> 이 가운데 파이로전기적(pyroelectric) 결정인 LiNbO<sub>3</sub>는 광학적으로 데이터를 저장하고 재생할 수 있는 우수한 성질을 가지며,<sup>[3]</sup> 3차원의 저장 용량이 우수한 기록 매질로서 쉽게 큰 결정들을 키울 수 있다.<sup>[4]</sup> 또한, 적당한 농도(<5%)의 MgO를 LiNbO<sub>3</sub>에 첨가하면 fanning효과가 감소하고 반응시간이 단축되며 광학적 손상(optical damage)에 강한 특성을 나타내는 것으로 알려져있다.<sup>[5]</sup> 광굴절 결정에서 홀로그래프의 기록은 cw와 펄스가 모두가 가능한데, 펄스 레이저와 같은 고출력 레이저를 사용하면 기록시간을 단축시킬 수 있으며 또, 펄스당 높은 에너지를 이용해 광굴절 결정에 영구적인 굴절율의 정착,<sup>[6]</sup> 순간적 변화를 요구하는 이중 홀로그래피, 상호 여기 위상공액(mutually-pumped phase conjugation)에의 응용,<sup>[7]</sup> 광굴절 매질의 띠 구조 연구<sup>[8]</sup> 등이 가능하다. 이와 같이 높은 광세기를 이용한 광굴절 매질의 기록 및 소거 특성에 관한 연구는 매우 흥미있는 분야이다. 본 논문에서는 고출력 펄스 레이저(Nd:YAG 2차 조화파,  $\lambda = 532$  nm)를 사용하여 4% 몰의 MgO가 도핑된 광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 결정에 기록된 광굴절 격자의 회절 특성을 조사하고, 같은 광학계의 배열에서 연속발진 레이저(Ar ion laser,  $\lambda = 514.5$  nm)를 사용하여 같은 실험을 반복한 후 두 결과들을 비교하였다.

이 논문은 다음 장에 실험방법을 소개하고 이어서 실험 결과, 요약순으로 이루어져 있다.

### II. 실험방법

본 연구에서는 MgO가 4% mol 첨가된 LiNbO<sub>3</sub>(5 mm×10 mm×10 mm)를 사용하였다. 동일한 2광과 혼합의 광학적 배열

에서 연속 기록 광속과 펄스 기록 광속을 각각 사용하여 두 가지의 서로 다른 실험을 수행했다. 연속적인 기록 광속으로는 아르곤 이온 레이저( $\lambda = 514.5$  nm)가 사용되었으며, 펄스 기록 광속으로는 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파( $\lambda = 532$  nm)를 Q-switch 모드(최대 에너지=200 mJ)에서 사용하였다. 펄스의 반복 비율은 10 Hz이며 펄스의 폭은 6-7ns(FWHM)이다. 탐사파로는 두 경우 모두 He-Ne 레이저( $\lambda = 633$  nm)를 사용하였다. 그림 1의 (a)에 연속 발진 레이저를 이용한 실험 장치도를 나타내었다. 아르곤 이온 레이저에서 나오는 이상편광(extraordinary polarization) 광속은 반파장판( $\lambda/2$ )을 지나면서 편광방향이 바뀌어 진행한다. 반파장판과 편광 광속 분할기의 조합을 이용해서 광속분할기에서 나누어진 두 기록 광속( $I_1$ ,  $I_2$ )의 세기비( $\beta = I_1/I_2$ )를 조절할 수 있었다. 광속은 편광 광속 분할기에서  $I_1$ 과  $I_2$ 로 나누어 지고,  $I_2$ 는 반파장판에 의해 이상편광 광속으로 바뀌어  $I_1$ 과 함께 결정에 입사한다 한편 그림 1의 (b)에 나타난바와 같이 Nd:YAG레이저에서 발진한 이상편광 광속은 오목 렌즈와 볼록렌즈로 구성된 '광속 세기 조절계(Beam Intensity Modifier : BIM)'를 지난다. 광속 세기 조절계는 펄스 레이저의 출력을 일정하게 고정시킨 상태에서 광속의 단위 면적당의 세기를 조절하기 위하여 설치되었다. 서로 다른 초점거리를 가진 볼록과 오목 렌즈를 조합해서 크기가 일정하게 고정된 조리개(iris)를 통과하는 광속의 단위 면적당의 세기(W/cm<sup>2</sup>)를 변화시킬 수 있다. 조리개를 통과한 광속은 광속 분할기(BS)를 지나면서 두 광속( $I_1$ ,  $I_2$ )으로 분리된다. 두 기록광속은 위의 경우에서와 같이 사잇각( $2\theta$ ) 30°를 유지하며 MgO:LiNbO<sub>3</sub>에 입사된다. 결정에 기록된 홀로그래프를 소거할 때는 신호 광속( $I_1$ )를 차단하고 펌프 광속( $I_2$ )만을 입사시켰다. 읽기 광속으로는 정상편광(ordinary polarization)의 He-Ne 레이저를( $\lambda = 633$  nm) 사용하였으며, 결정에 새겨진 격자(grating)에 의해 회절된 신호 광속( $I_s$ ) 세기의 시간에 따른 변화 즉, 회절 효율( $\eta$ )을 실시간으로 측정할 수 있도록 컴퓨터에 연결된 검출기(detector)를 설치했다. He-Ne 레이저의 출력은 시간의 변화에 대하여 안정적이므로 별도의 감시(monitoring) 장치를 설치하지 않았다.

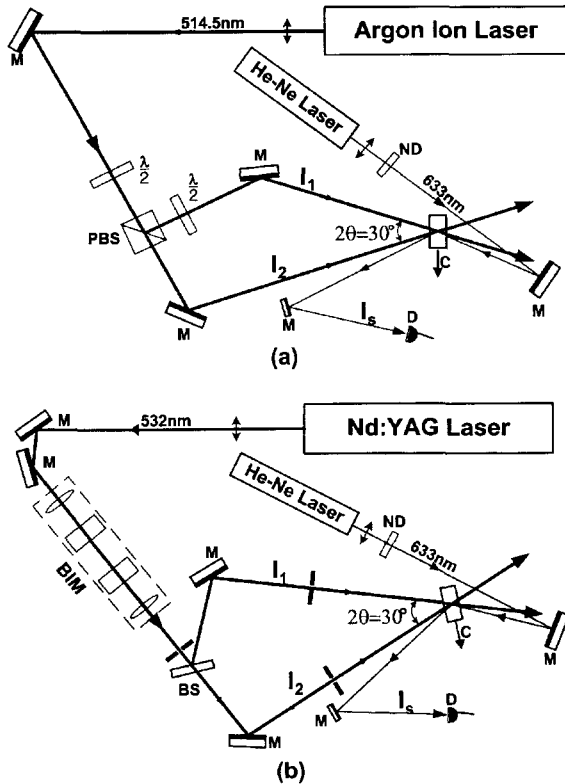


그림 1. (a) 연속 발진 레이저를 사용한 실험 장치와, (b) 펄스 레이저를 사용한 실험 장치도. 두 경우의 광학계는 동일하다(BIM : Beam Intensity Modifier, ND : Neutral Density Filter, BS : Beam Splitter, M : Mirror).

모든 실험에서 기록 광속의 세기비( $\beta = I_1/I_2$ )는 1/3로 고정시켰는데 펄스 레이저를 이용한 실험의 경우 이 값에서 최대의 회절효율을 나타낸다(실험결과 참조). 광학계의 설치가 끝나면  $I_1$ 을 차단하고  $I_2$ 를 사용하여 결정에 새겨진 홀로그램을 충분히 소거한 후  $I_1$ 을 입사시켜 홀로그램을 기록하며 신호를 관측했다. 회절 효율이 포화된 후  $I_1$ 을 차단하고 회절 격자가 소거되는 동안 회절 효율을 관측했다.

펄스를 사용한 실험에서 신호 광속과 펌프 광속의 단면적의 크기는 회절효율의 안정성에 중요한 역할을 하는 것으로 실험 결과 나타났다. 두 광속의 입사 단면적이 결정에 비해 상대적으로 크면  $I_1$ 가 증가하는 동안이나 또는 포화되었을때의 신호가 안정적이지 못하고 요동(fluctuation)이 심했다. 기록 광속의 세기가 큰 경우 결정내에서 광속의 산란 단면적이 커지게 되면 결정내의 격자점들과 광자사이의 산란이 증가하고 산란된 빛들이 회절격자를 반대로 지우는 역할을 하는 것으로 믿어진다. 본 연구에서는 결정에 입사하는 모든 광속의 직경을 신호의 안정성과 크기에 있어서 최적조건이라고 여겨지는 3 mm로 고정하였다.

### III. 실험결과

그림 2에 펄스 레이저를 사용한 실험의 경우 두 기록 광속의 세기비( $\beta = I_1/I_2$ )에 대한 회절효율( $\eta$ )을 나타내었다. 이 그

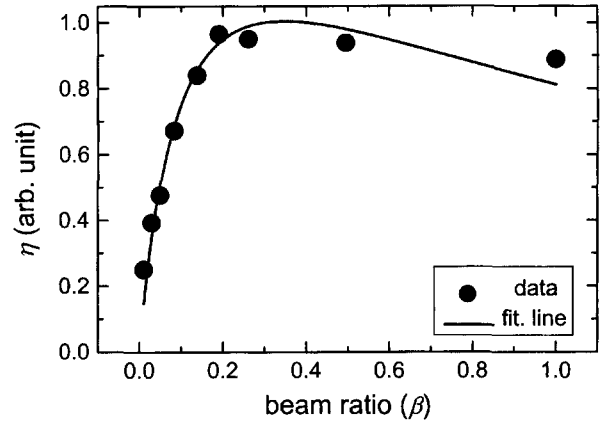


그림 2. 기록 광속의 세기비( $\beta$ )에 따른 최대 회절 효율( $\eta$ )의 변화. 원형의 점(●)들은 실험값이고 곡선은 실험값을 곡선맞춤하여 얻은 것이다.

림에서 점들은 실험에서 얻은 결과를 표시해 놓은 것이며 실선은 이 데이터를 이용하여 Kukhtarev의 식으로<sup>[10]</sup> 곡선맞춤한 결과를 나타내고 있다. 참고문헌 [10]에서는 연속발진 He-Cd 레이저를 사용해서 Kukhtarev의 식을 검증했으나, 그림에서 보는 바와 같이 펄스를 사용한 본 연구의 실험결과도 이론과 잘 일치하며  $\beta = 1/3$ 에서 회절효율이 최대를 나타내고 있다. 이에 따라 본 실험에서는  $\beta$ 를 1/3로<sup>[11]</sup> 고정시키고 연구를 수행하였다. 그림 3의 (a)와 (b)에 펄스 레이저와 연속 레이저를 사용한 실험에서 기록할 때와 소거할 때 시간에 따른 회절 효율

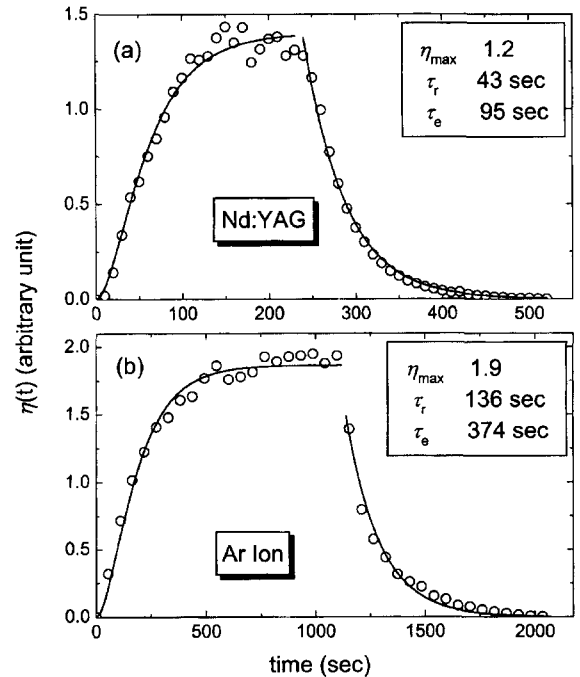


그림 3. (a) 펄스 기록 광속과, (b) 연속 기록 광속을 사용한 실험에서 회절 효율의 시간에 따른 변화. 원형의 점(○)들은 실험값이고 곡선은 실험값을 곡선맞춤하여 얻은 것이다. ( $\eta_{max}$ : 최대 회절 효율,  $\tau_r$ : 기록시의 시간 상수,  $\tau_e$ : 소거시의 시간 상수).

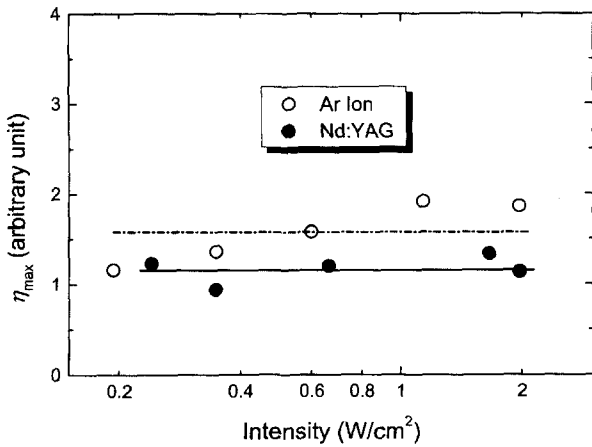


그림 4. 기록 광속의 세기( $I_2$ )에 따른 최대 회절 효율( $\eta_{max}$ )의 변화. ○와 ●는 각각 연속발진 레이저와 펄스 레이저를 사용한 실험에서 얻은 결과이고 점선과 실선은 이해를 돕기 위해 그려 넣은 것이다.

의 변화( $\eta(t)$ )를 나타내었다. (a)와 (b)에서  $I_2$ 는 각각 1.1 W/cm<sup>2</sup>과 0.7 W/cm<sup>2</sup>이다. 펄스 레이저를 사용한 실험에서 광속의 세기는 연속 발진 레이저와 비교하기 위하여 등가 광속의 세기( $I_{eq}$ )로 환산해서 표현하였다. 즉,  $I_{eq} = I_{pulse} \times 10Hz \times 8 \times 10^{-9} sec$ 이고, 여기서  $I_{pulse}$ 는 단일 펄스의 세기이다. 두 그림에서 점들은 실험값을 나타내며 실선은 다음의 이론식을<sup>[10, 12]</sup> 이용해서 곡선맞춤한 것이다.

$$\eta(t) = \left[ \eta_{max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right) \right]^2 \quad (\text{recording}) \quad (1)$$

$$\eta(t) = \left( \eta_{max} e^{-\frac{t}{\tau_e}} \right)^2 \quad (\text{erasing}) \quad (2)$$

여기서  $\eta_{max}$ 는 최대 회절 효율을 나타내며  $\tau_r$ 과  $\tau_e$ 는 각각 기록과 소거시의 시간상수이다. 그림안에 곡선 맞춤 결과 얻어진 파라미터들을 적어놓았다. 기록할때와 소거할때 두 경우의 실험에서 회절효율이 지수함수적으로 증가하고 감소하는 전형적인 특성을 나타내고있다.

그림 4에 기록 광속의 세기에 따른 최대 회절 효율( $\eta_{max}$ )를 나타내었다. 검은 점(●)과 흰 점(○)은 실험에서 얻은 결과들이고 실선 및 점선은 이해를 돕기 위해 그려 넣은 것이다. 두 경우 모두 주어진 기록 광속( $I_2$ )의 세기에서 앞서서와 같은 실험을 하고 각각의  $I_2$ 에 대하여 그림 3에서와 같은 결과를 얻었다. 다시 식 (1)을 이용한 곡선맞춤에서  $\eta_{max}$ 와  $\tau_r$ 을 구했다. 기록시의 시간 상수는 두 경우 모두 광속의 세기가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 펄스를 이용한 다른 실험들<sup>[13, 15, 25]</sup>에서도 얻어진 예상되었던 결과이다.

두 경우의 실험에서 기록시와 소거시의 광속 세기에 따른 시간 상수의 변화율(직선의 기울기)이 다르게 나타났는데 이 내용은 뒤에 소개된다. 두 경우의 실험에서 모두  $I_2$ 가 1.6 W/cm<sup>2</sup>에서 100 W/cm<sup>2</sup> 범위에서 광속의 세기에 관계없이  $\eta_{max}$ 가 일정한 것으로 나타났다. 아르곤 이온 레이저를 이용해서 본 실험실에서 수행한 MgO:LiNbO<sub>3</sub>를 사용한 4광파 혼합실험에

서도 기록 광속의 세기에 따른 최대 회절 효율의 크기가 일정한 것으로 나타났다.<sup>[16]</sup> 참고 문헌 [15]에서는 Huout와 그의 동료들이 BaTiO<sub>3</sub>:Rh를 사용해서 적외선 영역의 펄스를 이용한 2광파 혼합 실험을 했다.  $I_{eq}$ 를 0.1에서 2 W/cm<sup>2</sup>까지 변화시키며 수행한 그들의 연구에서 광속의 세기에 따른 이득(gain)이 일정한 것으로 나타났다. 비록 다른 결정을 사용했지만 본 실험에서와 아주 유사한 결과이다. Huout 등은 그들이 사용한 1.06 μm 파장대에서의 광굴절 현상이 로듐(Rh)의 정공(hole)에만 의존하는 단일 전하나르개(charge carrier) 모형으로 설명했다.

LiNbO<sub>3</sub>와 같은 광기전(photovoltaic) 매질에서 전도대에서 확산(diffusion)에 의한 전하들의 이동은 무시될 수 있으며, 이런 매질에서 공간 전하장은  $E_{sc} = j_p / \sigma_p$ 로 주어진다.<sup>[17]</sup> 여기서  $j_p$ 는 광기전 전류 밀도이고  $\sigma_p$ 는 광전도도(photoconductivity)이다. 연속적인 광속이 결정에 입사되면 광속의 세기가 낮을 때 ( $I < 10 W/cm^2$ )  $j_p$ 와  $\sigma_p$ 는 광속의 세기에 비례하고 따라서  $E_{sc}$ 가 빛의 세기에 관계없이 일정한 것으로 알려져있다.<sup>[18, 19]</sup> 이때 회절 효율은  $\eta \propto E_{sc}^2$ <sup>[12]</sup>이다. MgO를 첨가한 LiNbO<sub>3</sub>의 경우 공간 전하장이 일정하게 유지되는 문턱 세기가 증가하는 것으로 보인다. 높은 세기의 펄스 광속( $I_{eq} > 10 W/cm^2$ )과 철(Fe)이 첨가된 LiNbO<sub>3</sub>를 사용한 실험에서는 광속의 세기가 증가함에 따라 공간 전하장이 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.<sup>[20-22]</sup> 반면에 참고 문헌 [17]에 나타난 철이 첨가된 LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 실험에서는 낮은 펄스 광속의 세기 영역에서( $I_{eq} < 5 W/cm^2$ ) 최대 회절효율이 일정한 것으로 나타났다.

LiNbO<sub>3</sub>에 MgO를 첨가하면 광학적 손상에 강한 물리적 성질을 나타내는 것으로 알려졌지만 광굴절 현상을 나타내는 기본적인 기작에는 큰 변화가 없는 것으로 믿어진다. 그러나 위에서 열거한 연구에서 얻은 결과들과 본 실험에서 얻은 비슷한 결과를 놓고 그들과 같은 모형으로 기작을 설명할 수는 없다고 여겨지며, 결과에 대한 정확한 해석과 기작을 이해하기 위해 앞으로 많은 연구가 필요하다.

그림 5의 (a)와 (b)에 연속 광속을 사용한 실험과 펄스 광속을 사용한 실험에서 얻은 기록 광속( $I_2$ )의 세기에 따른 기록시 시간 상수( $\tau_r$ )와 소거시의 시간 상수( $\tau_e$ )의 변화를 비교하여 나타내었다. 원형과 삼각형의 점들은 실험에서 얻은 결과들이며 실선은  $\tau = A/I_2^\chi$ 로 곡선맞춤한 후 얻은 것이다. 여기서 A는 상수이고  $\chi$ 는 직선의 기울기를 나타내는 파라미터이다. 두 경우의 실험에서 모두  $\tau_r$ 과  $\tau_e$ 가 본 연구에서 사용한  $I_2$ 의 범위에서  $I_2$  증가함에 따라 선형적으로 감소해 감을 볼 수 있다. 홀로그래프를 기록할 때 직선의 기울기는 각각  $\chi_{Ar-Ion} = 0.6$ ,  $\chi_{Nd:YAG} = 1.7$ 이고 소거할 때는  $\chi_{Ar-Ion} = 0.3$ ,  $\chi_{Nd:YAG} = 1.9$ 이다.

단일 광굴절 준위(single photorefractive center)에 의해 격자가 형성되는 경우 지수  $\chi$ 는 1이고, 하나 이상의 준위에 의한 광굴절 효과의 경우는  $\chi \leq 1$  이라고 알려져 있다.<sup>[23]</sup> 따라서 본 실험에서 사용된 LiNbO<sub>3</sub>:MgO의 경우 두 개 이상의 전하나르개(charge carrier)준위가 격자를 형성하는데 기여하는 것으로 믿어진다. 한편 펄스 광속을 사용할 때 철이 첨가된 LiNbO<sub>3</sub>에서 광굴절 감도(photorefractive sensitivity)가 연속 광속에서의 그것 보다 약 10배 이상 높은 것으로 보고되었다.<sup>[24]</sup>

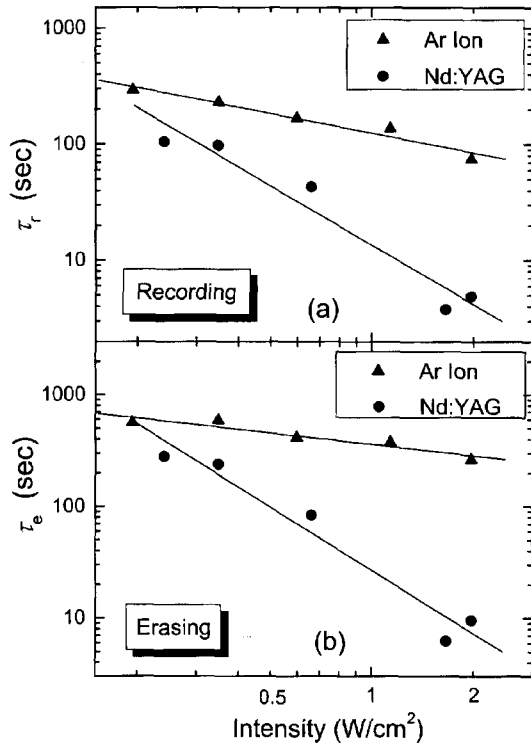


그림 5. 기록 광속의 세기( $I_2$ )에 따른 (a) 기록시의 시간 상수( $\tau_r$ )와 (b) 소거시의 시간 상수( $\tau_e$ )의 변화. ▲은 연속 기록 광속을 사용한 경우의 실험값, ●은 펄스 기록 광속을 사용한 경우의 실험값이며 직선은  $\tau = A/I_2^\chi$ 로 곡선 맞춤한 후 얻은 것이다. 여기서 A는 상수이고  $\chi$ 는 직선의 기울기이다.

또한 Horowitz 등은 BaTiO<sub>3</sub> 결정에서 파장이 1.5 μm인 펄스 기록광속을 사용해서  $\chi = 1.37$ 을 얻었다.<sup>[25]</sup> 이들은 단일 광자에 의한 광굴절 효과의 경우 지수가 0.5~1사이 에 있으나 강한 세기의 펄스광속을 사용할 경우 2 광자 흡수(two-photon absorption)에 의한 광굴절효과가 나타나며 시간상수는 광속의 세기에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 그 기작을 설명하고 있다. 한편 회절격자를 소거하는 경우도 강한 펄스 소거광속을 사용할 때의 지수가 연속 소거광속을 사용할 때 보다 큰 것으로 알려져 있으나,<sup>[26]</sup> 이의 물리적인 이유는 본 연구진이 알고 있는 한 아직 알려지지 않고 있다.

이 결과는 본 연구에서 얻은 결과를 부분적으로 이해하는데 도움을 준다. 본 연구에서 사용된 MgO를 첨가한 LiNbO<sub>3</sub> 결정에서도 두 개 이상의 전하나르개 준위가 광굴절 효과에 참여하고 있으며, 불순물 준위(impurity level)나 가전대(valance band)의 전하나르개들이  $I_2$ 가 증가하면서 광굴절 감도가 증가하는 것으로 생각된다. 이에 따라 연속 광속보다 펄스 광속을 사용할 때 그 광속( $I_2$ )의 세기에 따른 시간 상수( $\tau$ )의 증가율이 더 큰 것으로 믿어진다.

#### IV. 요약

4% 몰의 MgO가 도핑된 광굴절 LiNbO<sub>3</sub> 결정에 펄스 광속과 연속 광속을 사용하여 별도의 2광파 혼합 실험을 하였다.

기록 광속의 세기를 변화 시켜가며 광굴절 회절 격자를 기록하며 최대 회절 효율( $\eta_{max}$ )과 시간 상수( $\tau$ )를 측정하였으며, 새겨진 회절 격자를 소거하며 시간상수( $\tau$ )를 측정하고 두 종류의 광속을 사용한 실험에서 얻은 결과를 비교하였다. 2광파 혼합 실험에서 두 기록 광속의 세기비( $\beta = I_1/I_2$ )를 1/3로 고정시키고 실험을 수행했다.  $I_2$ 의 세기(intensity)를 1.6 W/cm<sup>2</sup>에서 100 W/cm<sup>2</sup>까지 변화 시킬때 두 경우의 실험에서 모두 본 실험에서 사용한  $I_2$ 의 범위에서(1.6~100 W/cm<sup>2</sup>) 최대 회절 효율이 일정하게 나타났다. 4%의 MgO가 첨가된 LiNbO<sub>3</sub> 광굴절 매질에서 상대적으로 작은 광속의 세기 범위에서 공간 전하장( $E_{sc}$ )의 크기는 광속의 세기의 변화에 무관한 것으로 믿어지며, 이는 다른 연구자들의 실험 결과에 비추어 충분히 예견되었던 결과이다. 시간상수는 기록할 때와 소거할 때 모두  $I_2$ 가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 광기전 효과를 일으키는 불순물 준위 또는 가전대의 전하나르개들의 광굴절 감도가 광속의 세기가 증가함에 따라 증가하는 것으로 믿어진다. LiNbO<sub>3</sub>에서 다른 연구자들의 연구에서와 같이 펄스 광속에 대한 광굴절 감도의 증가율이 연속 광속에 대한 그것 보다 큰 것으로 나타났다.

1970년대 초에 펄스를 이용해서 LiNbO<sub>3</sub>에 회절 격자를 새길 수 있음이 알려진 이후,<sup>[27,28]</sup> 펄스를 이용한 이 매질에 관한 많은 연구가 있어왔다. 그러나 전기 광학적 효과를 일으키는 이온의 형태나 전도대에서 이 이온들의 운동 또는, 첨가물이 만드는 에너지 준위에 관한 충분한 이해는—우리가 알고 있는 한—아직도 이루어 지지 않고 있으며, 본실험의 결과를 충분히 이해하기 위하여 계속 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(핵심전문연구과제번호 961-0206-032-1)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, Appl. Phys. Lett. **9**, 72 (1966).
- [2] See for example, Pochi Yeh, Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics (John Wiley & Sons, New York, 1993).
- [3] D. von der Linde and A. M. Glass, Appl. Phys **8**, 85 (1975).
- [4] D. A. Bryan, R. R. Rice, R. Gerson, H. E. Tomaschke, K. L. Sweeney, and L. E. Halliburton, Opt. Eng. **24**(1), 138 (1985).
- [5] Seung-Ho Shin, Scott Campbell, and Pochi Yeh, In Conference on Lasers and Electro-Optics **12**, 307 (1995).
- [6] K. Buse, S. Breer, K. Peithmann, S. Kapphan, M. Gao, and E. Krätzig, Phys. Rev. B **56**, 1225 (1997).
- [7] Huitian Wang, Nobukazu Yoshikawa, Shin Yoshikado, and Tadashi Aruga, Opt. Lett. **21**, 561 (1996).
- [8] Keiichi Okamoto, Takayuki Sawada, and Kikuo Ujihara, Opt. Comm. **99**, 82 (1993).
- [9] 예컨데 M. Ewart, I. Biaggio, M. Zgonik, and P. Günter,

- Phys. Rev. B, **49**, 5263 (1994), N. Huot, J. M. C. Jonathan, and G. Roosen, Opt. Lett. **22**, 976 (1997)를 참고.
- [10] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, Ferroelectrics **22**, 949 (1979).
- [11] 본 연구에서의 연속발전 Ar-ion 레이저를 사용한 실험의 경우 회절효율이 최대가 되는  $\beta$ 가 1/3과 다를 수 있다. 그러나 본 연구에서는 펄스를 사용한 실험의 효율을 높이고 실험의 일관성을 유지하기 위해 두 실험에서 모두  $\beta$ 를 1/3로 고정시키고 실험을 수행하였다.
- [12] M. Ewart, I. Biaggio, M. Zgonik, and P. Günter, Phys. Rev. B **49**, 5263 (1994).
- [13] Huitian Wang, Nobukazu Yoshikawa, Shin Yoshikado, and Tadashi Aruga, Opt. Lett. **21**, 561 (1996).
- [14] Moshe Horowitz and Baruch Fischer, Opt. Lett. **21**, 1120 (1996).
- [15] N. Hout, J. M. C. Jonathan, and G. Roosen, Opt. Lett. **22**, 976 (1997).
- [16] 이승우, '광굴절 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 결정의 광파 혼합 특성', 강원대학교 석사 학위 논문 (1997).
- [17] S. Breer and K. Buse, Opt. Lett. **23**, 73 (1998).
- [18] A. M. Glass, D. von der Linde, and T. J. Negran, Appl. Phys. Lett. **25**, 233 (1974).
- [19] E. Kräzig, Ferroelectrics **21**, 635 (1978).
- [20] O. Althoff and E. Kräzig, Proc. SPIE **1273**, 12 (1990).
- [21] O. Althoff, A. Erdmann, L. Wiskiott, and P. Hertal, Phys. Status Solid A **128**, K41 (1991).
- [22] F. Jermann and E. Kräzig, Appl. Phys. A **55**, 114 (1992).
- [23] N. V. Kukhtarev, Sov. Tech. Phys. Lett. **2**, 438 (1976).
- [24] Che-Tsung Chen, Dae M. Kim, and D. von der Linde, IEEE Journal of Quantum Electronics **QE-16**, 126 (1980).
- [25] M. Horowitz, B. Fischer, Y. Barad, and Y. Silberberg, Opt. Lett. **21**, 1120 (1996).
- [26] Daniel Mahgerefteh and Jack Feinberg, Opt. Lett. **13**, 1111 (1988).
- [27] T. K. Gaylord, T. A. Rabson, F. K. Tittel, and C. R. Quick, Appl. Opt. **12**, 414 (1973).
- [28] P. Shah, T. A. Babson, F. K. Tittel, and T. K. Gaylord, Appl. Phys. Lett. **24**, 130 (1974).

### Diffractive characteristics of the photorefractive gratings in LiNbO<sub>3</sub>:MgO

Jaichul Yi, Chi-Ung Chang, Juntae Kim and Seung-Ho Shin

*Department of Physics, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea*

(Received June 18, 1999, Revised manuscript received September 22, 1999)

We present the measurement of the diffraction efficiency and response time of the photorefractive grating recorded in LiNbO<sub>3</sub> photorefractive crystal doped with 4%-mole MgO. Two laser sources were used in the experiments; frequency-doubled Q-switched Nd:YAG laser ( $\lambda = 532$  nm) and cw Ar-ion laser ( $\lambda = 514.5$  nm). The same optical geometry was also used in both experiments in order to maintain the experimental consistency. Using the two-wave mixing scheme in both experiments we measured the maximum diffraction efficiency in the range of beam intensity of 1.6~100 W/cm<sup>2</sup>, and the response times for both cases of recording and erasing. Two sets of results obtained from the experiments are compared and analyzed.