

[3-10] 광굴절 매질을 이용한 Novelty 필터에 관한 연구

○ * * * * ○
본영훈, 박성균, 백남익, 박한규

* : 연세대학교 전자공학과 * : 신구전문대

A study on optical novelty filter using photorefractive media

* * * * *
Y. H. Moon, S. K. Park, N. S. Baek, H. K. Park
* : Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.
** : Dept. of Electronic Eng., Shingu Coll.

ABSTRACT

An optical novelty filter for pattern recognition is implemented using BaTiO₃ crystal as a recording material and twisted-nematic liquid crystal display as spatial light polarization modulator. Optical experiments with the filter show good results for test patterns.

I. 서 론

위상 공역 광학은 1966년 A. Ashkin 등이 LiNbO₃ 비선형 매질에 빔을 입사하면 빔의 강도 분포에 비례하는 굴절률 변화가 유지된다는 사실(광굴절 효과)를 실험적으로 밝힘으로써 시작되었다.^[1] 또한, 1977년 A. Yariv 등은 BSO 결정에서의 축퇴 4광파 혼합(degenerate four wave mixing : DFWM) 현상을 이용하여 위상 공역파의 발생 원리는 홀로그래프와 동일한 현상임을 실험적으로 확인하였으며^[2], 1982년 J. Feinberg 등은 DFWM 실험중 자기 펌핑 위상 공역(self-pumped phase conjugation : SPPC) 현상을 발견하였다^[3].

DFWM의 경우 위상 정합 조건(phase matching condition)이 필요 없고, 위상 공역파의 주파수 변화가 없다는 장점을 갖지만 구조적으로 3개의 빔을 입사시켜야 하는 단점이 있다. 그러나 SPPC의 경우 하나의 신호빔이 결정에 입사되면 결정의 모서리 부분으로 빔이 퍼져 나가는 빔 패닝 효과

(beam fanning effect)가 발생하며, 이 퍼져 나간 빔은 모서리 부분에서 전반사를 두번 일으켜 작용 영역에서 입사하는 신호빔과 다시 만나게 된다. 이 순간에 DFWM 현상이 일어나 높은 반사율의 자기 펌핑 위상 공역파가 발생하게 되는데 이러한 현상은 강한 결합 계수를 갖는 BaTiO₃, SBN 등의 결정에서 볼 수 있다.

상용으로 시판되는 액정 텔레비전의 액정 표시 소자(LCD: liquid crystal display)가 외부에서 인가된 전기 신호의 크기에 따라 빔을 공간적으로 변조할 수 있다는 특성에 착안해 LCD를 SLM으로 사용하고자 하는 제안을 한 이래로 다양하게 응용되고 있다^[4]. 본 논문에서는 LCD를 '0'과 '1' 두 균일한 비디오 신호에 대해 출력빔의 편광각의 차이가 90° 나는 공간 광변광 변조기로 구성하여 Novelty 필터의 실시간 입력단으로 사용한다.

기록된 이미지와 현재의 입력 이미지를 비교하여 변화된 부분만이 출력으로 나타났다가 현재의 입력이 기록되면 출력이 사라지는 Novelty 필터는 전자회로적으로 컴퓨터에서

pixel 키리 뺄셈을 수행하여 구현할 수 있지만, 데이터의 처리 시간이 오래 걸리는 단점이 있고, 고속 병렬 처리가 불가능하므로, 본 논문에서는 광의 병렬 처리 특성을 이용하여 실시간으로 데이터를 처리할 수 있는 Kovelty 필터를 구성하였다.

II. 자기펌핑에 의한 부피 홀로그래프

하나의 신호빔이 BaTiO₃ 단결정에 입사하면 그림 1과 같이 비대칭적으로 빔이 퍼져나가는 빔 패닝 효과(Beam fanning effect)가 일어난다. 이 패닝된 빔은 결정의 모서리 부분에서 되반사되어 신호빔과 간섭이 일어나게 되며, 이러한 간섭은 광결절 현상에 의해 굴절률 격자가 형성된다. 생성된 격자는 입사된 신호빔을 패닝 방향으로 회절을 강하게 일으키므로 k_g 방향의 굴절률 격자만이 점점 강하게 형성되면서 하나의 부피를 형성하여 두 작용 영역이 만들어진다. 이 작용 영역에서 DFWM 현상에 의한 위상 공액파의 형성 과정은 그림 2와 같다.

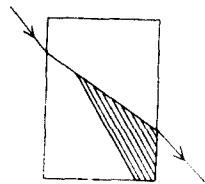


그림 1. 빔 패닝 효과

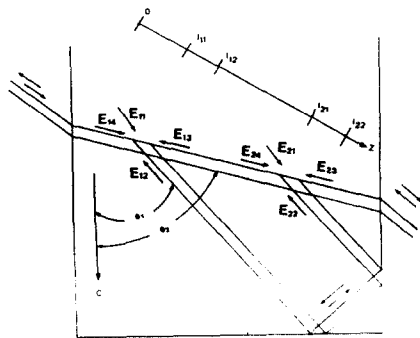


그림 2. SPPC에 의한 위상 공액파 형성 원리

SPPC에 의한 위상 공액파의 발생 원리는 근본적으로 속회 4광파 혼합 메카니즘과 동일하게 해석할 수 있다.

만약 각 작용 영역에서 편광 상태와 주파수가 같은 4광파

$$E_{1j}(r, t) = A_{1j}(r) \exp[i(k_{1j} \cdot r - \omega t)] + c.c.; \text{영역1} \quad (1)$$

$$E_{2j}(r, t) = A_{2j}(r) \exp[i(k_{2j} \cdot r - \omega t)] + c.c.; \text{영역2} \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

가 BaTiO₃ 단결정을 진행하고 다음과 같은 조건을 만족한다고 가정하면

- i) 결정내의 모든 빔들은 평면파이다.
- ii) 각 빔들은 자기파산과는 작용을 일으키지 않는다.
- iii) 굴절률 변화는 시간과 공간상에서 stationary하다.
- iv) 빔 2와 3, 빔 4와 1에 의해 형성된 격자 벡터 $k_g = k_2 + k_3 = k_4 + k_1$ 방향으로의 굴절률 벡터만이 단면에 영향을 미친다.

v) SVFA(slowly varying field approximation)

$$\left| \frac{d^2 A_j}{dz^2} \right| \ll \left| k_j \frac{d A_j}{dz} \right|$$

- vi) 신호빔이 출력빔보다 매우 크다. ($I_1, I_2 \gg I_3, I_4$)
- vii) 결정에서의 손실은 무시할 수 있다.

결합 미분 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dA_{11}}{dz} = -\frac{\gamma}{I_0} (A_{11}A_{14}^* + A_{12}^*A_{13})A_{14} \quad (3)$$

$$\frac{dA_{12}^*}{dz} = -\frac{\gamma}{I_0} (A_{11}A_{14}^* + A_{12}^*A_{13})A_{13}^* \quad (4)$$

$$\frac{dA_{13}}{dz} = \frac{\gamma}{I_0} (A_{11}A_{14}^* + A_{12}^*A_{13})A_{12} \quad (5)$$

$$\frac{dA_{14}^*}{dz} = \frac{\gamma}{I_0} (A_{11}A_{14}^* + A_{12}^*A_{13})A_{11}^* \quad (6)$$

여기에서 $I_0 = \sum_{j=1}^4 |A_j|$ 이고, 한 작용 영역에서 다음과 같은 양들은 상수이므로.

$$A_{11} A_{12} + A_{13} A_{14} = c \quad (7-a)$$

$$I_1 + I_4 = d_1 \quad (7-b)$$

$$I_2 + I_3 = d_2 \quad (7-c)$$

식 (7)를 이용하여, 식 (3)~식 (6)을 $U_{12} = A_{11}/A_{12}^* \cdot V_{34} = A_{13}/A_{14}^*$ 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dU_{12}}{dz} = -\frac{\gamma}{I_0} \{c + (d_1 - d_2)U_{12} - c^* U_{12}^2\} \quad (8)$$

$$\frac{dV_{34}}{dz} = \frac{\gamma}{I_0} \{c + (d_1 - d_2)V_{34} - c^* V_{34}^2\} \quad (9)$$

따라서 위 식 (8)과 식 (9)의 미분 방정식의 해는 다음과 같다.

$$U_{12}(z) = \frac{A_{11}}{A_{12}^*} = \frac{[\Delta - r]a e^{\mu z} - [\Delta + r]e^{-\mu z}}{2c^* (a e^{\mu z} - e^{-\mu z})} \quad (10)$$

$$V_{34}(z) = \frac{A_{13}}{A_{14}^*} = \frac{[\Delta - r]\beta e^{\mu z} - [\Delta + r]e^{-\mu z}}{2c^* (\beta e^{\mu z} - e^{-\mu z})} \quad (11)$$

여기에서, $\Delta = d_2 - d_1$

$$r = (\Delta^2 + 4|c|^2)^{1/2}$$

$$\mu = \gamma r / (2I_0)$$

이고, α, β 는 적분 상수이므로 경계 조건으로부터 구할 수 있다.

마찬가지로 두번째 작용 영역에서 미분 방정식은 상수 c' , d_1', d_2' 와 α', β' 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$U'_{12}(z) = \frac{A_{21}}{A_{22}^*} = \frac{[\Delta' - r']\alpha' e^{\mu' z} - [\Delta' + r']e^{-\mu' z}}{2c'^* (\alpha' e^{\mu' z} - e^{-\mu' z})} \quad (12)$$

$$V'_{34}(z) = \frac{A_{23}}{A_{24}^*} = \frac{[\Delta' - r']\beta' e^{\mu' z} - [\Delta' + r']e^{-\mu' z}}{2c'^* (\beta' e^{\mu' z} - e^{-\mu' z})} \quad (13)$$

또한 두 작용 영역에서의 경계 조건은 다음과 같다.

- (1) $A_{24}(\ell_{22}) = 0$
- (2) $A_{11}(\ell_{11}) = 0, A_{21}(\ell_{21}) = 0$
- (3) $A_{12}(\ell_{12}) = (1-L)^{1/2} e^{i\theta} A_{21}(\ell_{22})$
- (4) $A_{22}(\ell_{21}) = (1-L)^{1/2} e^{i\theta} A_{11}(\ell_{12})$
- (5) $A_{13}(\ell_{12}) = e^{i\phi} A_{23}(\ell_{21})$
- (6) $A_{24}(\ell_{21}) = e^{i\phi} A_{14}(\ell_{12})$

여기에서 L : 반사에 의한 강도 손실(Intensity loss)

θ, ϕ : 한 작용 영역에서 다른 작용 영역으로

진행할때 생기는 위상차

이고, 두 작용 영역에서 상수가 되는 두 양들간에

$$c = 2c' \quad (14)$$

$$d_1 = d_1' + d_2' / (1-L) \quad (16)$$

인 관계가 성립하므로, 경계 조건과 상수들을 이용하여 위상 공역파의 반사율을 구해보면 다음과 같이 표현된다.

$$R = |A_{13}(\ell_{11}) / A_{14}^*(\ell_{11})|^2 = \frac{a(r)b(r)}{4(1-r^2) \tanh^2(\gamma \ell r / 2)} \quad (17)$$

여기에서 $a(r) = r^2 [1 - \tanh^2(\gamma \ell r / 2)]$

$$b(r) = [r - 2 \tanh(\gamma \ell r / 2)]^2 - r^2 \tanh^2(\gamma \ell r / 2)$$

이고, 위상 공역파 반사율은 $\gamma \ell$ 과 r 의 함수인데 r 은 $\gamma \ell$ 과 L 로서 정해지는 양이므로 $\gamma \ell$ 과 L 로서 정해진다.

그림 3에서는 결정에서의 손실 $L=0, 20\%, 60\%$ 일때 결합 계수 $\gamma \ell$ 에 대한 반사율을 나타낸 그래프로 $L=0$ 일때 $\gamma \ell$ 값이 커지면 반사율이 100%도 가능함을 보여준다.

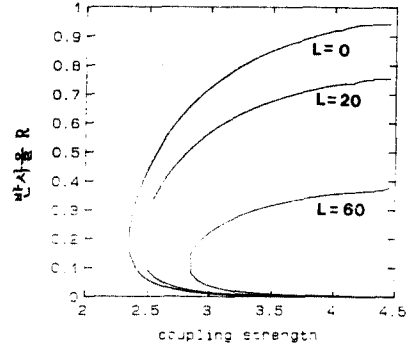


그림 3. 반사 손실(L)에 따른 임계 결합 계수($\gamma \ell$)

III. Novelty 필터의 구성 및 실험

과거에 기록된 입력 이미지와 현재 기록되는 이미지를 비교하여 변화된 부분만이 출력으로 나타났다가 현재 이미지가 기록되면 출력이 사라지는 Novelty 필터는 시간적인 고역 통과 필터(temporal high-pass filter)와 같다.

본 논문에서는 BaTiO₃ 단결정을 기록 매질로 사용하고 개조된 액정 표시 소자를 공간 광편광 변조기로 활용하여 Novelty 필터 시스템을 구현하였다. 본 논문에서 제안한 Novelty 필터 시스템의 구성은 그림 4와 같다.

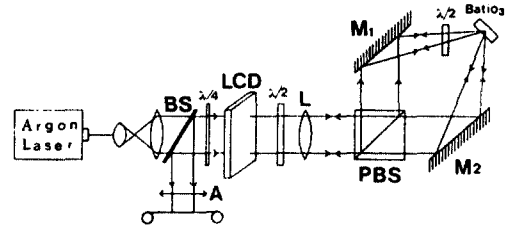


그림 4. Novelty 필터 시스템의 구성도

장원은 Spectral Physics사의 파장이 515 nm이고, 출력이 300 mW인 Argon 레이저를 사용하였고, 레이저 출력빔을 광확장기 및 렌즈를 사용하여 평행광으로 만든 후 빔 분할기 BS를 이용해 신호빔을 만들어 신호빔의 경로에 컴퓨터 또는 CCD 카메라로부터 들어오는 입력 이미지에 의해 변조되는 LCTV를 위치시켰다. 이때 액정 표시 소자를 공간 광편광 변조기로 이용하기 위하여 휘도 조절 단자에 인가되는 바이어스 전압을 10.01 Volt로 하여 '0'과 '1' 두 신호의 편광각의 차이가 25° 나도록 하였다. $\lambda/4$ 위상 지연기는 두 신호인 '0'과 '1'의 출력빔의 강도 차이를 적게 하여 주기

위하여 사용하였다. Michelson 간섭계를 구성하기 위하여 사용한 PBS에 의하여 간섭계의 두 반사빔(정상 편광)과 투과빔(이상 편광)은 서로 90°의 편광각의 차이가 나므로 λ/2 위상 지연기를 이용하여 반사빔의 편광각을 이상 편광으로 바꾸어 주었다. 그리고 초점 거리 f=550 mm 를 갖는 표리에 변환 렌즈 L 을 이용하여 두 빔을 BaTiO₃ 결정에 입사시켜, 서로 독립적으로 높은 반사율의 위상 공액파를 발생시켰다.

반사빔의 위상 공액파가 빔 분할기 BS에 재입사되어 출력측으로 나오는 광은

$$E_1(r, t) = A^*(r) \exp[-i\{(k_2 \cdot r + \omega t) + \phi\}] a_0 \quad (18)$$

이고, 신호광의 위상 공액파가 BS에 재입사되어 출력측으로 나오는 광은 다음과 같다.

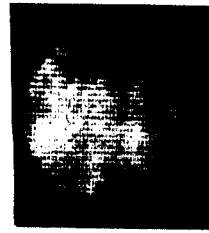
$$E_2(r, t) = A^*(r) \exp[-i\{(k_2 \cdot r + \omega t) + \phi\}] a_0 \quad (19)$$

그러므로 출력측에서는 두 빔은 같은 편광 상태를 갖고, 동위상이므로 출력측에 있는 검광자를 정상 편광 방향으로 놓으면 출력측으로는 빔이 나오지 않게 된다. 만약에 입력 이미지가 변화하게 되면 액정 표시 소자의 '0'의 부분이 '1'로 변화하거나 '1'의 부분이 '0'으로 변화하게 된다. 이 변화된 이미지가 BaTiO₃ 단결정에 기록되기 전에는 과거에 기록된 이미지의 위상 공액파가 LCTV를 재통과한 후 빔분할기 BS에 입사하게 된다. 이 때 빔분할기에 입사하는 위상 공액파는 레이저 출력빔이 빔분할기에 의해 신호빔으로 분리될 때의 편광 상태로 되돌아가지 못하므로 정상 편광과 이상 편광 성분 모두를 가지고 있다. 즉, 변화가 일어난 부분의 빔이 빔 분할기 BS에 재입사된 후 출력측으로 나오는 빔은

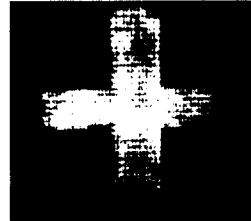
$$E_3(r, t) = A^*(r) \exp[-i\{(k_2 \cdot r + \omega t) + \phi\}] (a_0 + a_0) \quad (20)$$

이 되어, 변화되지 않은 부분은 검광자에 의하여 빔이 차단되고, 변화된 부분은 정상 편광 성분의 빔도 포함되어 있으므로 검광자를 통과하여 출력빔이 나타나게 된다.

변화된 이미지가 결정에 기록된 후에는 BaTiO₃ 단결정에서는 변화된 이미지의 위상 공액파가 발생되어진다. 이 위상 공액파가 LCTV를 재통과한 후, 빔분할기 BS에 입사될 때 빔의 편광 상태는 레이저 출력빔이 빔분할기에 의해 신호빔으로 분리될 때의 편광 상태로 되돌아가게 된다. 그러므로 위상 공액파가 빔분할기를 통과하여 출력측으로 나오는 빔은 식 (4-15)와 같이 이상 편광된 빔이므로 검광자에 의해 빔이 차단되므로 출력 이미지가 사라지게 된다. '+' 입력 이미지에 대한 실험 결과를 사진 1에 나타내었다.



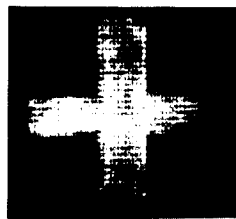
(a) 입력이미지가 없을 때



(b) + 이미지를 입력시켰을 때



(c) + 이미지가 기록되었을 때



(d) + 이미지를 제거하였을 때

사진 1. Novelty 필터 시스템의 결과

IV. 결 론

신호빔의 경로에 공간 광편광 변조기로 만든 LCD를 위치시켜 Novelty 필터의 실시간 입력단으로 사용하였다. 컴퓨터 또는 CCD 카메라로부터 균일한 신호를 LCD에 보내서 이미지를 이동시켰을 때에는 LCD 각 화소마다 특성이 다르기 때문에 출력 상태가 별로 좋지 않았다. 이러한 결과는 액정 표시 소자의 위상 불균일성 및 공간 광편광 변조기로 사용하기 위한 조건이 완전하지 못했기 때문이며, 입력 이미지의 화소와 LCD 화소사이의 정확한 매핑이 일어나지 않았기 때문이라 사료된다. 또한 신호빔과 기준빔이 BaTiO₃ 단결정에 입사하여 위상 공액파를 발생시킬때 두 빔을 같은

위치에 집중시키다 보니 위상 공역파들 사이의 결합이 일어나 양질의 위상 공역파를 얻지 못한데서도 어느 정도의 영향이 있었다고 추측된다.

앞으로 제안한 시스템의 실제 적용을 위해 반도체 광원 등을 이용한 소형 고출력의 광원과 편광각의 차이가 90° 나 는 공간 광변조기가 도입된다면 양질의 출력 이미지를 얻을 수 있으며 무인 감시 시스템, 물체 식별, 물체 추적 시스템 등과 같은 광정보 처리 분야에 다양하게 응용될 수 있을 것이다.

V. 참 고 문 헌

1. L.A.Vander Lugt, "Single detection by complex spatial filtering," IEEE. Trans. on Inf. Theory, IT-10, pp139-145, 1964
2. A.Yariv and D.M.Pepper, "Amplified reflection, phase conjugation, and oscillation in degenerated four-wave mixing," Opt. Lett., Vol. 1, pp16-18, 1977
3. M.Cronin-Golomb, J.O.White, B.Fischer, and A.Yariv, "Exact solution of a nonlinear model of four-wave mixing and phase conjugation," Opt. Lett., Vol. 7, pp313-315, 1982
4. M.Cronin-Golomb, B.Fischer, J.O.White, and A.Yaariv, "Passive (self-pumped) phase conjugate mirror : Theoretical and experimental investigation," Appl. Phys. Lett., Vol. 41, pp689-691, 1982
5. K.R.MacDonald and J.Feinberg, "Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions," J. Opt. Soc. Am., Vol. 73, pp548-553, 1983
6. D.Z.Anderson and J.Feinberg, "Optical novelty filters," IEEE J. of Quan. Elec., Vol. 25, pp635-647, 1989
7. J.Grinberg, and A.D.Jacobson, "Transmission characteristics of a twisted nematic liquid-crystal layer," J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, pp1003-1009, 1976
8. K.Lu, B.E.A.Saleh, "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator," Opt. Eng., Vol. 29, pp240-246, 1983