

광굴절 결정에서의 홀로그램 Fixing에 관한 연구

황 성 모, 이 혁
서울대학교 공과대학 전기공학과*

Hologram Fixing in Photorefractive Crystal

Seong-Mo Hwang, Hyuk Lee
Dept. of Electrical Engineering, Seoul National Univ.

ABSTRACT

Volume holograms recorded in photorefractive materials can find important applications in optical memories and optical computing systems. One problem with a photorefractive hologram is that it gets erased by the readout light. Nondestructive readout can be achieved by hologram fixing, and several fixing methods have been reported.

Fixing is accomplished by thermally activated motion of an unknown ionic defect, which neutralizes the electronic space-charge patterns. At room temperature the ionic patterns are stabilized. When the electrons are partially redistributed by light, a net space-charge pattern appears, and the fixed hologram can be read out.

In this paper, theoretical modeling and some experimental results are presented for thermal fixing of volume phase holograms in photorefractive $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Thermal fixing can be done during or after recording and depends on fixing temperature (100 ~ 200°C range) and grating length. Fixed grating can be erased completely at the temperature over 300°C. Theoretical modeling shows well the compensation of electronic grating by ionic grating and is in good agreement with experimental results. In experiments the dependence of thermal fixing on temperatures and grating lengths is investigated.

1. 서론

광굴절 체적 홀로그램은 광메모리와 광계산 시스템에서 중요하게 응용될 수 있다. 그런데, 광굴절 홀로그램을 이용하는데 있어서 한가지 문제점은 홀로그램이 읽어내는 빛에 의해 지워진다는 것이다. 따라서, 많은 수의 홀로그램을 기록하고 읽어낼 때에 저장된 정보의 손실을 가져오게 된다.

체적 홀로그램에서의 이러한 원치않는 지워짐을 피하고, 비파괴적으로 읽어내기 위한 연구가 진행되어 왔다. [1~3] 이러한 "fixing" 방법으로 대표적인 것이 열적 fixing과 전기적 fixing 및 이 두가지를 결합한 형태이다. 열적 fixing은 대부분의 광굴절 결정에서 이루어졌다는 것이 보고된 반면, 전기적 fixing은 제한된 종류에서만 성공하였다.

본 논문에서는 높은 민감도와 좋은 다중 저장성 등 여러가지 훌륭한 특성으로 인하여 다양한 용도에 쓰이는 광굴절 결정 중의 하나인, 철이 도핑된 Lithium niobate ($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$)에서의 열적 fixing에 대한 연구를 주로하며 fixing하는 온도 및 격자 간격과 같은 변수들이 fixing 효율에 미치는 영향에 대해서 알아보려고 한다.

2. 본론

2.1 이론적 해석 및 모델링

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 에서의 홀로그램은 광굴절 효과에 의해 기록될 수 있는데, 그 개략적인 원리는 다음과 같다. [4] 즉, Fe 불순물에 포획된 전자들은 two-wave mixing 방법에 의해 광여기되고, 이 전자들은 계속해서 확산을 통해 재배치된다. 각각의 광여기된 전자들은 양이온 전하를 남겨두게되어 전자가 재결합할 때 일정하지 않은 공간-전하 전계를 만들고, 이 전계는 전기-광학 효과를 통하여 굴절율을 변조시킨다.

fixing은 결정내에 존재하는 이온 결함의 열적으로 활성화된 운동으로 이루어지며 홀로그램을 기록하는 동안 또는 기록하고 난후에 수행되어질 수 있다. 즉, 고온에서 이 이온 결함들이 전자에 의한 공간-전하 패턴을 중성화시킨다. 이 과정에서 전자에 의한 패턴은 상대적으로 안정하게 남아있기 때문에 이온에 의한 전하패턴은 원래의 홀로그램의 복제품으로 형성된다. 상온에서 이온 패턴은 안정화되며, 전자들이 입사하는 빛에 의해 재배치될 때 순 공간-전하 패턴이 나타나며 따라서 fixed 홀로그램을 읽어 낼 수 있다. [3] 광굴절 결정에서 fixing이 일어나기 위해서는 결정내에 그것을 가능하게 하는 이온이 존재해야 하는데, $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 에서 fixing을 가능하게 하는 이온에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 결정 성장 과정에서 수분 환경에서 첨가된 OH^- 이온에 기인한 양성자도 그 중의 유력한 한가지 이온인 것으로 보고되어 있으며, 그 밀도는 $10^{17} / \text{cm}^3 \sim 10^{18} / \text{cm}^3$ 정도이다. [5, 6]

1차원 상황을 가정한 물질 방정식으로 부터 주계-격자(전자 패턴)와 양성자-격자(이온 패턴)가

고온에서 증성화되는 식을 구할 수 있으며 이를 $LiNbO_3:Fe$ 에 적용하여 시뮬레이션하였다. 1차원 상황에서의 물질 방정식은 다음과 같다. [7, 8]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (s + \sigma I)D - \gamma n A + \frac{1}{e} \frac{\partial j_e}{\partial x}, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{\partial A}{\partial t} = (s + \sigma I)D - \gamma n A, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial j_h}{\partial x} = -e \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1d)$$

$$j_e = e\mu_n n E + D_e e \frac{\partial n}{\partial x} + e\sigma L_n D I, \quad (1e)$$

$$j_h = e\mu_p H E - D_h e \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (1f)$$

전자밀도의 기여는 무시될 수 있으며, 따라서 ρ 는 다음과 같다.

$$\rho = [(H - H_0) - (D - D_0)]e \quad (2)$$

상온에서 홀로그래프를 기록한 후, 고온 T_f 에서 fixing 을 시키는 경우 격자가 시간에 따라 변화하는 식을 위의 물질 방정식으로 부터 구할 수 있다. 작은 ripple ($m \ll 1$) 을 지니는 정현 광파형 (sinusoidal light pattern) 을 가정하면

$$I = I_0(1 + m \cos Kx), \quad (3)$$

로 표현된다. 이때, fixing 과정에서의 초기조건은 다음과 같다.

$$D = D_0 + M_0 \cos Kx, \quad (4a)$$

$$A = A_0 - M_0 \cos Kx, \quad (4b)$$

$$H = H_0, \quad (4c)$$

T_f 에서의 열처리 순간에는 양성자 밀도 패턴도 정현적으로 나타나므로, 물질 내에는 세계의 홀로그래픽 격자가 같이 존재한다. 그 식은 다음과 같이 나타나고

$$D(t) = D_0 + M(t) \cos Kx, \quad (5a)$$

$$A(t) = A_0 - M(t) \cos Kx, \quad (5b)$$

$$H(t) = H_0 + h \cos Kx. \quad (5c)$$

따라서, 이온 밀도는 다음과 같다.

$$\rho = (h - M)e \cos Kx. \quad (6)$$

식 (5) 를 식 (1) 에 대입하고 준평형 상태 ($\frac{\partial n}{\partial t} = 0$) 를 가정하면 아래와 같은 미분방정식을 얻는다.

$$\dot{h} = -\left(\frac{\mu_p H_0}{\epsilon} e + D_h K^2\right)h + \frac{\mu_p H_0}{\epsilon} e M, \quad (7)$$

$$\dot{M} = -\left(\frac{\mu_p H_0}{\epsilon} e + \beta D_e K^2 n_0\right)M + \frac{\mu_p H_0}{\epsilon} e h, \quad (8)$$

식 (7) 을 미분하여 정리하면 양성자 밀도 진폭에 대한 다음의 이계 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\ddot{h} + (\Gamma_e + \Gamma_h)\dot{h} + (\Gamma_e \Gamma_h - A_e A_h)h = 0, \quad (9)$$

여기에서

$$\Gamma_e = \frac{\mu_e n_0}{\epsilon} e + \beta D_e K^2 n_0, \quad (10a)$$

$$\Gamma_h = \frac{\mu_h H_0}{\epsilon} e + D_h K^2, \quad (10b)$$

$$A_e = \frac{\mu_e n_0}{\epsilon} e, \quad (10c)$$

$$A_h = \frac{\mu_h H_0}{\epsilon} e. \quad (10d)$$

M 에 대해서도 완전히 유사한 식을 구할 수 있다. 이로부터 해를 구하면

$$h(t) = \frac{A_h M_0}{\alpha_2 - \alpha_1} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (11)$$

$$M(t) = \frac{M_0}{\alpha_2 - \alpha_1} [(\alpha_2 - \Gamma_e) \exp(-\alpha_1 t) - (\alpha_1 - \Gamma_e) \exp(-\alpha_2 t)], \quad (12)$$

여기에서

$$\alpha_{1,2} = \frac{\Gamma_h + \Gamma_e \pm [(\Gamma_h - \Gamma_e)^2 + 4A_e A_h]^{1/2}}{2} \text{ 이다.}$$

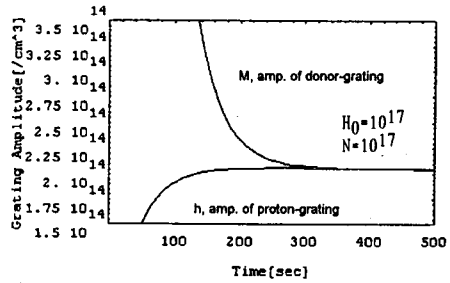


그림 1. 주계-격자와 양성자-격자의 시간적 변화 ($T_f = 150^\circ\text{C}$, $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$)

2.2 실험 방법 및 결과

fixing 실험을 수행하기 위한 실험 장치도는 아래와 같다.

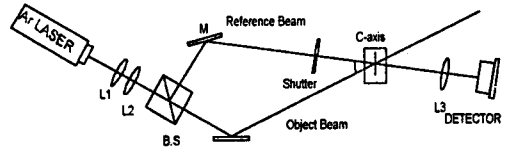


그림 2. Fixing 실험을 위한 실험 장치도

먼저 기준빔 (reference beam) 과 목적빔 (object beam) 을 결정 내에서 교차시킨 상태에서 약 5분간 회절격자를 새긴다. 회절 효율이란 격자를 새기고 나서 기준빔을 차단시켰을 때 기준빔의 방향으로 회절되어 나오는 목적빔의 세기를 입사 목적빔의 세기로 나눈 값이다. 이 회절 효율은 회절격자 간격이 길어지면 커지는데 아르곤 레이저를 사용할 때 30% 정도를 넘지 않는다. 홀로그래프가 기록된 결정을 떼어내어 전기기로 넣고 가열한다. fixing 을 위한 가열 온도는 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 범위인데, 온도에 따른 최적 시간을 반복 실험을 통하여 찾아보았다.

가열된 결정을 상온까지 식힌 후에 제자리에 정확히 놓고, 목적빔만을 계속해서 입사시킨 상태에서 시간에 따른 회절효율의 변화를 기록한다. 처음

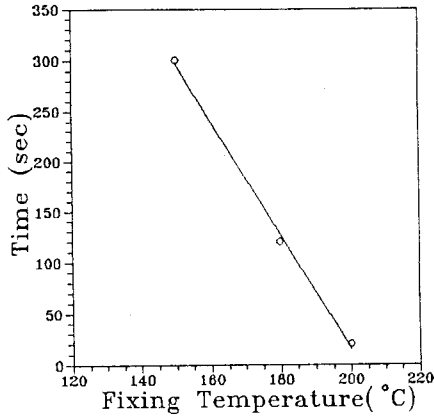


그림3. Fixing 온도에 따른 최적 가열시간

에는 회절되는 빛이 거의 없는데 이는 이온 패턴이 전자에 의한 전계를 완전히 중화시켰음을 나타낸다. 점점 회절 효율이 증가하여 최고치에 도달한다. 이렇게 해서 얻은 fixed grating은 상온에서 거의 지워지지 않는다. 그러나, ~300°C의 고온을 가하면 fixed grating을 완전히 지울 수 있으며 [9], 기준빔과 목적빔의 교차 각도를 변경시킴으로써 격자 간격을 바꾸어가며 실험을 반복 실시하였다.

원래의 홀로그램이 읽어내는 빛에 의해 지워지면서 감소하는 상태와 fixing 후의 회절효율의 변화를 나타내는 대표적인 실험치는 아래 그림과 같다.

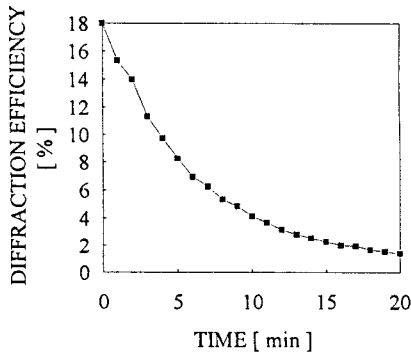


그림4. 시간에 따른 홀로그램 격자의 지워짐 (격자 간격 $\Lambda=0.36\mu\text{m}$)

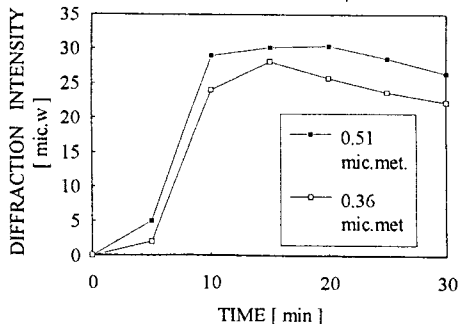


그림5. 격자간격에 따른 fixed 홀로그램의 변화

3. 결론

본 논문에서는 광굴절 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 결정에서의 thermal fixing에 대한 이론적 모델링 및 실험을 수행하였다. 이론적 모델링은 고온에서 전자에 기인한 격자가 이온에 기인한 격자에 의해 중성화되는 것을 잘 나타내고 있으며, 실험 결과와 일치함을 알 수 있다. 실험을 통하여 열적 fixing이 격자 간격과 온도에 따라 변하는 정도를 구하였다. 격자의 고온에서의 중성화 및 delevping 과정은 이론과 잘 일치함을 볼 수 있다. 다만, 'fixed' 홀로그램이 읽어내는 동안 조금씩 감소하는 것으로 보아 아직까지 완전한 fixing을 이루었다고 보기에는 힘드므로 이 부분에 대한 이론적인 해석이 요구됨과 동시에 지속적인 실험을 할 필요가 있겠다.

이 연구를 바탕으로 저장된 정보를 '빠르게' fixing할 수 있는 방법을 개발한다면, 광굴절 결정을 고속 동작 메모리 및 영구적, 읽기 전용, 3차원 정보 저장에 쓸 수 있는 기초를 마련 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. J. J. Amodei and D. L. Staebler, "Holographic pattern fixing in electrooptic crystals," *Appl. Phys. Letters*, vol. 18, pp. 540-542, 1971.
2. J. J. Amodei, W. Phillips, and D. L. Staebler, "Improved electrooptic materials and fixing techniques for holographic recording," *Appl. Opt.*, vol. 11, pp. 390-395, 1972.
3. D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips, and J. J. Amodei, "Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, pp. 182-184, 1975.
4. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 729-733, 1991.
5. H. Vormann, G. Weber, S. Kapphan, and E. Kratzig, "Hydrogen as origin of thermal fixing in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$," *Solid State Comm.*, vol. 40, pp. 543-545, 1981.
6. W. Bollman, "Diffusion of hydrogen (OH^- ions) in LiNbO_3 crystals," *Phys. Stat. Sol. (a)*, vol. 104, pp. 643-648, 1987.
7. W. Meyer, P. Wurfel, R. Munser, and G. Muller-Vogt, "Kinetics of fixations of phase holograms in LiNbO_3 ," *Phys. Status Solidi (a)*, vol. 53, pp. 171-180, 1979.
8. M. Carrascosa and F. Agullo-Lopez, "Theoretical modeling of the fixing and delevping of holographic gratings in LiNbO_3 ," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, pp. 2317-2322, 1990.
9. V. V. Kulikov and S. I. Stepanov, "Mechanisms of holographic recording and thermal fixing in photorefractive $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$," *Sov. Phys. Solid State*, vol. 21, pp. 1849-1851, 1979.