

## 빔세기에 따른 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정의 회절효율

정태혁 · 강기형 · 정석문 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과

(1993년 8월 9일 받음)

본 논문에서는 광굴절 특성을 나타내는 파라메타중 회절효율의 전도도비( $\sigma_1/\sigma_2$ ) 의존성에 관해 연구하였다. 전도도비는 입사빔의 세기에 의존하며, 압전도도  $\sigma_2$ 가 광전도도  $\sigma_1$ 에 비해 무시할 수 없을 때 입사빔의 세기에 따라 전도도비가 변화되고, 전도도비의 변화는 결정 내의 정전기장에 영향을 주게 된다. 정전기장의 변화는 전기광학효과에 의해 굴절율을 변화시키고, 굴절율의 변화는 회절효율과 관계한다. 개방회로 상태에서 0.1%/mole Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정과 LiNbO<sub>3</sub> 웨이퍼에 Fe를 증착시킨 LiNbO<sub>3</sub>에서 두 입사빔의 세기비와 입사빔세기의 합을 다르게 할 때 회절효율을 측정하고 이론값과 비교하였다.

### I. 서 론

미래의 통신의 특징은 3M(Multi-media, Multi-rate, Multi-point)이라 한다. 즉, 다자간에 다양한 통신접속(Multi-point)을 설정하고, 이 위에 여러가지 정보(Multi-media)를 교환하는 데, 이를 위해 어떠한 속도(Multi-rate)의 정보라도 쉽게 처리할 수 있는 통신방식을 사용한다는 것이다. 그러므로, 대량의 정보처리에서 빠른 속도의 교환과 전송은 필수적이다. 초고속 교환방식의 연구로는 특히 광기술을 이용한 광교환이 주목받고 있다. 그러나, 새로운 교환방식을 이용하여 속도를 높이다라도 이 위에서 동작하는 메시지전달용 망계층 또는 트랜스포트계층의 성능이 낮으면 실제로 고속화의 효과는 없게 된다. 이에 대한 해결책의 하나로 멀티프로세서와 병렬 처리구조를 들 수 있다.<sup>[1]</sup> 프로세싱요소간 접속(interconnection)은 병렬컴퓨팅에 필수적이며, 광접속의 경우 전자소자를 이용하는 경우보다 훨씬 뛰어난 광대역, 고속 처리 등의 특성을 가진다.<sup>[2]</sup>

광굴절 효과를 나타내는 광굴절 물질은 저출력 동작, 큰 용량의 저장능력, 방향성 에너지 전달, 실시간 응답 등의 특성에 의해 광 프로세서로서 뛰어난 성능을 나타낼 수 있다.<sup>[3]</sup> 광굴절 물질은 신경회로망에 필수적인 광접속뿐만아니라<sup>[4,5]</sup> RAM의 기능과 fixing기법에 의한 ROM의 기능을 가지는 기억장치에 응용되고<sup>[6]</sup> 광논리소자의 구현과<sup>[7]</sup> 화상처리와<sup>[8]</sup> 패턴인식<sup>[9]</sup> 등에 응용될 수 있다. 광굴절 효과는 다음의 과정으로 설명된다. 간섭성을 가

지는 두 빔이 입사각을 가지고 결정 내에 입사되면, 두 빔의 정현파 함수적인 간섭 패턴이 생성된다. 입사된 빔에 의해 결정 내의 트랩 준위에 있는 전자들이 여기 되어 격자내를 이동하다가 새로운 역셉터 준위에 재분포하게 된다. 그 결과 입사된 빔의 간섭패턴과 같은 모양의 분포를 가지는 공간전하가 형성되고, 이런 공간전하 분포에 의해 전기장이 발생하며, 전기광학 효과에 의해 굴절율의 변화가 생기는 것을 광굴절 효과라 한다.

광굴절 물질이 광소자로서의 기능을 수행함에 있어서 회절효율은 중요한 파라메타이다. 본 논문에서는 광굴절 물질 중 전기광학 특성이 우수한 LiNbO<sub>3</sub>에 불순물 Fe를 첨가시킨 Fe:LiNbO<sub>3</sub>의 회절효율에 대해 고찰한다. 지금까지는 회절효율을 계산함에 있어서 광전도도가 압전도도에 비해 충분히 크다는 가정하에 압전류를 무시하였으나, 압전류 효과를 무시할 수 없을 때 회절효율에 영향을 주는 파라메타에 대한 이론적인 분석과 실험고찰을 한다.

### II. 광굴절 현상 이론

결정내 홀로그램 기록을 위해 간섭성을 가지는 두 평면파의 입사방법을 그림 1에 나타내었다. 그림 1과 같이 빔의 진행 방향이  $x$ 방향으로 진행할 때 기준빔  $I_1$ 과 신호빔  $I_2$ 의 전기장의 크기는

$$\begin{aligned} R(x, z, t) &= a_1 \sqrt{I_1(x, t)} \exp[i(\omega t - \phi_1(x, t) - k_x x - k_z z)] + c.c \\ S(x, z, t) &= a_2 \sqrt{I_2(x, t)} \exp[i(\omega t - \phi_2(x, t) - k_x x + k_z z)] + c.c \end{aligned} \quad (1)$$

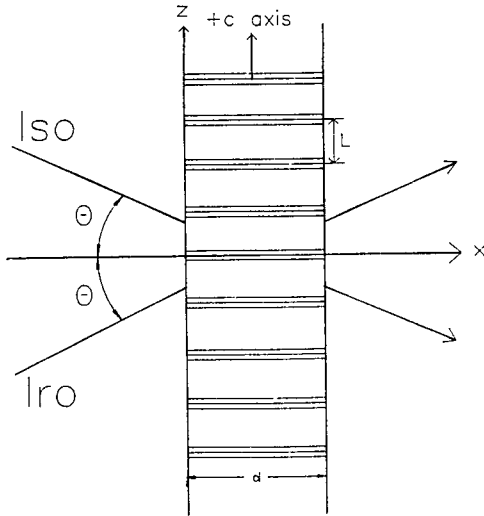


그림 1. 결정내의 홀로그램 기록을 위한 구성도.

이고, 여기서  $a_r, a_s$ 는  $I_r$ 빔과  $I_s$ 빔의 편광방향을 나타내는 벡터 성분,  $k_x$ 와  $k_z$ 는  $x$ 와  $z$ 방향의 전달 상수,  $\phi_r$ 과  $\phi_s$ 는 두 빔의 위상을 나타낸다.

이런 두 빔의 간섭에 의한 빛의 간섭패턴의 세기  $I$ 는

$$I = |R+S|^2 = (I_r + I_s) \left\{ 1 + \frac{2\sqrt{I_r I_s}}{I_r + I_s} a_r \cdot a_s \cos(Kz + \phi(x)) \right\} = I_0 [1 + m \cos(Kz + \phi(x))] \quad (2)$$

이다. 여기서  $I_0 = I_r + I_s$ ,  $m$ 은 빛의 변조비(modulation ratio)를 나타낸다. 만약 두 빔의 편광방향을  $+c$ 축에 평행하게 입사할 경우  $m$ 값은  $(2\sqrt{I_r I_s}/I_0) \cos 2\theta$ 이고, 편광방향을  $+c$ 축에 수직으로 입사할 경우  $(2\sqrt{I_r I_s}/I_0)$ 의 값을 가지게 된다.  $K=2\pi/L$ ,  $L=\lambda_0/(2n \sin\theta)$ 은 결정내에 형성된 격자간격,  $\lambda_0$ 는 자유공간에서의 빔 파장, 굴절률  $n$ 은 입사하는 빔의 편광 방향에 따라 이상 굴절률  $n_e$  또는 정상 굴절률  $n_o$ 의 값을 가진다.  $\phi(x) = \phi_r - \phi_s$ 는 두 빔의 위상차이다. 식 (2)와 같은 정현파함수모양의 간섭패턴은 결정내의 전자를 여기시키게 되고, 여기된 자유전자는 광여기된 전자밀도와 열에 의해 생성된 전자밀도로 표현할 수 있다. 전자의 확산과 드리프트길이  $l_d$ 가 결정격자간격  $L$ 보다 충분히 짧을 경우 자유전자밀도  $N$ 은 빛의 간섭패턴과 같은 정현파함수모양을 가지게 되며, 그 식은<sup>[10]</sup>

$$N = N_d + N_o [1 + m \cos(Kz + \phi(x))]$$

$$= N_s \left( 1 + \frac{m}{(1 + N_d/N_o)} \cos[Kz + \phi(x)] \right) = N_s (1 + M \cos(Kz + \phi(x))) \quad (3)$$

이다.  $N_s = N_d + N_o$ ,  $N_d$ 는 열에 의해 생성된 전자밀도로써 상수값을 가지고  $N_o$ 는 빛의 세기  $I_0$ 에 비례하는 양이다.  $M$ 값은 다시

$$M = \frac{m}{1 + N_d/N_o} = \frac{m}{1 + e\mu N_d / e\mu N_o} = \frac{m}{1 + \sigma_d / \sigma_p} \quad (4)$$

으로 표현된다. 암전도도  $\sigma_d$ 는  $e\mu N_d$ 이고 광전도도  $\sigma_p$ 는  $e\mu N_o$ 이며  $\mu$ 는 전자의 이동도이다.  $M$ 값이 전도도비  $\sigma_d/\sigma_p$ 에 의해 변화됨을 알 수 있다. 빔 세기가 충분히 커서 암전도도가 광전도도에 비해 무시할 수 있을 때  $M \approx m$ 으로 표현할 수 있다. 여기된 자유전자에 의한 전류밀도  $J$ 는

$$J = e\mu N E_x + k_B T \mu \Delta N - \kappa \alpha I \quad (5)$$

이며, 드리프트, 확산 및 광전압효과에 의한 광전류로 구성된다.<sup>[11,12]</sup> 여기서  $E_x$ 는 정전기장,  $k_B$ 는 Boltzman 상수,  $T$ 는 절대온도,  $\kappa$ 는 Glass상수,  $\alpha$ 는 흡수계수이다. KNbO<sub>3</sub>, KTN, BSO, BGO와 같은 결정에서는 드리프트와 확산으로 광굴절 현상을 충분히 설명할 수 있지만, Li-NbO<sub>3</sub>와 같은 암전결정에서는 광굴절 현상을 설명함에 있어서 광전압 효과에 의한 광전류를 무시할 수 없다.<sup>[13]</sup> 광전압 효과는  $c$ 축 방향에 있어서 결정격자의 비대칭성(외부에서 전기장을 가하지 않은 상태에서  $c$ 축방향에 있어서  $-c$ 축의 전위장벽이  $+c$ 축의 전위장벽보다 높음)으로 인해, 여기된 전자의  $+c$ 축으로 이동하려는 경향이  $-c$ 축으로 이동하려는 경향보다 더 강하게 나타나서 전반적인 전자의 이동이  $+c$ 축으로 일어나는 것을 말한다.<sup>[14]</sup>

본 연구에서는 결정 내에 두 빔을 입사시키고 충분한 시간이 지난 정상상태에서의 광굴절 특성을 알아본다. 먼저, 결정 내에 광유도된 정전기장  $E_x$ 는 식 (5)로부터

$$E_x = \frac{J}{e\mu N} - \frac{k_B T}{eN} \frac{dN}{dx} + \frac{\kappa \alpha I}{e\mu N} \quad (6)$$

가 된다. 외부에서 전기장을 가하지 않은 조건과 정상 상태에서 전류밀도  $J=0$ 이 되고, 그 때 정전기장  $E_x$ 는

$$E_x = \frac{E_d M \sin(Kz + \phi) + E_{ph} [1 + m \cos(Kz + \phi)]}{1 + M \cos(Kz + \phi)} \quad (7)$$

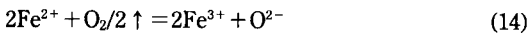
이며,  $E_d = k_B K T / e$ 는 확산전장,  $E_{ph} = \kappa \alpha I_0 / e\mu N_s$ 는 광전압

빔의 편광방향과 결정특성에 의해 결정되는 값이다. 입사빔의 편광방향이 *c*축에 수평인 경우, 식 (13)의 회절효율식은  $\Gamma$ 와  $\gamma$ 의 분자에  $\cos(2\theta)$ 를 첨가시켜야 한다. 회절효율은 두 빔세기의 비  $m_0$ 와  $\Gamma$ ,  $\gamma$ 의 값에 의해 결정되며, 특히  $\Gamma$ 와  $\gamma$  값은 암전도도와 광전도도의 비에 의해 영향을 받으므로 암전도도가 광전도도에 비해 무시할 수 없을 때, 회절효율은 결정내에 입사되는 빔의 세기의 영향을 받음을 보여준다.

### III. 실험

본 장에서는 빔세기비에 대한 회절효율의 변화와 두 빔세기의 합을 달리 하였을 때 회절효율에 미치는 영향을 이론치와 실험치를 비교하고 빔의 편광방향에 따른 회절효율 실험을 하였다.

0.1%/mole Fe 도우핑된 LiNbO<sub>3</sub> 결정(이후 결정이라 칭함)과 LiNbO<sub>3</sub> 웨이퍼에 Fe를 증착시킨 LiNbO<sub>3</sub> 박막(이후 웨이퍼라 칭함)을 사용하여 광굴절 특성을 실험하였다. 결정의 경우 크기는 5×10×11(x×y×z)mm이고, 웨이퍼의 크기는 15×1×9(x×y×z)mm이다. 처음 구입시 결정의 흡수계수는 488 nm의 파장에서 약 13 cm<sup>-1</sup>의 값을 가졌다. 이런 흡수율은 빔이 결정을 통과해 나오는 빔의 세기를 거의 0.1% 정도로 줄이므로 광굴절 특성을 조사하는데 좋지않다. 결정의 흡수율을 줄이기 위하여 Phillips 그룹이 행한 열처리를<sup>[15]</sup> 하였는데, 결정을 산소분위기, 1000°C의 전기로에서 12시간 열처리함으로써 흡수율을 1.8 cm<sup>-1</sup> 정도의 값으로 줄였다. 열처리된 결정의 색깔은 암갈색을 띄었지만 열처리 후 연한 갈색을 띄었다. 이것은 결정내의 Fe<sup>2+</sup>가 산소와 결합하여 Fe<sup>3+</sup>로 변하는 것으로 설명된다. Fe<sup>2+</sup>가 Fe<sup>3+</sup>로 변환되는 것은



로 표현할 수 있다. Fe<sup>3+</sup>는 억셉터 역할을 하고 Fe<sup>2+</sup>는 도우너의 역할을 하는데 도우너가 많을수록 흡수율은 높을 것이다. 결정의 광굴절 특성 실험을 위한 구성도는 그림 2에 나타내었다. 레이저는 Ar<sup>+</sup> 레이저를 사용하고 파장은 488 nm이며, 입사되는 빔의 편광방향은 +*c*축에 수직이다. 결정과 웨이퍼의 실험은 외부에서 전장을 가하지 않은 개방회로 상태에서 행하였다.

488 nm 파장에서 결정의  $n_o$ 는 2.34이고,  $n_e$ 는 2.2436의 값을 가진다.<sup>[16]</sup> 두 입사빔의 입사각  $2\theta=30^\circ$ 로 고정시키고 빔세기의 합이 2.37 W/cm<sup>2</sup>와 3.03 W/cm<sup>2</sup>의 두 경우에 대해 실험하였다. 입사빔 세기에 대해 암전도도값은

상수이고, 광전도도값은 비례관계를 가질 경우 전도도비

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_p} = \frac{C}{I} \quad (15)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서 C는 상수, I는 입사빔의 세기이다. 입사빔의 세기는 전도도비와 반비례관계를 가지며, 전도도비는 회절효율에 영향을 주는 요소이다. 그림 3에 이론적인 계산치와 실험치를 보여주고 있다. 빔세기가 2.37 W/cm<sup>2</sup>에 대해 실험치와 이론치의 근사를 위해 전도도비를 0.42로 적용하였고, 그 때 3.03 W/cm<sup>2</sup>에 대한 전도도비는 식 (15)를 통해 0.33의 값을 적용하였다. 광전압전장  $E_{ph}$ 도 실험치와 이론치의 근사를 위해 35 kV/cm를 대입하였고, 확산전장  $E_d$ 는  $k_BKT/e$  식에 의해 1.722 kV/cm를 대입하였다. 3.03 W/cm<sup>2</sup>일 때 2.37 W/cm<sup>2</sup>보다 회절효율이 전반적으로 더 높게 나타났고, 최대 회절효율값에 해당하는 빔세기비  $m_0$ 가 더 큼을 알 수 있다. 전도도비가 0.42의 경우  $m_0$ 가 0.5보다 큰 경우 회절효율이 증가함을 보여주는데 이것은 식 (13)의 회절효율식에서  $\cos(\gamma x)$ 의 위상변환요소  $\gamma$ 값의 영향인 것으로 보여진다.  $\gamma$ 값은 광전압요소와  $m_0$ 값에 의해 결정되어지며, 전도도비가 크면 정전기장의 광전압요소가 커지고  $m_0$ 값에 대해 값은 크게 변화될 것이다. 이런  $\gamma$ 값의 변화는  $\cos$ 함수에 의한 값으로 나타나므로,  $m_0$ 값의 변화에 대해  $\cos(\gamma x)$ 값의 변화가 크다면, 전도도비 0.33의 곡선처럼 단순한 모양이 아닌,  $m_0$ 값에 대해 회절효율값이 더 많은 변화를 나타내게 된다. 전도도비가 작아질수록 계속 회절효율이 커지는 것은 아니고, 전도도비가 작아져갈 때 어느값에서 최대의 회절효율을 가진 다음 그 이후 회절효율은 작은 값을 가지게 된다. 그림 4에 이런 관계를 보여준다. 전도도비가 작아질 때  $m_0$ 에 대한 회절효율의 최대치는 오른쪽으로 이동함을 알 수 있다. 전도도비에 대한 최대 회절효율과 그 때의  $m_0$ 값에 대한 관계를 그림 5에 보여준다. 전도도비 0.1에서 회절효율이 가장 큰 값을 가지며, 전도도비가 작아질 때  $m_0$ 는 1에 가까운 곳에서 최대 회절효율을 가진다. 전도도비가 작다는 것은 식 (11)에서 정전기장의 광전압요소의 크기가 확산전장요소에 비해 상대적으로 작아진 경우를 나타내므로, 확산전장이 미세한 경우 두 빔의 세기가 비슷할 때 큰 회절효율을 가진다.

다음으로 웨이퍼에서 빔세기에 대한 회절효율 실험을 하였다. 실험에 사용한 웨이퍼는 본 실험실에서 제작한 것으로, 진공증착기에서 Fe를 LiNbO<sub>3</sub>에 증착시킨후 전기로의 1000°C, 아르곤가스분위기에서 LiNbO<sub>3</sub>웨이퍼

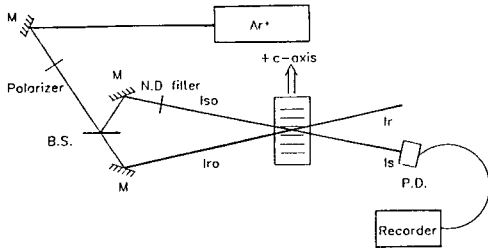


그림 2. 0.1%/mole Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정의 홀로그램 기록을 위한 구성도.

전장을 나타낸다. 식 (7)을 푸리에 시리즈로 전개하면

$$E_{sc} = E_{ph} + \sum E_s \exp i(s K z/2) + c.c \quad s = \pm 2, \pm 4, \pm 6, \dots \quad (8)$$

로 표현되며, 여기서  $E_s$ 는

$$E_s = \left[ \frac{1}{\sqrt{1-M^2}} E_{ph} \left(1 - \frac{m}{M}\right) + i E_d \left[ \frac{\sqrt{1-M^2}-1}{M} \right]^{s/2} \right] \times \exp[i(s\phi/2)]$$

$$= \left[ \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-M^2}} E_{ph} \left(1 - \frac{m}{M}\right) \right\}^2 + E_d^2 \right]^{1/2} \left[ \frac{\sqrt{1-M^2}-1}{M} \right]^{s/2} \times \exp[i(\psi + s\phi/2)],$$

$$\tan \psi = \{(1/\sqrt{1-M^2}) E_{ph}(1-m/M)\} / E_d \quad (9)$$

이다. 여기서  $\psi$ 는 빛의 간섭패턴과 격자 사이의 위상차를 나타낸다. 확산전장  $E_d$ 는 위상차를  $\pi/2$ 가 되도록 하고, 광전압전장  $E_{ph}$ 는 위상차를 0 또는  $\pi$ 가 되도록 하는 성향을 가진다. 정전기장이 결정내에 형성되고 난 후, 기준빔 또는 신호빔을 결정내에 입사시킬 때 정전기장의 푸리에 시리즈성분은 입사빔의 진행방향과 Bragg조건을 만족하는 성분만으로 간략화 시킬 수 있다. Bragg조건을 만족하는 성분은  $s = \pm 2$ 이고, 이때 정전기장  $E_{sc}$ 를 간략화 시키면

$$E_{sc} \cong E_{ph} + E_{+2} \exp[i(Kz)] + E_{-2} \exp[-i(Kz)] \quad (10)$$

이며, 여기서  $E_{+2} = E_{-2}$ 는

$$E_{+2} = - \left[ \frac{1}{\sqrt{1-M^2}} E_{ph} \left(1 - \frac{m}{M}\right) + i E_d \left[ \frac{1-\sqrt{1-M^2}}{M} \right] \right] \exp[i\phi]$$

$$= - \left[ \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-M^2}} E_{ph} \left(1 - \frac{m}{M}\right) \right\}^2 + E_d^2 \right]^{1/2} \left[ \frac{1-\sqrt{1-M^2}}{M} \right]$$

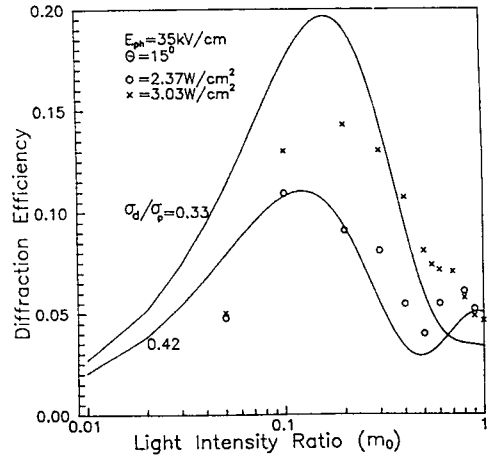


그림 3. 빔세기비  $m_0$ 에 대한 회절효율(실선: 이론치, 원과 가위표: 실험치).

$$\times [\cos\psi + i \sin\psi] \exp[i\phi]$$

$$= -E_{scm} [\cos\psi + i \sin\psi] \exp[i\phi] \quad (11)$$

이다.  $E_{scm}$  값은  $M$  값과 관계하며, 식 (4)에 의해 전도도비와 관계함을 알 수 있다. 결정내에  $c$ 축 방향에 수직인 편광을 가지는 빔과 수평인 편광을 가지는 빔에 의해 생성된 정전기장에 의한 굴절율변화  $\Delta n$ 은 각각

$$\Delta n_o = -1/2 n_o^3 r_{13} E_{sc}$$

$$\Delta n_e = -1/2 n_e^3 r_{33} E_{sc} \quad (12)$$

이며, 여기서  $r_{13}$ 와  $r_{33}$ 는 LiNbO<sub>3</sub>의 전기광학계수이다. 결국, 식 (2)와 같은 빛의 간섭패턴에 의해 결정 내에 정전기장이 형성되고, 정전기장에 의해 식 (12)의 굴절율변화가 형성된다. 굴절율의 변화는 회절효율과 관계한다.

회절효율은 판독빔(reading)의 세기에 대한 회절된 빔의 세기비로 정의되며,  $I_r(x=0) = I_{r0}$ ,  $I_s(x=0) = 0$ 의 경계조건과 결정의 흡수율을 무시하고 입사빔의 편광방향이  $c$ 축에 수직인 경우 회절효율  $\eta$ 는<sup>[11]</sup>

$$\eta = \frac{2m_o^{-1} \exp(\Gamma x/2) [\cosh(\Gamma x/2) - \cos(\gamma x)]}{(1+m_o^{-1}) [1+m_o^{-1} \exp(\Gamma x)]} \quad (13)$$

$$\Gamma = 4 \delta E_{scm} \sin\psi / m: \text{빔 세기 이득요소,}$$

$$\gamma = 2 \delta E_{scm} \cos\psi / m: \text{위상변환 요소,}$$

$$\delta = -\pi n_o^3 r_{13} / (\lambda_o \cos\theta), \lambda_o: \text{공간내의 빛의 파장.}$$

이며, 여기서  $m_o$ 는 결정에 홀로그램 기록시 두 입사빔  $I_r(x=0) = I_{r0}$ 와  $I_s(x=0) = I_{s0}$ 의 비로써,  $m_o = I_{s0}/I_{r0}$ 이고,  $\delta$ 는

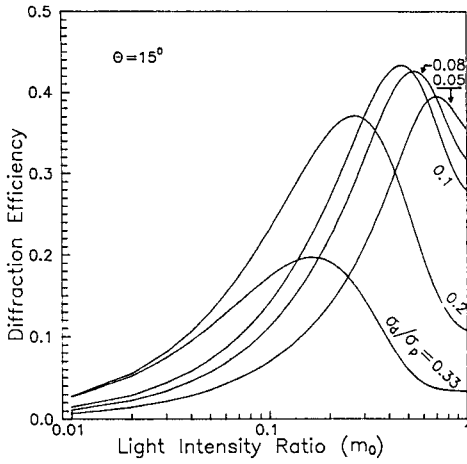


그림 4. 전도도비에 따른 회절효율과  $m_0$ 의 관계.

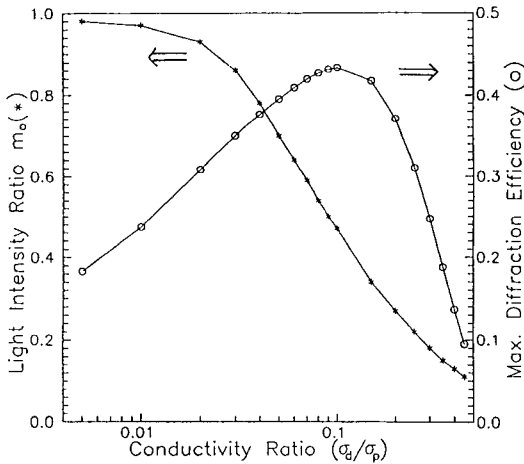


그림 5. 전도도비에 대한 최대 회절효율과 빔세기비  $m_0$ .

위에 증착된 Fe가 웨이퍼 내부로 확산되도록 하였다.<sup>[17]</sup> Fe는  $x$ - $z$ 평면에 분포하고  $y$ 방향으로 확산을 한 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 평면 광도파로의 형태가 된다.

이런 웨이퍼의 Fe 불순물의 효과를 보기 위해, 실린더모양의 렌즈를 사용하여 입사되는 빔의 크기를 줄이고, Fe가 도핑된 영역으로 웨이퍼에 입사시켰다. 웨이퍼의 광굴절특성 실험을 위한 구성도를 그림 6에 나타내었다.  $\lambda/2$  plate를 사용하여 빔의 편광방향을  $c$ 축에 수직과 수평의 두 경우에 대해 실험을 하였다. 빔이 웨이퍼내에서 교차되므로 실제 두 빔이 웨이퍼내에서 만날 때의 빔세기는 알 수 없었고, 두 빔의 세기비  $m_0$ 는 입사하기전 빔의 세기를 측정 한 값이다. 회절효율은 빔이 입사되기

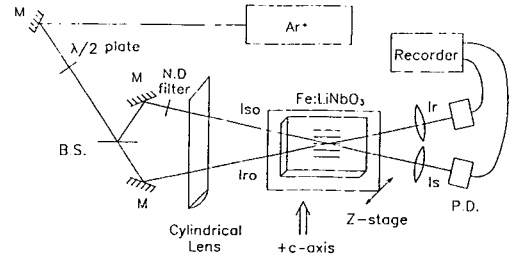


그림 6. Fe:LiNbO<sub>3</sub> 웨이퍼의 홀로그램 기록을 위한 구성도.

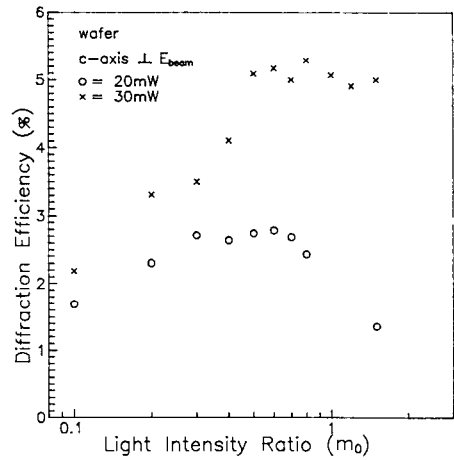


그림 7. 회절효율과 빔의 세기비에 대한 실험결과( $c$ 축  $\perp E_{beam}$ ).

전의 출력과 웨이퍼를 통과한 후의 출력을 측정하여 계산하였다. 그림 7에 빔의 편광방향을  $c$ 축에 수직으로 하였을 때의 회절효율을 보여준다. Fe:LiNbO<sub>3</sub> 결정에서와 마찬가지로 빔의 세기가 클 때 회절효율이 높게 나타났다.

두 빔의 편광방향을  $c$ 축에 평행하도록 결정에 입사하여 홀로그램을 기록할 경우 결정의 굴절률변화는 식 (12)에서의 이상굴절률변화를 가지게 될 것이다. 전기광학 계수  $r_{33}$ 의 값은  $r_{13}$ 에 비해 약 3배 정도 크므로 빔의 편광방향이  $c$ 축에 평행한 것이 수직인 경우 보다 더 큰 굴절률변화를 가진다. 굴절률변화는 회절효율과 관계하므로 편광방향이  $c$ 축에 평행한 경우 회절효율이 더 크게 나타날 것이다. 그림 8에 빔의 편광방향이  $c$ 축에 평행한 경우의 회절효율을 보여준다. 그림 7의 수직일 때 보다 훨씬 큰 회절효율을 가짐을 알 수 있다. 그림 7과는 달리, 빔의 세기가 작을 때 회절효율이 더 크게 나타나고 있는데, 이것은 그림 9와 10의 전도도비에 대한 회절효율의

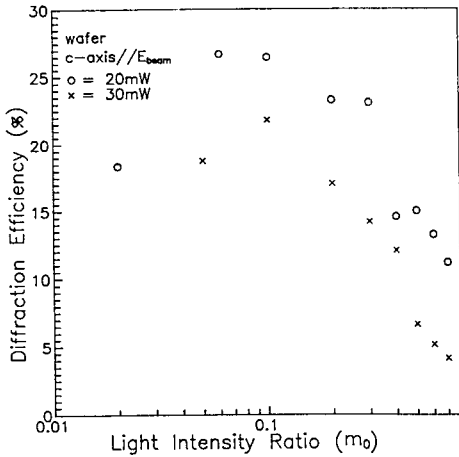


그림 8. 회절효율과 빔의 세기비에 대한 실험결과( $c$ 축 //  $E_{beam}$ ).

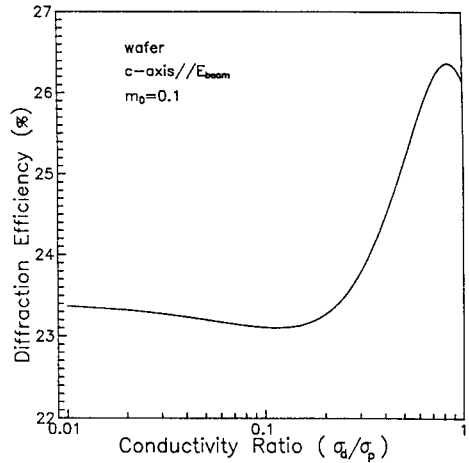


그림 10. 전도도비에 대한 회절효율( $c$ 축 //  $E_{beam}$ ).

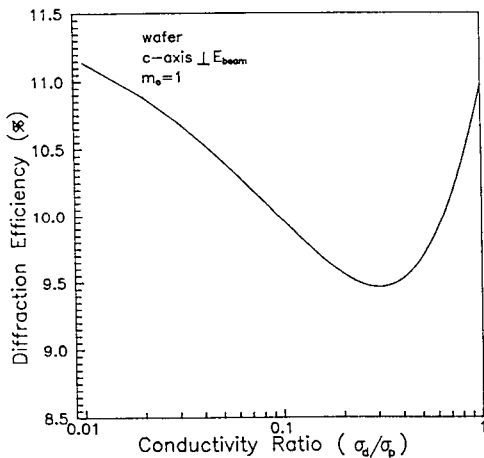


그림 9. 전도도비에 대한 회절효율( $c$ 축  $\perp$   $E_{beam}$ ).

관계 곡선을 통해 이해할 수 있다. 그림 9는 웨이퍼에서 빔의 편광방향이  $c$ 축에 수직인 경우의 그래프로써,  $m_0=1$  이고, 빔 출력이 20mW인 경우 전도도비를 0.3, 30mW인 경우 0.2를 적용할 때, 그림 7의 결과에서 처럼 빔 세기가 클 때, 즉 전도도비가 작을 때 더 큰 회절효율값을 가진다. 반면, 그림 10은 빔의 편광방향이  $c$ 축에 수평인 경우의 그래프로써,  $m_0=0.1$ 에 대해 그림 9와 마찬가지로 전도도비 0.2와 0.3을 비교해 보면, 전도도비가 0.3일 때, 즉 입사빔의 세기가 작을 때 더 큰 회절효율값을 가짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

Fe:LiNbO<sub>3</sub>와 같은 광굴절 결정에서 회절효율을 측정할 때 입사빔의 세기가 회절효율에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 빔의 세기는 암전도도  $\sigma_d$ 와 광전도도  $\sigma_p$ 의 비에 영향을 주고, 전도도비의 변화는 전도도비( $\sigma_d/\sigma_p$ )의 크기가 1에 비해 무시할 수 없는 값을 가질 때 회절효율의 크기에 영향을 주게 된다. 또한, 정전기장의 확산 전장요소가 광전압전장요소보다 큰 경우, 빔세기비가 1에 가까울 때 최대회절효율을 가지며, 빔의 편광방향이  $c$ 축에 평행한 것이 수직인 경우보다 더 큰 회절효율을 가짐을 보았다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 최양희, 텔레콤, 7권 13호, 3 (1991).
- [2] Eric S. Maniloff, Kristina M. Johnson, Opt. Eng., **29**, 225 (1990).
- [3] Pochi Yeh, Clair Gu, International J. of Nonlinear Optical Physics, **1**, 167 (1992).
- [4] Y. S. Abu-Mostafu and D. Psaltis, Sci. Am., **256**, 88 (1987).
- [5] P. J. Van Heerden, Appl. Opt., **2**, 393 (1963).
- [6] D. L. Stabler, J. J. Amodei, Ferroelectrics, **13**, 107 (1972).
- [7] V. Markov, S. Odulov, M. Soskin, Opt. and Laser Technol., **11**, 95 (1979).
- [8] K. A. Boyarchuk, K. I. Volyak, A. I. Malyarovskii, S. V. Miridonov, Kratkie Soobzhen, po Fiz, 5

- (1986).
- [9] Henri Rajbenbech, Sanabuth Bann, Philippe Refregier, Pascal Joffre, Jean-Pierre Huignard, Hermann-Stephan Buchkremer, Aren Skov Jensen, *Appl. Opt.*, **31**, 5666 (1992).
- [10] K. Blotekjaer, *J. of Appl. Phys.*, **48**, 2495 (1977).
- [11] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin and V. L. Vinetsk II, *Ferroelectrics*, **22**, 949 (1979).
- [12] A. M. Glass, *Opt. Eng.*, **17**, 470 (1978).
- [13] P. Günter, *Electro-optical Photorefractive Materials*, 208 (1987).
- [14] A. M. Glass, D. von der Linde and T. J. Negran, *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 233 (1974).
- [15] W. Phillips and D. L. Stabler, *J. Electronic Mat.*, **3**, 601 (1974).
- [16] C. J. G. Kirkby, *Properties of Lithium Niobate*, EMIS Datareviews Series no. **5**, 141 (1988).
- [17] 강기형, 정태혁, 정석문, 윤태훈, 김재창, 한국광학회지, 4권 1호, 108 (1993).

### Light-intensity Dependence of Diffraction Efficiency in Fe - LiNbO<sub>3</sub> Crystals -

Tae-Hyeog Jeong, Ki Hyung Kang, Suk Moon Chung, Tae-Hoon Yoon, and Jae Chang Kim  
*Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea*

(Received: August 9, 1993)

In this paper, dependence of the diffraction efficiency upon incident light intensity is studied. The conductivity ratio, which is dependent upon the incident light intensity, changes the static electric field in a crystal. This change of the static electric field modulates the refractive index via linear electro-optic effect. And the change of the refractive index affects the diffraction efficiency. It is found that experimental results with Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystals are in good agreement with the theory.