

비정질 As_2S_3 박막을 이용한 광연결 세기의 변조방식Optical modulation of interconnection strength
using amorphous As_2S_3 thin film

*김홍만, **정재우, ***심창섭, ****곽종훈

* 한국전자통신연구소 광전자연구실

** 한국전자통신연구소 광통신연구실

*** 한국전자통신연구소 기초기술연구부

<ABSTRACT>

A method for optical representation and modulation of synaptic interconnections between neurons using photoanisotropic amorphous As_2S_3 thin film is discussed. Experimental results show that the proposed method can be used for the representation of not only excitatory synaptic connections but also inhibitory synaptic connections. Applications of the method to the implementation of optical learning machine is also discussed.

1. 서론

최근에 대단위 광연결에서 장점을 지니고 있는 광기술을 이용하여 신경회로망 모델을 구현하기 위한 연구가 활발하며 특히 광학적인 방법으로 광연결 세기에 변조를 가함으로써 학습기능을 갖는 신경회로망 모델의 구현에 관한 연구도 이루어지고 있다.¹⁻⁵⁾ 이러한 광학적인 방법에 의한 학습은 대부분 $BaTiO_3$ 와 같은 광굴절 매질(photorefractive medium) 을 이용한 홀로그래픽 광연결 방식을 취한다. 그러나 이러한 방식은 결정 성장이 쉽지 않은 이유로 인하여 충분히 큰 크기의 결정을 얻기가 어려우며 또 광연결 방식에 있어서도 홀로그래픽을 이용하는 내적방식에만 거의 국한된 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 외적 방식의 신경회로망 모델에서 신경들간 연결세기의 광변조를 위하여 As_2S_3 박막의 광유도 비동방성(photoanisotropic)을 이용하는 방법을 소개하였다.

* 본 연구는 과학기술처 특정연구 과제로 수행되었습니다.

2. 비정질 As_2S_3 박막에서의 광유도 비동방성

Chalcogenide 원소(VI족)인 S, Se, Te 등을 포함하는 비정질 반도체는 고립전자쌍(lone-pair state)의 존재로 구조의 유연성이 있어서 구조변화 등의 비정질 특유의 흥미있는 현상을 나타낸다. 특히 광조사(illumination)와 열처리에 따라 광학적 특성의 변화가 일어나는데 이러한 현상은 광메모리로 이용이 가능하므로 특히 주목을 받아왔다.⁶⁾ 이러한 chalcogenide 반도체의 하나인 비정질 As_2S_3 박막에서 며 간격 에너지(약 2.34 eV)에 대응하는 Ar-ion 레이저(514 nm; 2.41 eV)광을 조사할 때 광암색화 현상과 광유도 비동방성 현상이 관찰된다.⁷⁾ 광암색화 현상은 광조사에 의해 비가역적으로 반응하는데 비해 광유도 비동방성은 가역적이므로 후자는 여러번 연결세기를 높이거나 줄이는 과정이 필요한 신경회로망에서 연결세기 변조에 이용할 수 있다. 광유도 비동방성은 비선형 광학현상으로 다루어지며 3차 비선형 전기 감수율(non-linear susceptibility)

와 관계가 있다. 동방성 매질에 입사하는 강한 세기의 펄프파 $E(\omega)$ 와 약한 세기의 탐사파 $E(\omega')$ 에 의해 유도되는 ω' 의 진동수를 갖는 3차 비선형 분극은⁸⁾

$$P_i^{(3)}(\omega') = \sum_j 6 \left\{ \chi_{1122}^{(3)} E_i(\omega') E_j(\omega) E_j^*(\omega) + \chi_{1212}^{(3)} E_j(\omega') E_i(\omega) E_j^*(\omega) + \chi_{1221}^{(3)} E_j(\omega') E_j(\omega) E_i^*(\omega) \right\} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 i, j 는 x 혹은 y 축 방향을 나타내며 탐사파와 펄프파의 진행방향은 z 축으로 가정했다. (1)식으로부터 펄프파의 편광에 평행한 방향 및 수직인 방향으로 유도되는 분극은

$$P_{II}^{(3)}(w') = 6 \chi_{1111}^{(3)} |E_x(w)|^2 E_x(w') \equiv \Delta \chi_{xx} E_x(w') \quad (2-a)$$

$$P_{I}^{(3)}(w') = 6 \chi_{1122}^{(3)} |E_x(w)|^2 E_y(w') \equiv \Delta \chi_{yy} E_y(w') \quad (2-b)$$

와 같이된다. 펄프파에 의해 유도되는 선형 감수율은

$$\Delta \chi(w') \equiv \Delta \chi_{xx} - \Delta \chi_{yy} = 6(\chi_{1111}^{(3)} - \chi_{1122}^{(3)}) |E(w)|^2 \quad (3)$$

가 되며 유도된 선형복굴절은

$$\Delta m = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re}\{\Delta \chi(w')\} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 비정질 As_2S_3 박막은 펄프파의 광조사에 의해서 포화상태 까지 압축화가 이루어진 후의 경우에만 고려하므로 $\text{Im}\{\Delta \chi(w)\}$ 은 변화가 없는 것으로 가정하였다. 길이 l 인 매질을 지나는 동안 펄프파의 편광 방향과 $\pm 45^\circ$ 방향으로 선편광된 탐사파는

$$\Delta \phi = \pm \frac{\omega'}{c} \Delta m l = \pm \frac{2\pi}{\lambda} \Delta m l \quad (5)$$

만큼의 상대적인 위상지연을 느끼게 된다. 여기서 펄프파의 편광 방향이 x 축과 $\pm 45^\circ$ 를 이루고 탐사파의 편광방향도 x 축과 평행한 경우에 대해서 펄프파의 편광 방향에 따라서 탐사파의 변조가 어떻게 이루어지는지를 살펴보자. 비선형 매질을 통과하기 전의 탐사파를 E_0 , $\pm 45^\circ$ 방향의 펄프파로 조사된 매질을 통과한 후의 탐사파를 E_{\pm} 로 표시하면

$$E_{\pm} = |E_0| \left(\hat{x} \cos \frac{\Delta \phi}{2} + \hat{y} \sin \frac{\Delta \phi}{2} e^{\pm i \frac{\pi}{4}} \right) \quad (6)$$

가 된다. 여기에 fast 축이 x 축과 나란한 $\lambda/4$ 위상지연판을

통과한 탐사파를 E'_{\pm} 라 하면

$$E'_{\pm} = |E_0| \left(\hat{x} \cos \frac{\Delta \phi}{2} \pm \hat{y} \sin \frac{\Delta \phi}{2} \right) \quad (7)$$

와 같이 x 축으로부터 $\pm \frac{\Delta \phi}{2}$ 방향으로 선형 편광된 빛이 된다. 여기서 다시 x 축과 θ 의 편광 방향을 이루는 검광자를 통과시킨 후의 탐사파 $E''_{\pm}(\theta)$ 는

$$E''_{\pm}(\theta) = |E_0| \cos\left(\theta \mp \frac{\Delta \phi}{2}\right) \quad (8)$$

와 같이되며 펄프파의 편광방향과 θ 에 따라서 이루어지는 여러가지 탐사파의 변조를 정리하면 다음 표 1 과 같다. 표 1 로 부터 탐사파의 위상 변조 ($\theta = \pi/2$) 혹은 진폭변조 ($\theta = \pi/2 \pm \Delta \phi/2$) 가 가능함을 알 수 있으며 특히 위상 변조가 가능한 점은 코우히어런트 광을 사용하는 경우 양의 값 뿐만 아니라 음의 값도 표현이 가능하므로 양의 연결세기 (excitatory connection) 및 음의 연결세기 (inhibitory

connection) 를 표현하여야 하는 신경회로망의 실현에 큰 장점을 줄 수 있다.

3. 실험 및 결과

실험에 사용된 As_2S_3 박막은 슬라이드 유리 기판 위에 약 $6\mu m$ 두께로 진공증착한 것이며 증착이 끝난 박막은 $180^\circ C$ 에서 약 30 분 정도 열처리한 후 식혀서 사용하였다. 다음 그림 1 은 비정질 As_2S_3 박막의 광유도비동방성을 관찰하기 위한 실험장치도이다. 펄프파로는 Ar-ion 레이저 ($514.5nm$) 광을 이용하였으며 탐사파로는 He-Ne 레이저 ($633nm$) 광을 이용하였다. 표 1 에서와 같이 $0 = \pi/2 - \Delta \phi/2$ 가 되도록 검광자의 각도 θ_3 를 조정하고 탐사파의 편광방향을 45° 혹은 -45° 로 번갈아 바꾸어 주면서 유도된 비동방성의 시간에 따른 변화를 그림 2 에 나타내었다. 그림 2 에서 θ_3 는 약 88° 로 두었으며 펄프파의 편광방향에 따라 가역적인 광변조가 이루어짐을 알 수 있다.

다음 그림 3 은 외적 방식의 신경회로망 모델에 비정질 As_2S_3 박막을 이용하여 신경간 연결세기를 표현하고 병렬적으로 광변조할 수 있는지를 확인하기 위한 실험구성도이다. 입력 패턴은 그림 4-(a)와 같이 45° 및 -45° 로 공간적인 편광 변조된 패턴을 사용하였다. 패턴의 실시간 입력을 위해서 Epson 사의 액정패널비전 ET-20을 개조하여 만든 액정광변조기 (liquid-crystal spatial light modulator ; LCSLM) 를 사용하였으며 컴퓨터에서 도안된 패턴이 화상처리카드 (DT-2853, Data Translation 사) 를 통하여 LCSLM 에 영상이 기록되게 하였다. 또 LCSLM 을 통과한 펄프파는 각 화소에 가해진 전압에 따라 $+45^\circ$ 혹은 -45° 방향으로 선형편광된 빛이 되도록 하였다. LCSLM에 구동된 영상을 As_2S_3 박막면에 기록하기 위해서 LCSLM 다음에 렌즈를 두어 LCSLM의 영상평면이 As_2S_3 박막면과 일치하게 하였다. 또 As_2S_3 박막면에서 두번 푸리에 변환한 평면과 최종 영상이 맺어지는 스크린이 일치하게 두고 스크린 앞에 cylindrical 렌즈를 축점거리 f 만큼 떨어져 두어 y 축 방향으로 합한 결과가 x 축 상에 나타나도록 하였다. 그림 4-(b)는 탐사파를 진폭 변조한 경우의 패턴의 모양과 그것의 y 축 방향으로 합한 모양을, 그림 4-(c)는 위상 변조한 경우의 그것을 각각 나타낸다. 진폭 변조한 경우에는 세번째 행의 합이 0 이 아닌데 비하여 위상 변조한 경우에는 0 이 됨을 알 수 있다.

그림 5 는 P_1 매트릭스가 기록된 비정질 As_2S_3 박막에 P_2 matrix를 노출시키면서 각 매트릭스의 요소값이 시간에 따라 변화하는 모양을 관찰한 것으로 원래의 matrix 값이 병렬적으로 수정되어 질 수 있음을 알 수 있다. Matrix 값을 수정해 주기 위해 가해지는 matrix P_2 는 신경회로망의 학습규칙에 의해 결정되어지며 노출시간은 학습의 속도와 연판된다. 이러한 요소들을 고려한 실제의 신경회로망의 광학적 학습실험은 현재 진행 중에 있다.

4. 토의 및 결론

지금까지 비정질 As_2S_3 박막을 이용한 신경간 연결새기의 표현과 변조방식에 관하여 살펴보았다. 이 방법은 탐사파를 위상변조하는 경우 양의 연결새기 및 음의 연결새기의 표현도 가능한 장점을 지닌다. 그러나 이러한 경우에도 출력되는 값은 항상 빛 진폭을 제외한 형태인 빛 세기 이므로 그 결과는 항상 양의 값만으로 나타나므로 신경회로망의 학습방법으로 많이 이용되는 델타 룰(delta-rule)을 그대로 적용하기는 어렵다. 따라서 이 경우에는 출력 빛 세기가 양의 값인지 혹은 음의 값인지를 확인하는 과정이 필요하며 이것은 표 1 에서 $\theta = \pi/2 + \Delta\phi/2$ 인 경우와 $\theta = \pi/2 - \Delta\phi/2$ 인 경우의 출력 빛 세기의 크기를 비교함으로써 알 수 있다.

신경회로망의 신경간 연결새기를 기록하고 변조하기 위한 매질로써 비정질 As_2S_3 박막은 유도되는 비동방성의 정도가 작으므로($\Delta n \sim 10^{-3}$) 박막의 두께가 얇아지면 그 효과를 관측하기 어렵다는 단점을 지니고 있지만 빛 변조가 가역적이며 비교적 넓은 면적에 균일한 박막을 얻기가 쉽고 빛에 의해 addressing 되므로 고밀도로 병렬적으로 기록될 수 있으며 비정질 As_2S_3 박막의 더 간격에너지 보다 큰 에너지를 갖는 Ar-ion 레이저 빛에 의해서 유도된 비동방성이 더 간격에너지 보다 작은 에너지를 갖는 He-Ne 레이저 빛에 의해서 파손되지 않는다는 등의 많은 장점을 지니므로 학습기능을 갖는 신경회로망의 광학적 구현에 있어서 중요한 매질이 될 수 있을 것으로 기대된다.

< 참고문헌 >

1) D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, Appl. Opt. 9, 1752 (1988).
 2) D. Psaltis, C. H. Park, and J. Hong, Neural Networks,

1, 149 (1988).
 3) J. Hong and Pochi Yeh, Proc. of the Optical Computing Meeting at Salt Lake City, 307 (1989).
 4) N. H. Farhat, Appl. Opt. 26, 5093 (1987).
 5) Y. Owechko, OSA Topical Meeting on Optical Computing, Salt Lake City, 44 (1989).
 6) S. Zembutsu, Y. Toyoshima, T. Igo and H. Nagai, Appl. Opt., 14, 3073 (1975).
 7) 박종훈, 박사학위 청구논문, 한국과학회 (1987).
 8) P. D. Maker and R. W. Terhune, Phys. Rev. A 137, 801 (1965).

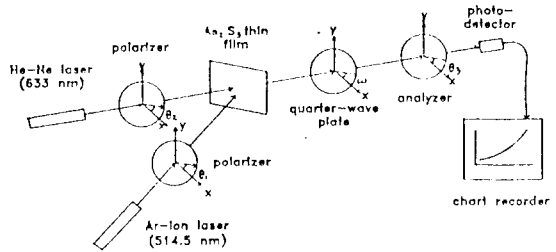


Fig. 1. Experimental arrangements for detecting the photoinduced anisotropy in amorphous As_2S_3 thin film.

표 1. 펄프의 편광방향과 검광자의 편광방향에 따른 탐사파의 변조

	펄프의 편광방향	
	45°	-45°
$\theta = \frac{\pi}{2}$	$E_+'' = E_0 \sin(\frac{\Delta\phi}{2})$ $I_+'' = I_0 \sin^2(\frac{\Delta\phi}{2})$	$E_-'' = - E_0 \sin(\frac{\Delta\phi}{2})$ $I_-'' = I_0 \sin^2(\frac{\Delta\phi}{2})$
$\theta = \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\phi}{2}$	$E_+'' = 0$ $I_+'' = 0$	$E_-'' = E_0 \sin(\Delta\phi)$ $I_-'' = I_0 \sin^2(\Delta\phi)$
$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\phi}{2}$	$E_+'' = - E_0 \sin(\Delta\phi)$ $I_+'' = I_0 \sin^2(\Delta\phi)$	$E_-'' = 0$ $I_-'' = 0$

$(I_{\pm}'' = |E_{\pm}''|^2, I_0 = |E_0|^2)$

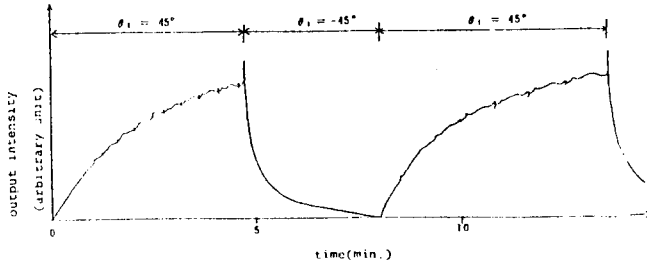


Fig. 2. Temporal behavior of photoinduced anisotropy in amorphous As_2S_3 thin film ($\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 1.8^\circ$, $I_{pump} = 100 \text{ mW/cm}^2$).

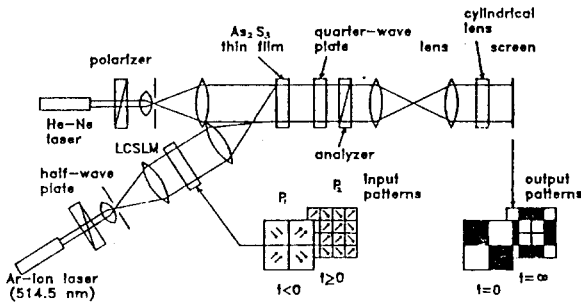


Fig. 3. Experimental arrangements for the modulation of interconnection strength.

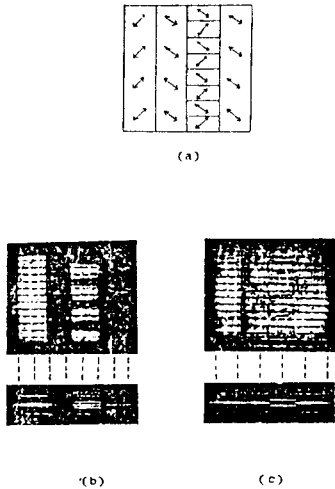


Fig. 4. (a) Input pattern used for polarization modulation of pump beam. Results of (b) amplitude modulation ($\theta_3 = 1.8^\circ$) and (c) phase modulation ($\theta_3 = 0^\circ$) of the probe beam.

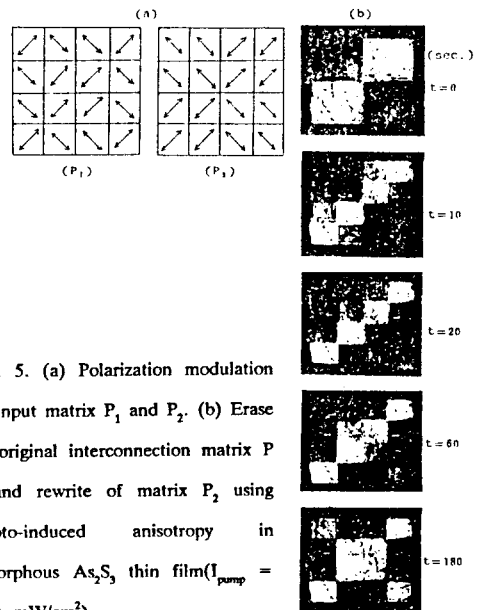


Fig. 5. (a) Polarization modulation of input matrix P_1 and P_2 . (b) Erase of original interconnection matrix P_1 and rewrite of matrix P_2 using photo-induced anisotropy in amorphous As_2S_3 thin film ($I_{pump} = 200 \text{ mW/cm}^2$).