

論文98-35D-6-9

Fe-LiNbO₃결정에서 부피형 홀로그래ムの 회절특성을 이용한 광정보 저장

(Optical information storage using diffraction properties of volume hologram in Fe-LiNbO₃ crystal)

安俊遠*, 金男*, 李權淵**

(Jun-Won An, Nam Kim, and Kwon-Yeon Lee)

요 약

본 논문에서는 Fe가 0.015Wt.%도핑된 LiNbO₃ 결정에서 2광파혼합(TWM:Two-Wave Mixing)을 통한 입사각에 따른 결합계수, 기록빔의 세기비에 따른 이득, 회절효율, 시간응답특성에 대한 해석 및 실험을 통해 고밀도 광메모리 소자로서 응용하기 위한 특성을 제시한다. 실험결과 514.5nm 파장에서 본 결정의 경우 14°에서 최대 결합특성을 보였고 이때의 최대결합계수는 6.9cm^{-1} 이다. 그리고, 632.8nm 파장의 빔으로 판독시 두 결합빔의 세기비가 0.1이고, 입사각이 14° 일 때, 54.13%의 최대 회절효율을 얻었으며, 격자고정시 회절효율은 21.4%이다. 또한, Fe-LiNbO₃ 결정을 높은 회절효율을 갖는 광메모리 소자로 적용하기 위해 가장 우수한 회절특성을 보이는 조건에서 각도 다중화 방식과 공간 광학 변조기를 이용한 광정보 저장 응용실험 결과를 제시하였다.

Abstract

In this paper, we experiment the characteristics of coupling coefficient, gain, diffraction efficiency and dependence of time determined by TWM(Two-Wave Mixing), using Fe-LiNbO₃ crystal(doped with 0.015Wt.%). From these results, we proposed to apply for optical memory application. The highest coupling angle of 14° and maximum coupling coefficient of 6.9cm^{-1} are obtained at 514.5nm wavelength. Also, maximum diffraction efficiency is 54.13% when intensity ratio and writing beam incident angle are 0.1 and 14°, respectively. After fixing process, diffraction efficiency is 21.4%. As an example, we demonstrated the writing and reconstruct optical data using spatial light modulator and angular multiplexing in most optimal condition.

I. 서론

최근 기존 반도체 기술에 의한 정보저장 장치에 대

한 한계점이 드러나면서 이를 극복하기 위한 고밀도, 고속 및 경량화된 새로운 저장 장치에 대한 욕구가 증대되고 있다. 이러한 욕구에 의해 현재 전 세계적으로 연구되고 있는 차세대 메모리 시스템으로 부피 홀로그래름을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며^{[1][2]}, 고밀도의 메모리 구현을 위한 다중화 기법에는 각 다중화(angular multiplexing), 파장 다중화(wavelength multiplexing), 위상코드 다중화(phase code multiplexing), 위치 다중화(spatial multiplexing)

* 正會員, 忠北大學校 情報通信工學科

(Dept. of Computer & Comm. Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

** 正會員, 順天大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Sunchon Nat'l Univ.)

接受日字:1997年10月25日, 수정완료일:1998年5月27日

등의 기법이 이용되고 있다.

이러한 고밀도 광메모리 시스템에 이용될 수 있는 ferroelectric 매질로는 LiNbO₃, LiTaO₃, KNbO₃, GaAs, InP, BaTiO₃, Ba₂NaNb₅O₁₅, Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆(SBN), Bi₁₂SiO₂₀(BSO), Bi₁₂GeO₂₀, KNSBN, BSKNN 등이 있다. 특히, 본 논문에서 이용된 LiNbO₃ 결정은 가시영역인 470nm에서 가장 감광도가 좋고 광굴절 특성이 가장 우수한 광굴절 매질중의 하나로 알려져 있다. 또한, 개량된 Czochralsky방법을 이용해 6cm정도의 큰 결정을 얻을 수 있고, 고해상도의 홀로그래프 저장에 적절한 매질을 얻을 수 있으며, Fe, Mn 과 같은 불순물을 첨가시켜 빛에 대한 감광도와 전기 광학적 특성등을 향상시킬 수 있기 때문에 현재 고밀도 광정보 저장 및 광통신 소자에 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[3]-[9]} 국내에서도 BaTiO₃^[10], LiNbO₃^{[11][12]}, photopolymer^[13]를 이용한 연구 결과물들이 발표되었으며, 현재 이러한 광굴절효과를 이용한 광 메모리 시스템 구현을 위한 많은 연구가 다양한 방식으로 연구되고 있다. 또한, 광메모리 시스템을 구현함에 있어서 광굴절결정의 동적 부피격자를 이용할 경우 재생을 위한 지속적인 빔의 조사(illumination)에 의해 격자가 소거되기 때문에 장기간 보존할 수 있도록 하는 격자 고정(fixing)기술이 이용되고 있으며, 격자를 고정시키는 기술에는 외부전기장을 인가하는 방법과 온도제어에 의한 방법이 있는데 LiNbO₃ 결정의 경우 후자에 의한 방법으로 격자고정이 이루어진다.^{[14][15]}

광굴절결정을 메모리 소자로 응용하기 위해서는 부가적인 전기적·광학적인 소자를 필요로 한다. 특히, Fe-LiNbO₃ 결정을 광정보 저장 소자로서 응용하기 위한 응용실험에서 문자패턴을 입력시키기 위해 이용한 공간 광학 변조기(SLM:spatial light modulator)는 현재 가장 널리 이용되고 있는 광학 소자중의 하나로 전력소비가 적고, 컴퓨터로부터 직접 2차원 영상정보를 받아 실시간으로 디스플레이 할 수 있으며, 영상의 크기나 명암을 프로그램이나 광학 시스템의 간단한 조작을 통해 쉽게 변형시킬 수 있다는 특성을 갖고 있다. 따라서, 실시간 광-전자 신호처리(real time electro-optical signal processing), 광컴퓨팅(optical computing), 홀로그래프를 이용한 광메모리(optical memory), 자유공간 광 연결(free space optical interconnection), 광정보처리(optical information

processing), 데이터 변환 시스템(data conversion system) 등과 같은 다양한 분야에서 이용되고 있으며, 현재 연구되고 있는 광메모리 장치의 구현에 있어서 가장 필수적인 장치의 하나이다.

본 논문에서는 Fe가 0.015Wt.% 도핑되었고, 크기가 5mm×5mm×6mm인 LiNbO₃결정을 이용해 2광파 혼합(TWM:Two-Wave Mixing)을 통한 기록빔의 입사각에 따른 결합계수, 세기비에 따른 이득, 회절효율의 세기비 의존성, 시간응답특성 등과 같은 광파결합 특성에 대한 이론값과 실험값을 비교·분석함으로써 현재 다양한 방식으로 활발히 연구되고 있는 고밀도 광메모리 시스템에 적용하기 위한 결합특성을 제시한다. 또한, 제시된 실험결과 및 각도 다중화(angular multiplexing) 방식 그리고 공간 광학 변조기를 이용한 광 정보저장 응용실험을 통해 Fe-LiNbO₃ 결정을 우수한 회절효율을 갖는 광 메모리소자로서 응용할 수 있음을 입증한다.

II. Fe-LiNbO₃결정에서 2광파결합 이론

광굴절결정 내에서 교차하는 두 빔은 광굴절효과를 일으켜 굴절을 변조를 일으키고 한쪽 빔에서 다른쪽 빔으로 강한 비가역적인 에너지 교환이 일어나게 된다. 즉, 두 빔의 간섭에 의해 생성된 광굴절 격자는 각 빔을 브래그 회절(Bragg diffraction) 시키게 되는데 한쪽 빔에서는 회절된 빔과 투과된 빔 사이에 보강 간섭이 일어나고, 다른 방향에서는 상쇄간섭이 일어나 한 빔에서 다른 빔으로 에너지교환이 이루어진다. 코히어런트한 두 빔이 결정내에서 결합될 경우 식(1)에서 보는 것 같이 간격이 Λ 인 간섭패턴을 만들며, 기록파장(λ), 외부 입사 반각(θ), 매질의 굴절률(n)에 의해 결정된다.^[9]

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (1)$$

이러한 간섭패턴을 만들기 위해 결정에 2θ 의 각으로 입사되는 두 개의 기록빔 I_{1w} , I_{2w} 의 간섭에 의해 결정내에 형성되는 공간 변조된 광의 세기분포는 다음과 같다.^[8]

$$I = I_0 [1 + m \cos(K_g x)] \quad (2)$$

여기서 $K_g = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 는 격자의 파수벡터(grating wave

vector), $m=2\frac{\sqrt{I_{1w}I_{2w}}}{(I_{1w}+I_{2w})}$ 은 광간섭 패턴의 변조지수, $I_o=I_{1w}+I_{2w}$ 는 전체광세기이고, x 는 격자 벡터방향의 공간좌표계를 나타낸다. 식(2)에 보인 것 같은 간섭패턴은 결정내의 전자를 여기시키게 되고, 이러한 자유전자의 밀도(N)는 전자의 확산과 드리프트의 길이가 격자간격보다 훨씬 짧을 경우 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} N &= N_d + N_o[1 + m \cos(K_g x + \phi)] \\ &= N_s(1 + \frac{m}{1 + (N_d/N_o)} \cos(K_g x + \phi)) \\ &= N_s(1 + M \cos(K_g x + \phi)) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $N_s = N_d + N_o$, N_d 는 열에 의해 생성된 전자밀도, ϕ 는 두빔의 위상차이고 M 값은 식(4)와 같다.

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

$\sigma_d = e\mu N_d$ 는 암전도도, $\sigma_p = e\mu N_o$ 는 광전도도, μ 는 전자의 이동도이다. 이와같이 광굴절 결정내에서 두빔의 결합에 의해 여기된 자유전자에 의해 발생하는 전류밀도는 식(5)와 같고, E_{sc} 는 정전기장, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, x 는 Glass 상수, a 는 흡수계수이다.

$$J = e\mu N E_{sc} + k_B T \mu \Delta N - x a I \quad (5)$$

이때 광 유도된 정전기장 E_{sc} 는 식(5)로부터 얻을 수 있으며, 외부에서 전기장을 인가하지 않은 조건과 정상상태임을 고려하면 전류밀도 $J=0$ 이 되고, 그때의 정전기장 E_{sc} 는

$$E_{sc} = \frac{E_d M \sin(K_g x + \phi) + E_{ph} [1 + m \cos(K_g x + \phi)]}{1 + M \cos(K_g x + \phi)} \quad (6)$$

이며, $E_d = k_B K_g T / e$ 는 확산전기장으로 빛의 간섭패턴과 격자사이의 위상차를 $\frac{\pi}{2}$ 가 되도록하고, $E_{ph} = x a I / e\mu N_s$ 는 위상차를 0 또는 π 가 되도록 하는 광전압 전기장이다.

이러한 광굴절결정에 외부에서 전기장을 인가하지 않으면 오직 확산에 의해서만 굴절률변조가 유도되고, 신호빔(signal beam) I_{1w} 과 참조빔(reference beam) I_{2w} 에 의해 형성된 광굴절격자의 파수벡터(grating wave vector)의 방향이 결정의 c 축과 평행하게 정

렬되었다고 가정하면, 2광파결합에 의한 신호빔의 이득(G)은 결합파동방정식에 의해 정의될 수 있고, 약한 신호빔은 전파방향을 따라 지수함수적으로 증가한다. 만약 흡수에 의한 손실을 무시하고($\alpha=0$), 신호빔이 참조빔보다 충분히 작다고 가정하면($I_{1w} \ll I_{2w}$), 이득은 식(7)과 같이 정의된다.

$$G = \frac{1 + \beta}{1 + \beta e^{-\Gamma d}} \quad (7)$$

그리고, 균일한 굴절률 변조 홀로그래프를 가정하면, 광굴절결정의 위치에 따른 굴절률 변조는,^[16]

$$n(x) = \Delta n \cos(K_g x) \quad (8)$$

이고, 여기서 Δn 은 굴절률 변조의 크기이다.

기록빔의 상호작용길이 d , 파장이 λ_R 인 읽기빔(reading beam)이 브래그각 θ_R 로 입사되는 경우 정착된 부피 홀로그래프의 회절특성은 H. Kogelnik의 결합파동이론(coupled-wave theory)으로 간단하게 해석되고, 결정내에서의 흡수를 무시하면 전형적인 회절 효율에 관한 표현식은 다음과 같다.

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda_R \cos \theta_R}\right) \quad (9)$$

그러나, 광굴절 결정내에서 두 기록빔의 결합에 의해 유도된 굴절률 변조는 두 빔사이의 에너지 교환 특성으로 인해 더 이상 균일하지 않게된다. 만약 결정에 외부에서 전기장이 인가하지 않으면 굴절률격자의 비균일성으로부터 굴절률변조는 입력빔의 세기비 $\beta = I_{1w}/I_{2w}$ 와 빔의 결합계수(coupling coefficient) Γ 의 함수로 다음과 같이 표시된다.^[16]

$$\Delta n(z) = \frac{2\Delta n_s}{[(1 + \beta e^{\Gamma z})(1 + \frac{e^{-\Gamma z}}{\beta})]^{1/2}} \quad (10)$$

여기서 Δn_s 는 광 유겨된 굴절률 변조의 최대크기이다. 이러한 비균일 광굴절격자로부터 약한 판독빔이 브래그 조건을 만족하는 각으로 정렬되어 입사된다고 가정하고, 판독빔과 회절빔의 진폭에 대한 slowly varying approximation 및 경계조건을 이용하면 결합파동방정식으로부터 광굴절 부피 홀로그래프의 회절효율은 N. V. Kukhtarev 표현식에 의해 식(11)과 같이 정의된다.^[17]

$$\eta = \frac{\beta \exp(\Gamma d/2) - 1}{(1 + \beta)[1 + \beta \exp(\Gamma d)]} \quad (11)$$

III. Fe-LiNbO₃ 결정의 TWM 특성 실험

그림 1은 514.5nm의 아르곤 레이저(Argon laser) 영역에서 Fe가 0.015Wt.% 도핑되었고, 크기가 5mm×5mm×6mm인 LiNbO₃ 결정의 입사각에 따른 결합계수와 두 기록빔의 세기비에 따른 이득을 측정하기 위한 2광파결합(TWM : Two Wave Mixing) 특성 실험도이다. 그림에서 I_{1w} '은 참조빔(I_{2w})이 없을 때 I_{1w} 가 결정을 통과한 후의 빔 세기이고, I_{1w} ''은 신호빔(I_{1w})과 참조빔(I_{2w})이 결정내에서 2광파 혼합되었을 때의 빔세기이다. 두 기록빔은 $\lambda/2$ wave plate를 이용해 수직편광으로 고정된 상태에서 실험하였고, 두빔의 세기는 감쇄기(attenuator)를 통해 조절하였다. 또한, 본 실험 조건에서는 광굴절결정의 입사면에 대해 두 빔이 같은 각도로 입사시켜서 결정에 기록되는 격자의 방향이 광축방향과 평행하도록 하였다.

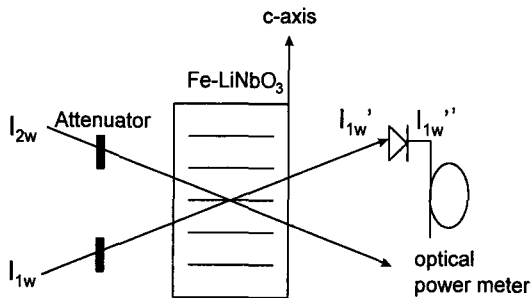


그림 1. 2광파결합 실험 구성도
Fig. 1. Optical setup for TWM.

광굴절결정의 결합계수(coupling coefficient)는 un-depleted pump beam approximation 조건하에서 2광파결합 실험으로부터 결정되며, 참조빔(reference beam)의 세기가 신호빔(signal beam)의 세기보다 훨씬 크다고 가정하면, 상호작용길이(interaction length)가 d 이고, 신호빔의 이득이 G 일 때 $(\frac{1}{d}) \ln G$ 로 근사화된다. 그림 2는 그림 1의 실험 구성도에서 두 빔의 입사각도를 0° ~ 50°의 범위에서 2° 간격으로 광굴절결정의 결합계수를 측정한 곡선으로 입사각에 대한 결합계수(Γ)의 의존성을 보인것이다. 두 기록빔의 세기비($\beta = I_{1w}/I_{2w}$)는 신호빔이 참조빔보다 충분히 작도록($\beta = 0.01$) 했고, 이때의 이득(G)은 I_{1w}''/I_{1w}' 으

로 구할 수 있다. 실험결과에서 보면 입사각이 14° 일 때까지 증가하다가 포화(saturation)되고, 이후의 각도에서는 미약한 감소를 가질뿐 거의 일정한 특성을 보였다. 따라서, 본 결정 이용시 다른 결정에 비해 넓은 수광각을 가지기 때문에 응용할 수 있는 각의 범위가 큼을 알 수 있다.

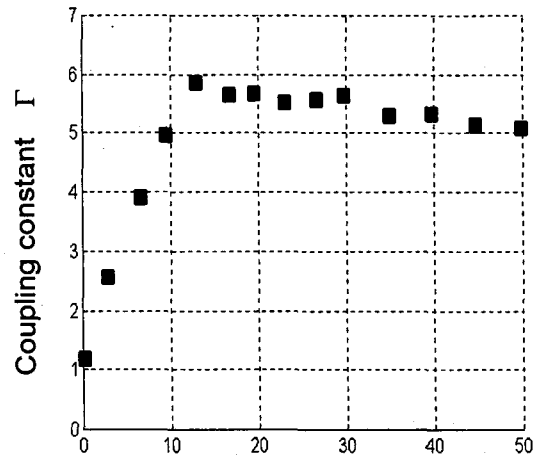


그림 2. 입사각에 따른 결합계수 Γ
Fig. 2. Coupling coefficient Γ vs incident angle.

그림 3은 그림 1의 실험구성도에서 두 빔의 입사각 (2θ)이 최대 결합계수를 갖는 14° 인 조건으로 고정시키고 두 기록빔의 세기비(I_{2w}/I_{1w})를 변화시켰을 때 신호빔에 대한 이득의 이론값과 실험값을 보인 것이다. 그림에서 나타난 이득값은 광굴절결정의 회절효율 특성과는 큰 관련이 없고, 약한 신호빔의 세기를 개선하기 위한 광증폭과 같은 응용분야에 적용할 수 있는 결과로서, 일반적인 광굴절결정의 결합 특성 결과이다. 실선으로 나타낸 이론값에서 보면 식(7)에서 예측한 바와 같이 300 정도의 세기비까지 지수함수적으로 증가하다가 이후 일정하게 되며, 최대 30정도의 이득값을 보임을 알 수 있다. 또한, 점으로 표시한 실험값은 신호빔과 참조빔쪽에 감쇄기를 위치시켜 두 빔의 세기비를 조절해 0.01~700의 세기비에서 측정한 것이다. 실험결과 이론값과 실험값이 거의 일치하며, 300의 세기비에서 포화되고 이때의 최대결합계수(Γ_{max})는 $6.9cm^{-1}$ 이다.

그림 4는 Fe-LiNbO₃ 결정의 회절효율 특성을 측정하기 위한 실험도와 실제사진을 나타낸 것이다. 기록빔으로 이용된 514.5 nm의 아르곤레이저(Argon

laser)는 $\frac{\lambda}{2}$ wave plate를 이용해 수직편광으로 조절했고, L1, L2를 이용해 약 1mm 정도의 직경을 갖는 빔이 결정에 입사되도록 했다. 또한, 감쇄기를 이용해 두빔의 세기비($\beta = \frac{I_{1w}}{I_{2w}}$)를 0.01~100의 범위에서 조정했다. 판독빔으로 이용된 632.8 nm의 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)는 세기가 0.807mw 이며, $\frac{\lambda}{2}$ wave plate를 이용해 수직편광으로 조절했다. 두 기록빔의 입사각은 최대의 결합특성을 보이는 14° 로 고정하였고, 판독빔은 브래그 각도(Bragg angle)인 8.6° 로 입사시켰다.

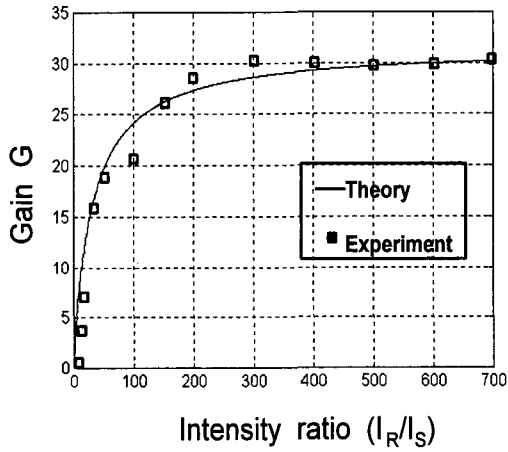
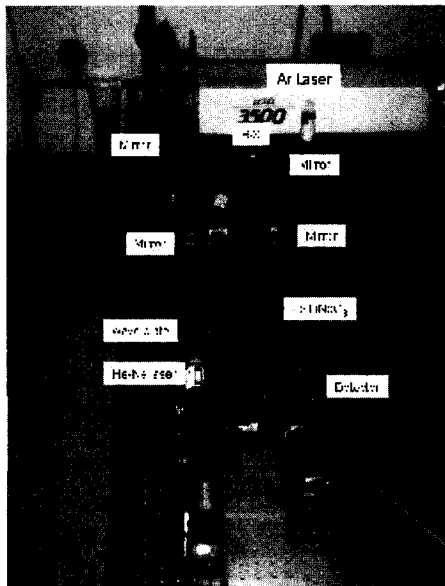
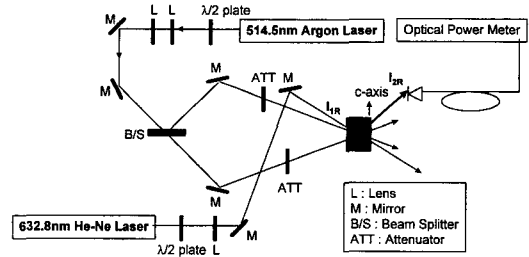


그림 3. 기록빔의 세기비에 따른 이득
Fig. 3. Gain vs intensity ratio of writing beam.



(a)



(b)

그림 4. 회절효율 측정을 위한 광학 시스템(a)실험도 사진 (b)실험도

Fig. 4. Experimental optical setup for diffraction efficiency.

(a) Optical setup diagram (b) Photograph of optical setup

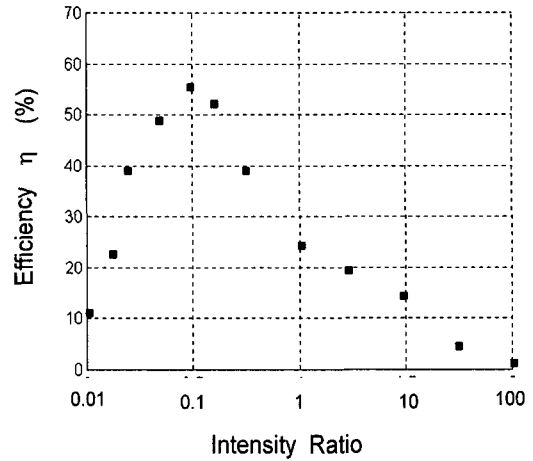


그림 5. Fe-LiNbO₃결정의 회절효율특성
Fig. 5. Diffraction efficiency property of Fe-LiNbO₃ crystal.

그림 5는 기록빔과 읽기빔이 각각 수직편광(extraordinary polarization)되었고 읽기빔이 브래그 각으로 입사될 때, 그림 4의 실험도에서 측정된 회절효율의 실험값을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 회절효율 특성은 광굴절결정을 광학 소자로 응용시 고려해야 할 가장 중요한 요소이며, 이에 대한 실험결과가 국내외적으로 발표된 바 있다.^{[16] [18] [19]} 그림의 결과에서 보면 식(11)에서 예측한 바와 같이 선형적으로 증가하다가 기록빔의 세기비가 1:10일 때 54.13%의 최대 회절효율을 갖고 이후 지수함수적으로 감소하는 특성을 볼 수 있다. 본 실험에서 얻은 54.13%의 최대 효율값은 기존에 발표되어 왔던 연구 결과에 비해

상당히 개선된 결과이며, 이러한 실험결과는 실험시 결정에 입사되는 빔의 적절한 크기 및 정확히 Bragg 조건을 만족시킴으로써 얻은 결과로 생각된다.

하지만, 이와같은 동적 홀로그래프를 이용하면, 한쪽빔만 조사시키거나, 편독빔을 통해 격자정보를 읽을 경우 격자가 지워지기 때문에 장기간 이용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 온도제어에 통해 격자가 지워지지 않도록 고정(fixing)시키는 방식이 응용되고 있는데 일반적으로 약 200° 정도의 온도에서 가장 우수한 효율의 격자고정 작용이 일어난다고 알려져있다. 본 논문의 2광파결합 실험에서 가장 회절효율이 우수한 조건($2\theta=14^\circ$, $\beta=0.1$)에서 격자기록시키고 약 200°에서 격자를 고정시킨 후의 회절효율은 21.4%로 이는 격자 고정시키기 이전 효율치의 약 40% 정도의 효율이다.

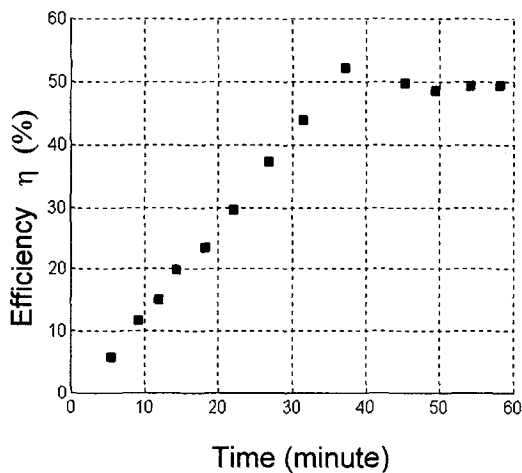


그림 6. Fe-LiNbO₃ 결정의 시간응답특성 ($2\theta=14^\circ$, $\beta=0.1$, $I_1=2.6mW$, $I_2=26mW$)

Fig. 6. Response time of Fe-LiNbO₃ crystal. ($2\theta=14^\circ$, $\beta=0.1$, $I_1=2.6mW$, $I_2=26mW$)

그림 6은 Fe-LiNbO₃ 결정의 반응시간에 대한 실험값을 나타내었다. 시간응답특성의 측정은 그림 4의 회절효율 특성 측정도에서 기록빔으로 이용된 아르곤 레이저쪽에 셔터(shutter)를 위치시켜 각 시간에 대한 회절효율을 측정했다. 두 기록빔의 입사각은 결합계수가 가장 큰 14°로 하였고, 두 빔의 세기비(β)는 0.1로 고정했다. 실험결과 기록시간이 증가함에 따라 선형적으로 회절효율이 증가하다가 포화된 이후 거의 일정한 특성을 보였다. 이러한 시간응답특성은 일반적으로 두 기록빔의 세기와 밀접한 관련이 있는데, 빔 세

기가 강할수록 더 짧은 시간에 회절효율이 포화될 것으로 예측되며, 본 실험조건($I_1=2.6mW$, $I_2=26mW$)에서는 37분에서 최대의 효율 특성을 얻었다.

IV. Fe-LiNbO₃ 결정을 이용한 광정보저장 응용실험

본 실험에서는 광결정결정에 정보를 저장하기 위해 물체빔(object beam)과 참조빔(reference beam)의 입사각도를 달리하면서 홀로그래프를 다중화하는 각 다중화 방식을 이용하였고, 저장하고자 하는 정보를 입력시키기 위한 소자로는 실시간 광확소자인 LCD를 사용하였다. Fe-LiNbO₃ 결정의 부피형 홀로그래프를 이용한 광정보 저장 및 재생을 위한 실험 구성도가 그림 7에 나타나 있다.

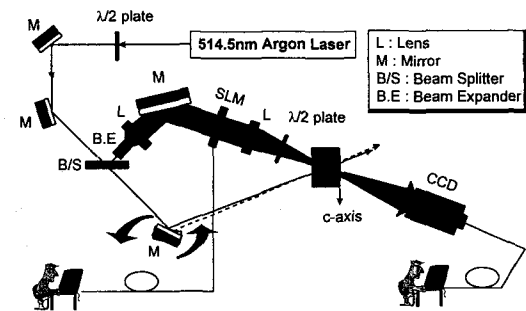


그림 7. 광메모리 응용실험도

Fig. 7. Optical setup of optical memory application

물체빔과 참조빔은 $\frac{\lambda}{2}$ wave plate를 이용해 수직 편광으로 맞추었고, LCD를 통과해 나오는 물체빔은 균일한 분포의 평행광이다. 우수한 회절효율을 갖는 광 정보 저장을 위해 2광파결합 실험으로부터 얻은 최적의 조건($2\theta=14^\circ$, $\beta=0.1$)으로 기록시켰으며, 14°를 기준으로 0.5°씩 각도를 바꾸어가며 다중 기록시키고 재생하였다. 그리고, 다중화할 때 물체빔은 고정시키고 마이크로미터(micrometer)를 이용해 참조빔의 각을 변화시켰다. 본 실험에 이용한 Fe-LiNbO₃ 결정은 반응시간이 매우 길기 때문에 온도에 의한 격자고정 처리는 하지 않았고, 재생된 결과는 결정 뒷단의 스크린에 비추어진 영상을 CCD 카메라를 이용해 얻었다. 입력된 영상은 문자열, 미세한 경계면이 존재하는 동물 영상 그리고 Lena 영상중 일부를 디지털 데이터로 변환된 64×64의 높은 해상도를 갖는 세종류의 영상

이다.

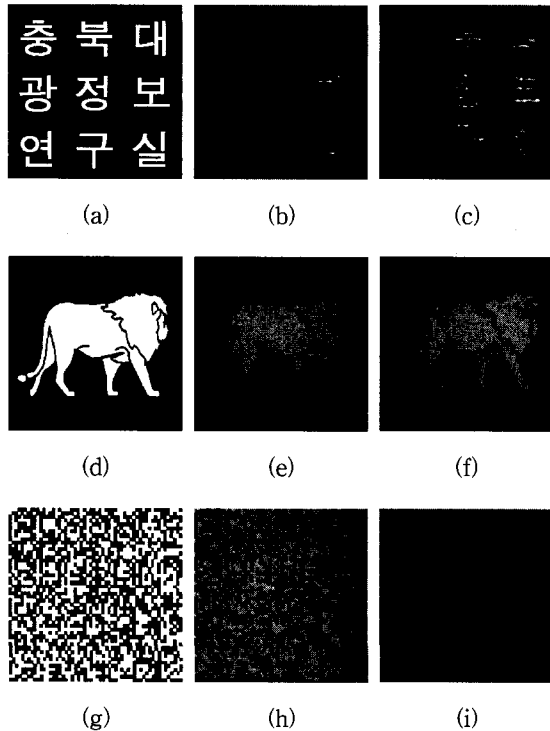


그림 8. 원영상, LCD 디스플레이 영상, 재생된 영상
Fig. 8. Original image, LCD display image, re-constructed image.

그림 8은 그림 7의 실험 구성도에서 기록한 세종류의 원 영상과 LCD에 디스플레이된 영상 그리고 실험으로부터 재생된 결과이다. 그림 8(a), (d), (g)에 나타난 원 영상은 경계부분 뿐 아니라 전체적으로 매우 선명하지만, 실험시 이용한 LCD 자체의 성능으로 인해 결정에 기록되는 그림 8(b), (e), (h)의 LCD 영상은 원 영상에 비해 해상도가 상당히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 8(c), (f), (i)에 보인 재생된 영상은 LCD의 영상과 비교할 때 문자패턴 및 동물 모양의 미세한 경계면, 그리고 64×64의 해상도를 갖는 디지털 데이터까지 거의 완벽하게 재생되었음을 볼 수 있다. 또한, 재생된 영상은 높은 회절효율을 갖기 때문에 CCD 카메라를 이용해 스크린에 비추어진 결과 영상을 얻는데 어려움이 전혀 없었으며, 기존에 발표된 연구 결과에 비해 품질 및 효율이 매우 우수하게 나타났다.

표 1은 실험에 이용된 SLM과 CCD camera의 사양을 나타낸 것이다.

표 1. SLM과 CCD의 사양

Table 1. Specification of SLM and CCD.

SLM	
제조사 및 모델	SEIKO EPSON TPP96007
screen size	26.88(H)mm×20.16(V)mm
pixel number	640(H)×480(V)
CCD camera	
제조사 및 모델	Panasonic WV-CP610
Scanning area	4.9(H)mm×3.7(V)mm
pixel number	768(H)×494(V)
resolution(H)	480 line

V. 결론

본 논문에서는 큰 크기의 결정을 성장시킬 수 있을 뿐 아니라, 전기광학적 특성이 매우 우수한 매질인 Fe-LiNbO₃ 결정(0.015Wt.%, 5mm×5mm×6mm)을 광 메모리 소자로 응용하기 위해 2광파결합을 통한 회절특성을 해석하고 실험하였다. 실험에서 기록빔으로 514.5 nm의 아르곤 레이저를 이용하였으며, 판독빔으로는 632.8 nm의 헬륨-네온 레이저를 이용하였다. 가장 먼저 두 기록빔의 입사각에 대한 결합특성을 조사하기 위해 입사각을 2°의 간격으로 넓혀가면서 결합 계수를 측정한 결과 14°에서 가장 좋은 결합특성을 보였으며 비교적 넓은 각에서 Γ 값의 변화가 크지 않았다. 두 빔의 입사각을 14°로 고정시킨 후 기록빔의 세기비에 따른 이득은 1:300 정도의 비에서 30 정도의 이득으로 포화(saturation)되고 이후 일정한 특성을 보였으며, 이때 최대결합 계수 Γ_{max} 는 $6.9cm^{-1}$ 이다. 또한, 14°의 입사각에서 빔의 세기비에 따른 회절효율 측정결과 두 빔의 세기비가 0.1일 때 54.13%의 높은 최대회절효율을 얻었으며, 시간응답 특성을 측정한 결과 본 논문에서 실험한 조건($I_1=2.6 mW$, $I_2=26 mW$)에서는 37분에서 최대 효율 특성을 보였고, 온도제어에 의해 격자를 고정시킨 후의 회절효율은 21.4%이다. 그리고, 2광파결합 실험을 통해 얻은 가장 우수한 회절특성을 갖는 조건으로 각 다중화 기법과 공간 광학 변조기를 이용해 문자열, 미세한 경계면이 존재하는 그림 영상 및 64×64의 해상도를 갖는 디지털 데이터를 기록시키고 재생하는 응용 실험 결과를 제시함으로써 기존에 연구되어온 결과에 비해

높은 회절효율 및 좋은 품질을 갖는 광 메모리 소자로 적용하기 위한 조건을 제시하였다.

또한, 본 논문에서 2광파결합 실험으로부터 얻은 결과는 광 메모리 소자 뿐만 아니라 광증폭, 광편향, 광필터와 같은 광통신소자에 응용시에도 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 915-917, June 1993.
- [2] J. H. Hong and D. Psaltis, "Dense holographic storage promises fast access," *Laser Focus World*, vol. 32, no. 4, pp. 119-124, April 1996.
- [3] D. Psaltis, D. Brady and K. Wagner, "Adaptive optical networks using photorefractive crystals," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 9, pp. 1752-1759, May 1988.
- [4] S. Wu, Q. Song, A. Mayers, D. A. Gregory and F. T. S. Yu, "Reconfigurable interconnection using photorefractive holograms," *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 8, pp. 1118-1125, March 1990.
- [5] N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata and E. Paek, "Optical implementation of the Hopfield model," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 10, pp. 1469-1475, May 1985.
- [6] R. T. B. James, C. Wah, K. Lizuka and H. Shimotahira, "Optically tunable optical filter," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 35, pp. 8230-8235, Dec. 1995.
- [7] R. Hofmeister, A. Yariv and S. Yagi, "Spectral response of fixed photorefractive grating interference filters," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 4, pp. 1342-1351, April 1994.
- [8] G. Pauliat, J. P. Herriau, A. Delboulbe, G. R. and J. P. Huignard, "Dynamic beam deflection using photorefractive grating in Bi₁₂SiO₂₀ crystals," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 3, no. 2, pp. 306-314, Feb. 1986.
- [9] G. T. Sincerbox and G. Roosen, "Opto-optical light deflection," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 5, pp. 690-697, Mar. 1983.
- [10] 김철수, 김정우, 배장근, 노덕수, 도양희, 김수중, "BaTiO₃에 영상저장을 위한 새로운 각도 다중화 방법," *전자공학회논문집*, 제33권 제11호, pp. 89-96, 1996년 11월
- [11] 강용훈, 김기현, 이병호, "홀로그래프 화상 저장 장치를 위한 광섬유 스펙클 패턴 다중화 방법," *제4회 광전자공학 학술회의 논문집*, pp. 272-274, 1997년 5월
- [12] 안준원, 김정희, 김남, 이권연, 김은수, "F-LiNbO₃ 결정의 광파결합특성을 이용한 광정보 저장," 1997년도 대한전자공학회 추계 종합학술대회 논문집, 제20권 제2호, pp. 953-956, 1997년 11월
- [13] 박진상, 신동학, 장주석, 정신일, "광폴리머 필름의 홀로그래프 기록 특성," *전자공학회논문집*, 제33권 제9호, pp. 143-151, 1996년 9월
- [14] M. Carrascosa and F. Agullo-Lopez, "Theoretical modeling of the fixing and developing of holographic grating in LiNbO₃," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 12, pp. 2317-2322, Dec. 1990.
- [15] V. V. Kulikov and S. I. Stepanov, "Mechanisms of holographic recording and thermal fixing in photorefractive LiNbO₃:Fe," *Sov. Phys. Solid State*, vol. 21, no. 11, pp. 1849-1851, Nov. 1979.
- [16] J. H. Hong and R. Saxena, "Diffraction efficiency of volume holograms written by coupled beams," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 180-182, Feb. 1991.
- [17] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskim, and V. I. Vinetskii, "Holographic storage in the electrooptic crystals. I (steady state)," *Ferroelectrics*, vol. 22, pp. 949-960, 1979.
- [18] 정태혁, 강기형, 정석문, 윤태훈, 김재창, "빔세기기에 따른 Fe:LiNbO₃ 결정의 회절효율," *한국광학회지*, 제4권 제3호, pp. 323-329, 1993년 9월
- [19] 강기형, 정태혁, 정석문, 윤태훈, 김재창, "Fe:LiNbO₃ 도파로의 제작 및 광굴절특성," *한국광학회지*, 제4권 제1호, pp. 108-113, 1993년 3월

저 자 소 개

安 俊 遠(正會員) 第 35卷 D編 第 3號 參照

金 男(正會員) 第 33卷 A編 第 3號 參照

李 權 淵(正會員) 第 33卷 5編 參照