

## 액정 표시 소자를 이용한 광 논리 게이트에 관한 연구

## (A Study on the Optical Logic Gates Using Liquid Crystal Displays)

宋柱 炤\*, 權元 鉉\*, 殷在 定\*, 朴漢 奎\*

(Joo So Song, Won Hyun Kwon, Jae Jung Eun and Han Kyu Park)

## 要 約

본 논문에서는 두개의 LC TV를 사용하여 부울 대수를 광학적으로 수행할 수 있는 로직 게이트를 구성하였다. 광의 편광변조 이론에 근거하여 광 논리 게이트 직렬 시스템과 병렬 시스템을 구성하고 16가지의 논리 연산을 수행하여 그 결과를 제시하였다.

## Abstract

In this paper, the implementation of optical parallel boolean logic gates using two Liquid Crystal TVs is described. Based on the theory of polarization modulation, two Liquid Crystal TVs are arranged in tandem and parallel to perform optical logic operations. Experimental results of binary image using two Liquid Crystal TVs are presented.

## I. 서 론

광학적 정보처리는 2차원 정보를 데이터의 모든 점에서 병렬 처리가 가능하므로 초고속, 대용량의 정보 처리 능력을 갖는다. 광학 시스템의 이러한 장점들을 실현하기 위해서는 광을 공간적으로 변조시킬 수 있으면서 실시간으로 동작하고, 한 번 사용한 후에도 재사용이 가능한 소자 즉, 공간 광 변조기 (spatial light modulator : SLM)가 필수적으로 요구된다.

고가이고, 비실용적인 기존의 SLM에 대한 단점을 극복하기 위하여 소형의 휴대용 흑백 액정 TV (liquid crystal TV : LC TV)를 SLM으로 이용하고자 하는 제안은 1985년 H. K. Liu<sup>[1]</sup> 등에 의해

이루어졌으며 1986년 D. A. Gregory<sup>[2]</sup> 등은 LC TV를 이용해 패턴인식을 수행하였고, 현재 컬러 LC TV를 이용한 컬러 패턴 인식, 비간섭성(Incoherent) 광 정보 처리에 대한 연구가 진행되고 있다.

액정 소자를 이용한 논리 게이트에 대한 연구는 1975년 Tsvetkov<sup>[3]</sup> 등에 의해 처음으로 제안된 후, 1981년 Collins<sup>[4]</sup> 등은 LCLV(liquid crystal light Valve)를 이용한 광 논리 게이트를 구성하였다. 1987년 Gregory<sup>[5]</sup> 등이 흑백 LC TV를 이용하여 광 논리 게이트를 구성하였으나, 논리 동작중 일부만을 수행할 수 있다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 실용성이 떨어지는 기존의 SLM을 대신하여, 값이 싸고 컴퓨터로 입력이 가능한 흑백 LC TV를 이용하여, 액정 TV 표면의 균일성을 Mach-Zehnder 간섭계로 측정 한 후, 광의 편광 변조 (polarization modulation) 이론에 근거하여 광 논리 게이트를 구성하였다.

\*正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)  
接受日字 : 1988年 2月 12日

LC TV의 입력은 Apple-II 컴퓨터로 프로그래밍하였고, 두 개의 LC TV를 사용해 직렬과 병렬 논리 게이트 시스템을 구성한 후, 결과를 사진으로 제시하였다.

## II. 기하 광학적 광 정보 처리

그림 1과 같이 임의의 두 입력  $f(x, y)$ 와  $g(x, y)$ 가 서로  $a$ 만큼의 거리를 두고 위치하고 이와  $b$ 만큼 떨어진 출력면의 광 분포를  $s(x, y)$ 라 하자.  $f(x, y)$ 나  $g(x, y)$ 는 SLM이나 필름 마스크 등의 투명체(transparency)라 하고 광원은 회절 현상 없이 두 입력면을 통과한다고 가정한다.

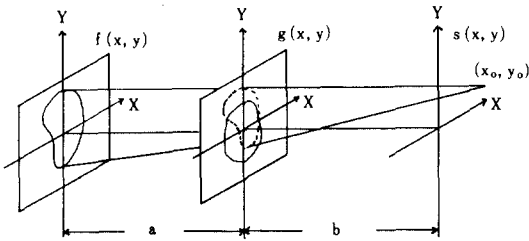


그림 1. 기하 광학적 광 정보처리 시스템  
Fig. 1. Optical information processing based on the geometrical optics.

기하학적으로 볼때 출력면에 대해  $f(x, y)$ 는  $g(x, y)$ 에 대해  $[ax_0/(a+b), ay_0/(a+b)]$ 만큼 이동된 것이므로 출력단의 광 분포  $s(x_0, y_0)$ 는

$$s(x_0, y_0) = \iint_{-\infty}^{\infty} f\left[\frac{x-ax_0/(a+b)}{b/(a+b)}, \frac{y-ay_0/(a+b)}{b/(a+b)}\right] g(x, y) dx dy \quad (1)$$

이다. 이 식은 공간 좌표계에서의 두 입력에 대한 cross-correlation을 의미하며 적분에 대한 결과는 마스크에 대한 스캐닝(Scanning) 없이 모든 출력점에서 동시에 나타난다.

만약  $a=0$  이라 하면,

$$s(x_0, y_0) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g(x, y) dx dy \quad (2)$$

가 되므로, 이는 두 입력의 적에 대한 결과가 출력단에 나타나게 된다.

액정은 액체 결정(Liquid Crystal)의 약어로, 액체의 유동성과 고체 결정의 이방성(Anisotropy)을 동시에 갖는 중간적 성질의 물질로서, 일정한 온도범

위에서 액정 상태가 나타나는 것과 물 또는 다른 액체와 혼합되면 액정 상태가 나타나는 것이 있다. 전자를 서모트래픽(thermotropic) 액정이라 하고, 후자를 리오투래픽(lyotropic) 액정이라 하는데, 표시 소자로서는 서모트래픽 액정이 주로 이용된다.

액정 TV는 투과형 SLM의 일종이라고 할 수 있다. 액정 TV는 가격이 저렴하고, 다른 SLM에 비해 큰 SBP(space-bandwidth product)를 가지고 있다. LC TV의 동작은 광의 복굴절 효과와 액정 자체의 twisted nematic 효과에 기인한다. LC TV 표시판의 기본 동작은 그림 2에 도시하였다.

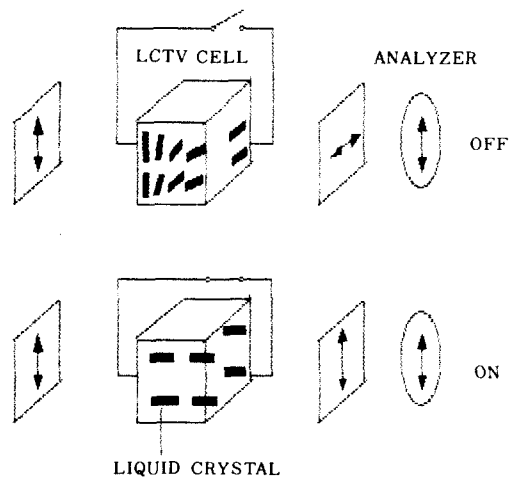


그림 2. 액정 TV 표시판의 기본 동작  
Fig. 2. Basic operation of LCD.

액정 TV의 표시판에는 두 개의 투명 전극 사이에 90° twist 된 nematic 액정이 들어있다. 전장이 인가되지 않았을때 편광 방향은 twist 된 액정 분자들에 의해 90° 회전하고, 충분히 강한 전장이 인가되면 액정 분자들은 인가 전장에 평행하게 배열한다. 이때는 액정 분자들이 편광 방향에 영향을 미치지 않는다.

대부분의 광 논리 게이트에서는 "1"과 "0"이 "LIGHT ON"과 "LIGHT OFF"로 표현된다. 이러한 ON/OFF 방식의 논리 상태에서는 "1"에서 "0"으로 바뀔 때 광 에너지 손실이 많고, "0"에서 "1"로 스위칭 될 때는 광이 발생된다. 즉, 광자 에너지가 낭비되고 불필요한 열이 발생하게 되는 데, 이 열을 냉각시켜야 하므로 프로세서의 속도를 제한하는

요인이 된다. 이에 반해, 본 논문에서 다룬 편광 현상을 이용한 이진 논리 게이트는 에너지 손실이 적고, 시스템이 간단하다는 등의 장점을 지니고 있다. 또한, 편광은 대표적인 두개의 상태를 가지므로 이진 논리에 적합하다는 장점이 있다.

Ⅲ. 실험 및 결과

본 실험에서 사용한 액정 TV는 CASIO 사의 모델명 TV 20과 RADIO-SHACK 사의 모델 번호16-156 으로서, 전자는 41.2×51.2mm<sup>2</sup>의 화면 크기와 120×160개의 화소를 갖고 있으며, 화소 하나의 크기는 330×330μm<sup>2</sup>이다. 후자는 53.7×71.7mm<sup>2</sup>의 화면 크기와 143×192개의 화소를 갖고 있으며, 화소 하나의 크기는 375×375μm<sup>2</sup>이다.

간섭성 광 정보 처리에서는 공간적 위상 정보가 잘 유지되어야 하므로 LC TV 표시 판의 양면에 부착되어 있는 플라스틱 편광기는 제거하고, 또한 화면의 표면이 균일해야 하므로 사용된 액정 TV의 표면을 그림 3 과 같은 Mach-zehnder 간섭계로 측정하였다.

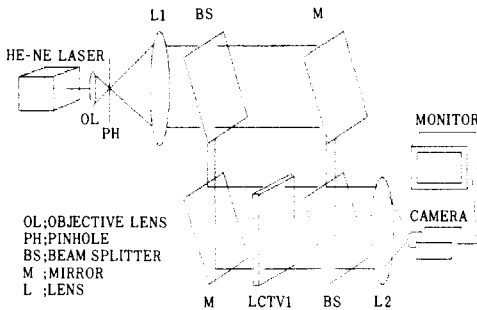
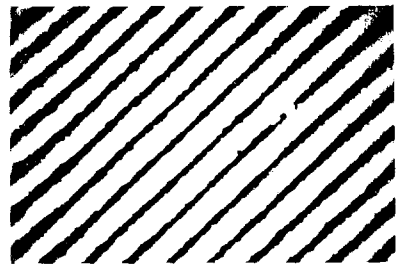


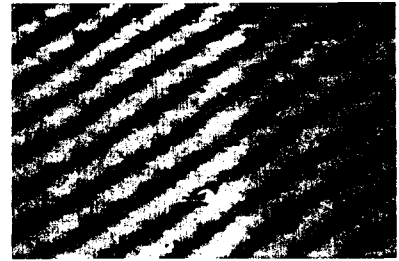
그림 3. Mach-Zehnder 간섭계  
Fig. 3. Mach-Zehnder interferometer.

광원은 파장이 0.6328μm 이고 출력이 5 mW인 He-Ne 레이저를 사용하여 평행 광을 만든 뒤 Beam-Splitter와 Mirror를 사용하여 두 방향으로 나누고 측정 대상인 액정 TV 표시판을 Beam-Splitter 와 Mirror 사이에 삽입하여 두 경로간의 차이에 의한 위상 변화가 간섭 무늬로 나타나게 된다. 액정 TV 를 삽입하지 않은 경우와 액정 TV를 각각 삽입한 경우의 간섭 무늬 결과를 그림 4에 제시하였다.

측정 물체를 삽입하지 않은 경우의 간섭 무늬는



(a)



(b)



(c)

그림 4. 간섭계로 측정한 결과  
(a) 액정 TV를 삽입하지 않은 경우  
(b) Casio TV-20을 삽입한 경우  
(c) Radio shack 16-156을 삽입한 경우  
Fig. 4. Experimental results.  
(b) Interferogram with no LC TV.  
(b) Interferogram with a Casio TV-20.  
(c) Interferogram with a Radio shack 16-156.

그림 4(a)에서와 같이 직선이 나타나고, 표면이 불균일한 물체를 삽입한 경우에는 곡선이 나타나게 된다. 본 실험에서 사용된 두 LC TV 의 표면은 그림4(b),(c)에서 보는 바와 같이 국소적인 불균일성은 조금씩 있으나, 거의 직선에 가까움을 알 수 있다. 이는 두 LC TV가 별도의 위상 보상이 없이도 SLM으로 이용될 수 있음을 보여준다.

두 개의 LC TV를 이용한 광 논리 게이트 시스템을 기하 광학적 편광 변조 이론에 근거하여 그림5에 도시하였다.

광원은 He-Ne Laser를 사용하고, 평행광을 만들어 편광기 P1에 통과 시킨다. 이때, 선형편광기 P1의 편광 각도를 수직방향, 즉 0°로 하여 입사광의 수직 편광 성분만을 통과시키도록 한다. 그림5(a)는 광 논리 게이트 직렬 시스템으로, 편광기 P1뒤에 두 LC TV를 직렬로 배열하고 선형편광기 P2는 LC TV 1과 LC TV 2 사이에, 또 선형편광기 P3는 LC TV 2 뒤에 각기 배열한다. 이때, 두 LC TV 간의 거리는 회절 효과를 무시하기 위하여 아래 조건을 만족해야 한다.

$$Z \ll \frac{d1 \times d2}{\lambda} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda$ 는 광의 파장, Z는 두 LC TV 간의 거리, d는 화소 하나의 폭이다. He-Ne 레이저의 파장

$\lambda$ 는  $0.6328\mu\text{m}$ 이고, CASIO TV-20의 d는  $330\mu\text{m}$ , RADIO SHACK 16-156의 d는  $375\mu\text{m}$ 이므로 빛 식은 아래와 같이 된다.

$$Z \ll 20\text{cm} \quad (4)$$

본 실험에서는 편광기 P2가 LC TV 1과 LC TV 2 사이에 들어가야 하는 배열상의 문제로 15cm의 거리를 두었다.

그림5(b)는 병렬 시스템으로, 편광기 P1을 통과한 광을 beam splitter와 mirror를 이용하여 두 방향으로 나눈 뒤, 두 LC TV를 평행하게 배열한다. 편광기 P2는 LC TV 1뒤에, 편광기 P3는 LC TV2뒤에 배열한다. 편광기 P2와 P3를 통과 한 광은 beam splitter와 mirror를 이용하여, 두 경로의 광을 중첩시켜 출력을 얻는다. 스크린은 white board에 백색 종이를 부착시킨 것을 이용하였다.

APPLE-II 컴퓨터의 고해상 그래픽 모드를 이용하여, BTL(Bright True Logic)로, 액정 TV 1에는 그림6(a)와 같은 패턴을, 액정 TV 2에는 그림6(b)와 같은 패턴을 코딩 입력한다. 이때 APPLE-II 고해상 스크린의 화소 갯수는 280개 이고, CASIO TV-20의 가로 화소 갯수는 160이므로 약 1.8 : 1로 정합되고, RADIO SHACK 16-156의 가로 화소 갯수는 192개 이므로 약 1.5 : 1로 정합된다.

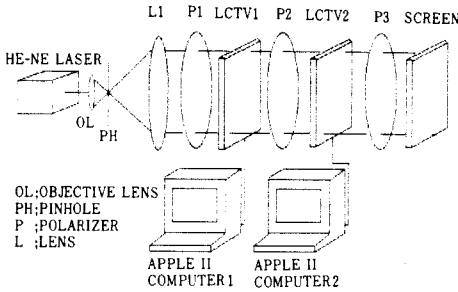
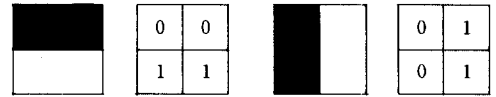


그림5(a). 광 논리 게이트 직렬 시스템  
Fig.5(a). Optical logic gates system in tandem.



(a) (b)

그림 6. 이진 입력 패턴

- (a) 액정 TV 1의 입력
- (b) 액정 TV 2의 입력

Fig. 6. Binary input pattern.

- (a) Input pattern of the LC TV 1.
- (b) Input pattern of the LC TV 2.

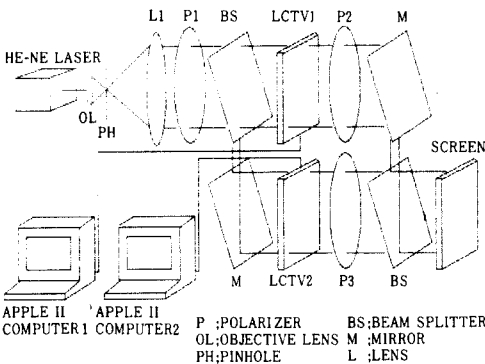


그림5(b). 광 논리 게이트 병렬 시스템  
Fig.5(b). Optical logic gates system in parallel.

그림 5의 시스템에서, 선형편광기 P1, P2, P3는 편광 되지 않은 광을 일정 편광 방향의 광만을 통과시키며, 편광기를 회전시킴으로써 통과시킬 광의 편광 방향을 조절할 수 있다. 본 실험에서는 편광기 P1은 0°로하여, 광의 수직 편광 성분만 통과 시키도록 하고, 편광기 P2와 P3의 각도를 조합시키고, LC

TV 자체의 brightness를 조정함으로써 16개의 논리 게이트를 구성하였다.

16개의 논리 게이트 중 F7(OR), F11(A+B),F13(A+B), F(NAND) 4 개의 게이트는 그림5(b) 병렬 시스템을 이용하여 결과를 얻었고, F0(FALSE),F1(AND) 등 12개의 게이트는 그림5(a) 직렬 시스템을 이용하여 결과를 얻었다.

16가지의 논리 게이트중 일부 결과를 그림 7에 제시하였고, 각 게이트 동작에 대한 편광기 P2와 P3의 각도를 표 1에 나타내었다. 이 때, P3의 각도는 P2를 기준으로 하는 상대 각도이다.

F1은 AND 게이트로서, 직렬 시스템에서 P2가 25°, P3가 115° 일때이며, F2는 A AND  $\bar{B}$  게이트로서 직렬 시스템에서 P2가 25°, P3가 5° 일때이다. F4는  $\bar{A}$  AND B 게이트로서 직렬 시스템에서 P2가 -25°, P3가 5° 일때이며 F8는 A NOR B 게이트로서 직렬 시스템에서 P2가 -25°, P3가 -115° 일때이다. F13는  $\bar{A}$  OR B 게이트로서 병렬 시스템에서 P2가 20°, P3가 135° 일 때이다. F6는 XOR 게이트로서, 직렬 시스템에서 P2를 제거한 후 P3를 -5°로 할때이며, F9는 XNOR 게이트로서, XOR 게이트와 마찬가지로 P2는 제거하고, P3는 25° 일때이다.

LC TV 1을 통과한 광의 투과량을  $a>b>0$ 인 a, b로 나타내고 편광기에서의 손실이 없다고 가정하면, 직렬 시스템의 경우 LC TV 1과 LC TV 2를 통과한 광의 투과량은 두 입력 패턴의 곱이 되므로  $a>ab>b>0$ 인 a, ab, b의 세 가지 값으로 표현할 수 있

표 1. 16가지 논리 연산 수행시 편광기의 각도  
Table 1. Angle of the polarizers.

Function	Gate	그림	P1	P2	P3
F0	FALSE	그림5-a	0°	-15°	85°
F1	AND	그림5-a	0°	25°	115°
F2	$\bar{A}B$	그림5-a	0°	25°	5°
F3	A	그림5-a	0°	75°	85°
F4	$\bar{A}B$	그림5-a	0°	-25°	5°
F5	B	그림5-a	0°	-15°	165°
F6	XOR	그림5-a	0°	No Polarizer	-5°
F7	OR	그림5-b	0°	50°	25°
F8	NOR	그림5-a	0°	-25°	-115°
F9	XNOR	그림5-a	0°	No Polarizer	25°
F10	$\bar{B}$	그림5-a	0°	-15°	-165°
F11	$A+\bar{B}$	그림5-b	0°	-20°	-135°
F12	$\bar{A}$	그림5-a	0°	-75°	85°
F13	$\bar{A}+B$	그림5-b	0°	20°	135°
F14	NAND	그림5-b	0°	-50°	-25°
F15	TRUE	그림5-a	0°	75°	-5°

다. 병렬 시스템의 경우에는 두 입력 패턴의 합이 되므로  $2a>a+b>2b>0$ 인 세 가지 값으로 표현할 수 있다. 병렬 시스템에서 중간값  $a+b$ 는 논리 "1"을 나타내며, 이는 수광단에서  $a+b>T>2b$ 인 thresholding level T를 정하면, T값 이상의 경우에 논리 "1"을 얻을 수 있다.

Function	Gate	진 리 표	실험결과
F1	A AND B	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		0 0 0 1	
F4	$\bar{A}$ AND B	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		0 1 0 0	
F8	A NOR B	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		1 0 0 0	

Function	Gate	진 리 표	실험결과
F2	A AND $\bar{B}$	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		0 0 1 0	
F6	A XOR B	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		0 1 1 0	
F13	$\bar{A}$ OR B	A 0 0 1 1	
		B 0 1 0 1	
		1 1 0 1	

그림 7. 6 개의 논리 게이트 결과  
Fig. 7. Experimental results.

스크린 상에 나타나는 출력은 카메라의 B shutter를 이용하여 노출 시간을 약 3~4초 정도로 하여 촬영하였다. 결과 사진들의 경계 부분이 드러나는 것은 CASIO TV-20과 RADIO SHACK 16-156 두 TV의 화소 크기와 갯수가 다르기 때문에 두 입력 패턴을 정확히 중첩시킬 수 없기 때문에 발생하는 문제이며, 이 문제는 화소 크기와 갯수가 동일한 두 LC TV를 사용함으로써 개선 가능할 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 LC TV 표시판의 표면 균일성을 측정하고, 이진 입력 데이터에 대한 16가지의 논리 연산을 수행함으로써 LC TV를 2 차원 공간 광 변조기로 사용 가능함을 확인하였다.

LC TV 표시판 양면에 부착된 플라스틱 편광기는 표면이 불균일하므로 제거하였고, 2×2개의 데이터량을 갖는 두 이진 패턴을 APPLE-II 컴퓨터로 코딩한 후, 두 LC TV를 직렬과 병렬 시스템으로 구성하여 16가지의 논리 연산을 수행하였다. 이때, 직렬 시스템의 두 LC TV는 회절 효과를 무시하기 위하여 15cm의 거리를 두고 배열하였다.

LC TV 표시판은 기존의 SLM에 비해 contrast와 해상도가 다소 떨어지는 단점이 있으나, 이러한 문제점은 각 화소에 TR이 내장된 Active Matrix 방식의 LC TV 표시판을 사용함으로써 개선 될 수 있을 것이다. 또한, 비간섭성 광 정보 처리 분야에 LC TV 표시판을 이용하기 위하여 효과적으로 표면

불균일성을 개선하는 방법이 연구 되어야 할 것이다. 액정 표시 소자는 correlation 값 검출을 이용한 광학적 패턴 인식 시스템이나, 조합 논리, 행렬 연산 등의 광학적 연산 시스템에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] H.K. Liu, J.A. Davis and R.A. Lilly, *Opt. Lett.*, vol. 10, pp. 635-637, Dec. 1985.
- [2] D.A. Gregory, *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 467-469, Feb. 1986.
- [3] V.A. Tsvetkov, N.A. Morozov and M.I. Elinson, *Sov. J. Quan. Electron.*, vol. 8, pp. 989-993, 1975.
- [4] M.T. Fatehi, K.C. Wasmundt and S.A. Collins, Jr., *Appl. Opt.*, vol. 20, pp. 2250-2256, July 1981.
- [5] T.S. Yu, S. Jutamulia and D.A. Gregory, *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 2738-2742, July 1987.
- [6] A.W. Lohmann, *Appl. Opt.*, vol. 10, pp. 1594-1597, May 1986.
- [7] A.A. Han, U.R. Nejib, *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 270-273, Jan 1987.

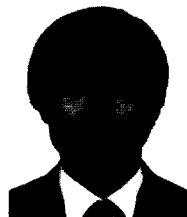
Si Substrates using the B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-PH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> system," *J. Crystal Growth*, 24/25, pp. 193-196, 1974. \*

著 者 紹 介



宋 柱 炤(準會員)

1963年 9月 8日生. 1986年 2月 연세대학교 전자공학과 공학사. 1988年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 석사학위 취득. 현재 KTA 사업지원본부 연구원. 주관심 분야는 광신호처리, 광컴퓨팅 등임.



權 元 鉉(正會員)

1962年 8月 10日生. 1983年 2月 연세대학교 전자공학과 공학사. 1985年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 석사학위 취득. 현재 연세대학교 대학원 박사과정 재학중. 주관심분야는 광정보처리, 광컴퓨팅, PCM 등임.



朴 漢 奎 (正會員)

1941年 6月 21日生. 1964年 2月 연세대학교 전기공학과(약전)졸업. 1968年 7월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1973年 10월 Paris VI Univ. (Sorbonne Univ.) 석사과정 수료(DEA). 1975年 7월 Paris VI Univ. 전자공학박사 학위 취득. 1974年 1월 불란서 국립 통신연구소(CNET)연구원. 미국 광학회(OSA), IEEE, Senior Member. 현재 연세대학교 전자공학과 교수. 주관심분야는 광컴퓨팅, 광통신, 광신호처리, 안테나 및 레이더신호처리등임.



殷 在 定 (正會員)

1959年 5月 25日生. 1982年 2월 연세대학교 전자공학과 공학사. 1986年 8월 연세대학교 대학원 전자공학과 석사학위 취득. 현재 연세대학교 대학원 박사과정 재학중. 주관심분야는 광신호처리, 광컴퓨팅등임.