

## 박테리아로돕신의 광순환 특성을 이용한 광학적 논리회로 구현

오세권 · 유연석<sup>†</sup>

청주대학교 정보기술공학부/레이저광정보공학

Ⓣ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2002년 5월 30일 받음, 2002년 9월 9일 수정본 받음)

본 연구에서는 bacteriorhodopsin(bR)이 첨가된 고분자 박막을 이용하여 광 논리회로 특성을 구현하였다. bR은 분광학적으로 구분되는 몇 단계의 중간단계로 구성된 복잡한 광순환 과정을 수반하고 있다. 우리는 bR의 광순환 과정중 B상태와 M상태의 흡수도 변화를 고려하여 He-Ne 레이저(632.8 nm)와 He-Cd 레이저(413 nm)를 이용하여 광학적 논리회로를 구현하였다. 또한 B상태와 K상태간의 흡수 스펙트럼을 고려하여 He-Ne 레이저(632.8 nm)와 Nd-YAG 레이저의 제2고조파인 532 nm를 이용하여 고속 AND logic gate를 구현하였다.

주제어 : bacteriorhodopsin, optical logic gate, fast AND logic gate.

### I. 서 론

정보의 고속화와 정보량의 증가에 따른 정보기기의 고밀도화 및 처리의 고속화는 현대 정보화 사회에 있어서 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 컴퓨터의 출현으로 많은 문제가 효과적으로 처리되고 있으나, 주로 전자기적인 효과에 의한 연산, 기억, 기록, 재생, 처리 등을 수행하는 현재의 방법들에 있어서는 그 속도와 정보량에 한계가 드러나고 있다. 이러한 문제점을 개선하는 노력으로서 현재 광학적인 원리와 방법을 사용하는 추세를 보이고 있다. 따라서 광학적인 방법에 의한 순광학적 스위치와 논리회로가 초고속 네트워크 및 광스위치를 위한 차세대 기술로 부각되고 있다. 이러한 이유로 새로운 광학소자 개발의 필요성이 증대되고, 고속 연산과 대용량 신호처리가 가능한 논리소자 및 광스위치에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 광네트워크에 사용되고 있는 순광학적 논리회로의 구현을 위해 호염성 미생물인 bR을 사용하였다. bR은 호염성 미생물의 purple membrane(PM)에 있는 광변환 단백질이며, 광색성 망막 단백질을 포함하고 있는 halobacterium salinarum의 세포막에서 발견되었다.<sup>[2]</sup> Halobacterium halobium은 산화를 위해 산소가 필요하기 때문에 아데노신 3인산합성을 할 수 없을 만큼 염분농도가 높은 환경에 있을 때 PM을 만들게 된다. 이렇게 생성된 PM내부에 고정되어 있는 망막 발색단에 의해 빛 에너지가 흡수되면, bR은 분광학적으로 구분되는 몇 단계의 중간단계로 구성된 복잡한 광순환 과정을 수반하게 된다. 이는 bR이 빛에 의해 구동되는 단백질 펌프이기 때문이다.<sup>[3-5]</sup> 이와 같은 bR의 광순환 과정중 바닥상태인 B상태와 가장 긴 수명을 갖는 M상태에서 여기광속의 출력세기 변화로부터 다양한 형태의 논리회로를 구현하였고, K상태

와의 가역적 순환관계를 통하여 투과도 변화에 의한 고속 광논리 특성을 확인하였다.

### II. 본 론

#### 2.1. bR박막의 광반응 특성

Halobacterium salinarum이라고 불리우는 단백질에 기초한 미생물이 halobacterium halobium으로 알려져 있다. 이 종들에서 태양 광을 화학적 에너지로 변환하는 광합성의 원리는 1964년에 Walther Stoeckenius에 의해 최초로 발견되었다. 그는 PM단백질이 분자당 하나씩 망막그룹을 포함하고 있음을 발견하였다. 그래서 bR의 PM을 광변환 단백질이라고 부른다. 간단히 하면 bR의 기능은 감각적 반응의 유발자 없이 감각 색소자와 같이 빛을 흡수한다. 흡수된 광에너지를 신진대사 과정을 위한 화학적 에너지로 변환하는 대신 광에 의해 구동되는 양성자 때문에 전달막의 양성자 펌핑을 통해 수명을 연장하게 된다. 따라서 bR은 PM세포 내에 있는 망막의 단백질 분자가 되는 것이다. 빛 흡수 발색단에 대한 해석적 기술은 Birge등에 의해 주어졌다.<sup>[6]</sup> bR은 단백질이 발색단으로부터 양전하는 광화학적 특성들을 생성하기 위해 대전된 아모산들과 정전기적으로 상호작용을 하고, 분자들의 형상은 빛의 흡수에 의해 영향을 받게 된다.<sup>[7]</sup>

bR은 고분자 매트릭스 박막 형태로 화학적, 열적으로 안정된 상태에서 전이된다. 더욱이 bR은 응용 영역에 따라서 유전공학적, 화학적으로 변형될 수 있다. 한 예로, D96N 즉, bR<sub>D96N</sub>은 schiff base의 분자간의 빠른 양성자화를 막기 위해 아스파라긴을 갖고 있는 아스파르트산 D96을 교체한 변이종이다. 이 유기 포토폴리머가 흥미를 끄는 이유는 화학적으로 대단히 안정적이고 광학적 비선형성이 크며, 동적인 특성이 있고 내구성을 갖고 있기 때문이다. 더욱이 bR이 첨가된 고분자 박막은 큰 스케일의 응용이 가능할 수 있도록 제작될 수 있다(BSONA

<sup>†</sup>E-mail: yuys@chongju.ac.kr

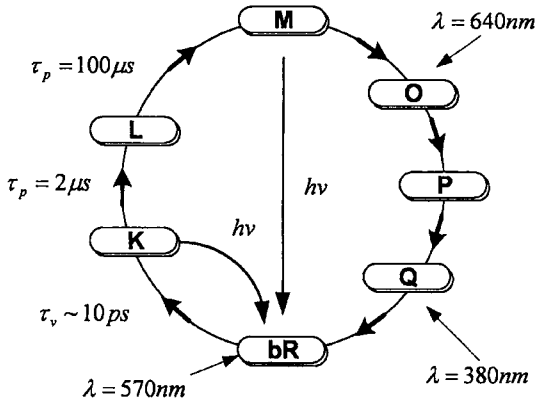


그림 1. 분광학적으로 구분되는 몇 단계의 중간단계로 구성된 박테리아로돕신의 광순환 과정.

KNSBN과 같은 광굴절성 결정들은 bR박막 크기만큼의 큰 크기로 성장시키는 것이 쉽지 않다. 또한 bR은 박막형태로 위상 홀로그래프를 기록할 수 있어 브래그각을 제한할 수 있다.<sup>[8,9]</sup> bR은 가시광 스펙트럼의 넓은 영역에서 강한 흡수를 나타낸다. 광순환 과정중의 B상태는 바닥상태로 볼 수 있으며 570 nm에서 흡수가 최대가 된다. 광순환 과정에서 들뜬 M상태는 가장 긴 수명을 가지고 413 nm에서 흡수가 최대가 된다.

그림 1은 bR의 광순환 과정을 보여준다. 의 광자로 여기된 bR분자는 몇 단계의 짧은 수명의 중간 단계를 거쳐 비교적 긴 수명의 M상태에 도달한다. 또한 K상태에서는 매우 짧은 수명을 가지며 그것의 흡수 최대치는 600 nm로 이동하게 된다. 이때 의 광자로 각각의 M상태와 K상태를 자극하면 광학적 이완에 의해 B상태로 전이된다. 여기서 bR은 고분자 매트릭스에 포함시켜 박막형태로 열적, 화학적으로 안정된 상태에서 사용하게 된다.

본 연구에서 순광학적 논리회로의 구현을 위해 사용된 bacteriorhodopsin 시료는 Munich Innovative Biomaterials GmbH (MIB)사로부터 직경이 22.3 mm이고, 두께가 6.2 mm인 wild-type bacteriorhodopsin(bR-WT)을 구입하여 사용하였다.

**2.2. bR의 광순환 과정과 밀도변화**

기저상태로 볼 수 있는 bR의 B상태 흡수대역에 포함되어 있는 bR의 광순환 과정중 각각의 과정에서 나타나는 흡수대역 파장의 빛을 조사하면 M상태와 B상태에 머무는 bR의 수 밀도는 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>[10,11]</sup>

$$N_B = N \frac{(c/\tau) + [\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)] \lambda_b I_b}{(c/\tau) + [\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)] \lambda_b I_b + [\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y) + \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)] \lambda_y I_y} \quad (1)$$

여기서  $N_M = N - N_B$ ,  $c = N_a h \nu / \Phi$ 이고, N은 시료 내에 있는 bR 분자의 수밀도이다.  $N_B$ 와  $N_M$ 은 각각 B상태와 M상태에 머무는 bR 단백질의 몰농도이고,  $\tau$ 는 M→B전이에 대한 시간 상수(M상태 수명시간),  $\Phi$ 는 순방향( $\Phi_{B \rightarrow M}$ ) 또는 역방향전( $\Phi_{M \rightarrow B}$ )에 대한 양자수율로써  $\Phi = \Phi_{B \rightarrow M} = \Phi_{M \rightarrow B}$  이고,  $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_i)$ 와  $\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_i)$ 는 분자의 소광계수에 해당된다(등은 B상태와 M상태의 흡

수 최대파장이다.). 또한  $N_a$ 는 아보가드로 상수,  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 광속이다. bR을 B→M 및 M→B로 여기하는 데에는 632.8 nm와 413 nm를 각각 사용하였다. 두께가  $dz$ 인 bR 박막에 의한 유효 흡수세기는 다음의 미분방정식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{dI(\lambda_i)}{dz} = -2.3026[\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_i)N_B + \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_i)N_M]I(\lambda_i) \quad (2)$$

여기서  $z$ 축은 파동의 전파방향이다. 두 광속(632.8 nm와 413 nm)이 두께  $z$ 인 bR박막을 동시조명하고 투과하게되면 아래와 같이 된다.

$$I_y^i = I_y^i \exp(-\Delta_1 Nz) - \frac{c}{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)\lambda_y \tau} \times [1 - \exp(-\Delta_1 Nz)] - \frac{\lambda_b I_b^i}{\lambda_y} [\exp(-\Delta_1 Nz)] \quad (3)$$

$$I_b^i = I_b^i \exp(-\Delta_2 Nz) - f\left(\frac{1}{\tau}\right) - \frac{\lambda_y I_y^i}{\lambda_b} [\exp(-\Delta_2 Nz)] \quad (4)$$

$$\Delta_1 = \frac{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)}{\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)} \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \frac{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b)\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)}{\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)} \quad (6)$$

위의 관계를 사용하여 두 광속이 동시조명 될 때 M상태수명이 긴 bR박막에 대해  $I_{sb}$ 와  $I_{sy}$ 의 임계 세기들을 구하면 다음과 같다.

$$I_{sb} = \frac{\lambda_b}{\lambda_y} \left[ I_b^i + \frac{f(1/\tau)}{\exp(-\Delta_2 Nz)} \right] \quad (7)$$

$$I_{sy} = \frac{c}{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)\lambda_y T} [\exp(\Delta_1 Nz) - 1] + I_b^i \frac{\lambda_b}{\lambda_y} \quad (8)$$

여기서  $I_{sb}$ 는 413 nm광속의 임계세기으로써 632.8 nm의 세기가 변화되더라도 투과도가 낮은 값을 나타내는 세기이다. 그러나 413 nm광속의 투과도는 632.8 nm광속의 세기가 증가되면 선형적으로 감소되어 임계치  $I_{sb}$ 에 도달한다.  $I_{sy}$ 는 632.8 nm 광속의 임계세기이다. 632.8 nm의 광속이  $I_{sy}$ 이상이 되면 두 광

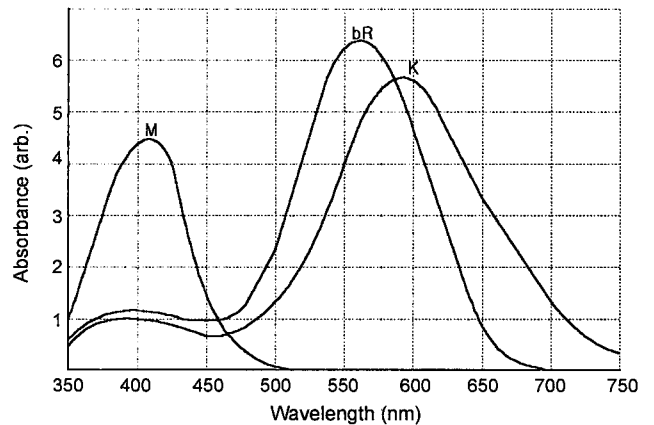


그림 2. bR의 상태에 따른 흡수 스펙트럼.

속의 투과특성은 역으로 되어 투과된 413 nm는 거의 감소하고 투과된 632.8 nm광속은 632.8 nm광속의 세기에 따라 선형적으로 증가하게 된다.

그림 2는 B상태와 M상태, 그리고 B상태와 K상태에서 bR의 흡수 스펙트럼을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두 상태에서 파장에 따른 흡수도 변화가 나타나므로 위에 기술한 두 광속들의 세기를 몇 단계로 변화시켜 두 광속들의 투과도를 조절하여 변화시키면 투과된 출력들로부터 몇 가지의 논리 상태를 실현할 수 있다.<sup>[12,13]</sup>

### III. 실험 및 결과

#### 3.1. 광학적 여기에 따른 bR의 상태 변화와 파장에 따른 흡수도 변화 측정

광학적 여기에 의한 bR의 상태 변화와 그에 따른 각 파장별 흡수도 변화를 측정하기 위하여 위의 그림 3과 같이 장치도를 구성하였다.

우선 백색광원인 W-lamp를 매우 미약하게 bR에 입사시키고 강한 여기광(He-Ne 레이저, He-Cd 레이저)을 조사시키고 분광광도계를 이용하여 각 파장별 흡수도 변화를 측정하였다. 그 결과 나타난 수치들의 변화를 다음의 표 1에 정리하였다. 여기서 (-)는 흡수율 감소, (+)는 흡수율의 증가를 의미한다.

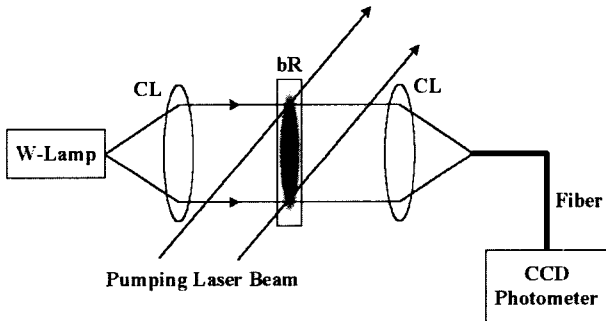


그림 3. 광학적 여기에 따른 bR의 흡수도 변화를 측정하기 위한 실험 장치도.

표 1. 광학적 여기에 의한 각 파장별 흡수도 변화

Pumping Beam	파장(nm)			
	420	500	570	630
He-Ne Laser	+0.125%	-0.075%	-0.155%	-0.120%
He-Cd Laser	-0.180%	+0.150%	+0.225%	+0.195%

우리는 이 실험에서 여기광의 세기를 He-Ne 레이저는 10 mW/cm<sup>2</sup>, He-Cd 레이저는 13 mW/cm<sup>2</sup>로 하여 측정을 하였다. 먼저 여기광으로 He-Ne 레이저(632.8 nm)광이 입사되면 B상태에서 M상태로 여기되는 분자수가 증가되어 짧은 파장의 영역에서 흡수가 증가되고 긴파장 영역에서는 감소된다. 표 1에서 보는 바와 같이 420 nm파장의 빛의 흡수도가 He-Ne 레이저광이 조사되면 최초의 상태에 비하여 0.125%의 흡수도 증가를 보이고 있고, 반대로 630 nm파장의 빛에 대한 흡수도는 0.120% 감소됨을 알 수 있다. 다음으로 여기광으로 He-Cd 레이저(413 nm)광이 입사되면 M상태에서 B상태로 여기되는 분자수가 증가되어 또다시 B상태의 흡수도가 증가한다. 파장이 긴 570 nm의 흡수도 변화는 0.225%로 크게 증가되고 파장이 짧은(M상태의 흡수영역) 420 nm파장에 대한 흡수도 변화는 0.180%로 감소됨을 알 수 있다.

결과적으로 표 1을 보면 632.8 nm와 413 nm에서 여기된 bR시료의 흡수도가 동일 파장들에 대해서 서로 상반적으로 나타남을 알 수 있다.

#### 3.2. bR을 이용한 다양한 논리회로 구현

우리는 앞에서 검증한 내용을 바탕으로 여러 가지 형태의 논리회로를 구현하기 위하여 그림 4와 같이 실험장치를 구성하였다.

그림 4는 He-Ne 레이저(632.8 nm)와 He-Cd 레이저(413 nm)를 사용하여 광학적 여기광속의 유무에 따른 B상태와 M상태의 변화에 의한 출력세기의 변화로부터 논리회로를 구현하였다.

AND와 OR gate를 구현할 때에는 He-Ne 레이저를 강하게 조사하여 여기광속으로써 사용하고, He-Cd 레이저는 BS1에 의해 나뉘어지고, ND 필터를 이용하여 아주 미약한 입력 A,

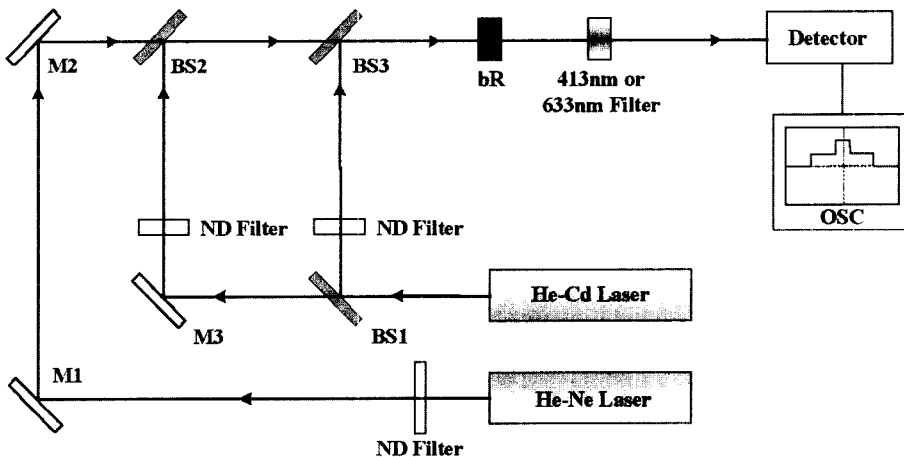


그림 4. 논리회로 구현을 위한 실험 장치도.

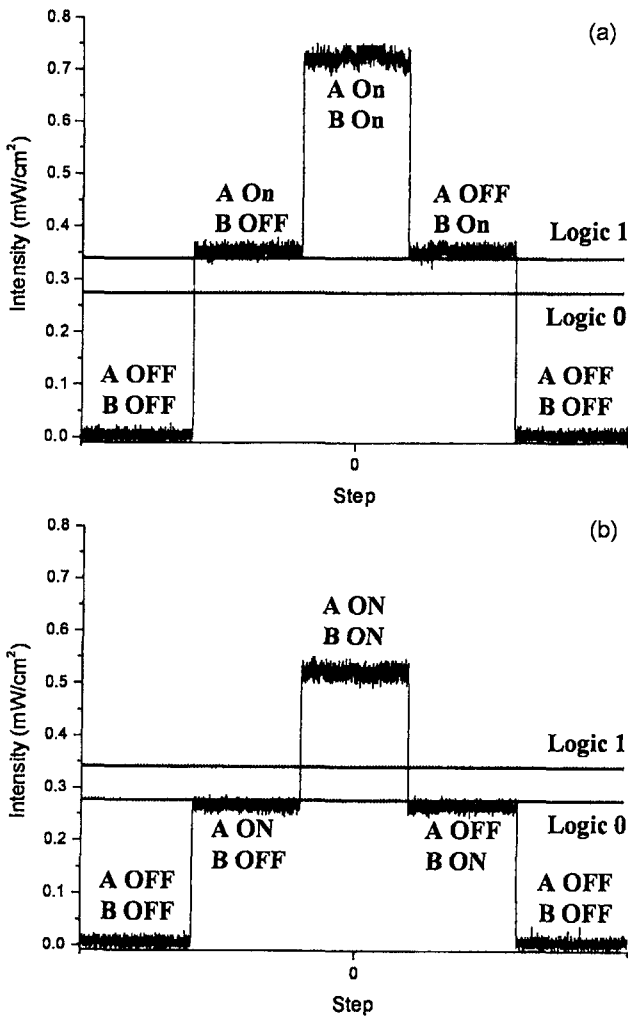


그림 5. 광학적 여기광의 조사 유무에 따른 B상태와 M상태에서의 출력세기 변화. (a) 광학 여기 광속 OFF, (b) 광학 여기 광속 ON.

B로서 사용된다. 이때 413 nm 투과필터를 이용하여 He-Ne 레이저의 광속은 차단하고, He-Cd 레이저의 출력세기만을 측정한다. 그 결과 그림 5와 6에서 보는 바와 같이 여기광으로 파장 632.8 nm의 He-Ne 레이저가 없을 때(B상태)에는 입력 A나 B 어느 하나의 광속만 ON하여도 어느 정도의 높은 출력세기를 보이고 있으나 광학적 여기광속을 조사한 경우(M상태)에는 상대적으로 매우 낮은 출력세기가 나타나게 된다. 이 차이를 이용하여 그 수준 보다 높으면 “1”, 낮으면 “0”으로 하는 논리회로를 구현하는 것이다.

그림 5에 (a)의 경우를 살펴보면 A, B 모두 OFF 상태에서

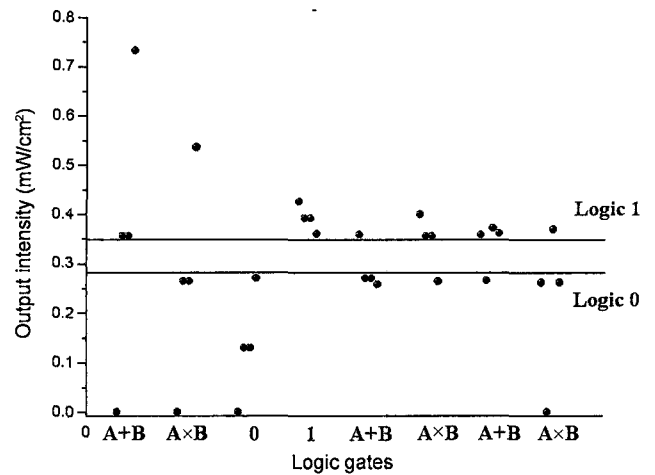


그림 6. 각각의 논리회로들의 출력세기 변화 분포도.

는 “0”이 되고 A, B 중에서 하나라도 ON되면 “1”이 됨을 보이고 있다. 이것은 A+B(OR) gate가 성립한다는 것을 보이고 있는 것이다. (b)의 경우에는 A, B 둘 중에 하나라도 OFF 상태이면 출력 또한 “0”이 되는 것을 나타내고 있으며, 이는 A×B(AND) gate가 되는 것을 보이고 있다.

NAND와 NOR gate를 구현할 때에는 앞에서와는 달리 He-Ne 레이저는 ND 필터를 이용하여 아주 약하게 조사하여 탐사광속으로 사용하고, He-Cd 레이저는 BS1으로 나누어 bR을 여기할 정도로 강한 광학적 여기광속 A, B로써 사용된다. He-Ne 레이저를 탐사광속으로 조사하고 여기광속 A, B를 ON, OFF하면서 탐사광속의 출력세기를 측정하였다. 표 2에서 5가지 각각의 논리회로를 실험적으로 측정된 값들이다.

이 측정값은 그림 5에서 나타난 것과 같은 오실로스코프 파형의 평균값으로 A+B, A×B, 0, 1, A+B, A×B, A+B, A×B의 8가지 논리회로가 구현됨을 보이고 있는 것이다. 이들 논리회로의 “0”과 “1”은 여기광속의 유무에 따라 bR의 흡수 스펙트럼이 달라짐을 이용한 것으로 우리는 A+B, A×B gate에서 입력 A, B 중에서 하나만을 ON 하였을 때 그 차이를 “0”과 “1”의 기준으로 하였다.

그림 6은 표 2~5까지 측정된 논리회로들의 출력세기의 변화를 표현한 것이다. 이 분포도를 살펴보면 0.275 mW/cm<sup>2</sup>에서 0.35 mW/cm<sup>2</sup> 사이에는 어떠한 값도 존재하지 않는다. 이 층의 폭을 이용하여 그 위의 수치는 logic “1”로 그 아래의 수치는 logic “0”으로 하여 논리회로가 형성됨을 알 수 있다. “0”과 “1”의 차이 값이 약 0.075 mW/cm<sup>2</sup> 나타나는데 이러한 차이를 둔 것은 광손실이나 광원의 출력세기가 불균일하기 때문에 오류를 방지하기 위한 것이다. 우리는 이 차이를 최대

표 2. A+B, A×B Gate의 실험에 의한 결과

논리 회로	Bias Beam (mW/cm <sup>2</sup> )	입력광(mW/cm <sup>2</sup> )				출력광(mW/cm <sup>2</sup> )			
		A		B		A=0	A=1	A=0	A=1
		0	1	0	1	B=0	B=0	B=1	B=1
A+B	0.00	0.00	0.400	0.00	0.400	0.00 (0)	0.356 (1)	0.356 (1)	0.732 (1)
A×B	8.00	0.00	0.400	0.00	0.400	0.00 (0)	0.264 (0)	0.264 (0)	0.536 (1)

표 3. 0, 1 Gate의 실험에 의한 결과

논리 회로	Bias Beam (mW/cm <sup>2</sup> )	입력광(mW/cm <sup>2</sup> )				출력광(mW/cm <sup>2</sup> )			
		A		B		A=0	A=1	A=0	A=1
		0	1	0	1	B=0	B=0	B=1	B=1
0	16.00	0.00	0.360	0.00	0.360	0.00 (0)	0.130 (0)	0.130 (0)	0.270 (0)
1	5.00	0.00	0.400	0.00	0.400	0.426 (1)	0.392 (1)	0.392 (1)	0.360 (1)

표 4.  $A+B$ ,  $A \times B$  Gate의 실험에 의한 결과

논리 회로	Bias Beam (mW/cm <sup>2</sup> )	입력광(mW/cm <sup>2</sup> )				출력광(mW/cm <sup>2</sup> )			
		A		B		A=0	A=1	A=0	A=1
		0	1	0	1	B=0	B=0	B=1	B=1
$A+B$	6.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.358 (1)	0.270 (0)	0.270 (0)	0.258 (0)
$A \times B$	6.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.400 (1)	0.356 (1)	0.356 (1)	0.264 (0)

표 5.  $\bar{A}+B$ ,  $\bar{A} \times B$  Gate의 실험에 의한 결과

논리 회로	Bias Beam (mW/cm <sup>2</sup> )	입력광(mW/cm <sup>2</sup> )				출력광(mW/cm <sup>2</sup> )			
		A		B		A=0	A=1	A=0	A=1
		0	1	0	1	B=0	B=0	B=1	B=1
$\bar{A}+B$	4.00	0.00	2.00	0.00	0.360	0.358 (1)	0.266 (0)	0.372 (1)	0.362 (1)
$\bar{A} \times B$	0.00	0.00	0.400	0.00	0.400	0.262 (0)	0.00 (0)	0.370 (1)	0.262 (0)

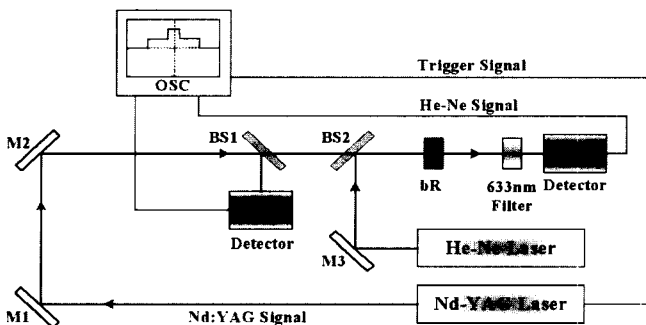


그림 7. 고속 광논리 특성을 갖는 AND logic gate를 검증하기 위한 실험 장치도.

화하기 위하여 여러 가지 레이저 광원을 사용하고 고순도 광학계를 이용하였지만 본 연구에서는 이 차이가 0.065 mW/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

### 3.3. 투과도 변화에 의한 고속 논리 특성

bR의 바닥상태인 B상태와 여기된 K상태간의 피코초 정도의 가역적 순환과정을 이용하기 위해 Nd-YAG 레이저의 제2고조파인 532 nm 펄스로 bR을 여기하여 순환과정을 유도하였고, 파장이 632.8 nm인 He-Ne 레이저광을 탐사 광으로 하여 유도된 K상태에 의한 흡수도 변화를 측정하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 B상태와 K상태, 그리고 M상태의 흡수 스펙트럼이다. B상태는 바닥 상태로 볼 수 있으며 570 nm에서 흡수가 최대가 된다. 광순환 과정에서 들뜬 M상태는 가장 긴 수명을 가지고 413 nm에서 흡수가 최대가 된다. 하지만 K상태에서는 피코초 정도의 짧은 수명을 가지며 그것의 흡수 최대치는 600 nm로 이동된다. 우리는 Nd-YAG 레이저의 제2고조

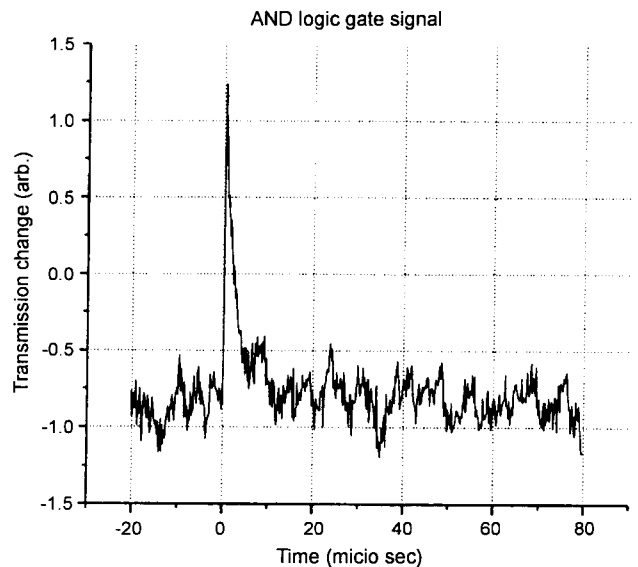


그림 8. 흡수도 변화로부터 구현한 고속 광논리 특성을 갖는 AND logic gate.

파인 532 nm의 펄스와 632.8 nm파장을 갖는 He-Ne 레이저를 이용하여 B상태와 K상태간의 가역적 순환과정으로 인해 발생되는 피코초 정도의 짧은 수명에 대해 펄스 여기후의 투과도 변화에 의한 고속 논리회로 특성을 구현하였다. 실험 장치도가 그림 7에 나타나 있다.

동일 선상에 있는 두 광속(532 nm와 632.8 nm)은 서로 겹쳐서 bR을 투과하게 되고, 검출기 앞에 좁은 대역 투과 필터를 설치하여 532 nm의 광은 차단되며 He-Ne 광만 탐사광으로 통과하게 된다.

그림 8은 본 연구에서 검출된 고속 광논리 특성을 갖는 AND logic gate 신호이다.

## VI. 결 론

고분자 매트릭스에 침투시킨 bR의 광순환 특성중 광학 여기광의 파장에 따라 bR의 바닥 상태인 B상태와 광순환 과정의 중간단계인 M상태를 이용하여 광학적 여기광에 따른 bR의 상태변화와 파장에 따른 흡수도 변화를 측정하였다. 여기광으로 He-Ne 레이저(632.8 nm)가 입사되면 B상태에서 M상태로 여기되는 분자수가 증가되어 짧은 파장영역에서 흡수가 증가되고 긴파장 영역에서는 감소되었다. 반대로 여기광을 He-Cd 레이저(413 nm)로 했을 경우는 M상태에서 B상태로 여기되는 분자수가 증가되어 긴파장영역에서 흡수가 증가되었다. 이와 같이 흡수도가 동일 파장에 대해서 다르게 나오기 때문에 bR의 B상태와 M상태간의 흡수 스펙트럼을 고려하여 파장이 632.8 nm인 He-Ne 레이저와 파장이 413 nm인 He-Cd 레이저를 사용하여 여기광에 따른 탐사광의 흡수도 변화, 광투과도, 광여기에 의한 수밀도 변화 특성을 이용하여  $A+B$ ,  $A \times B$ ,  $0$ ,  $1$ ,  $\overline{A+B}$ ,  $\overline{A \times B}$ ,  $\overline{A+B}$ ,  $\overline{A \times B}$ 의 8가지 순광학적 논리회로들을 구현하고 이들의 특성을 비교하였다. 측정된 논리회로들의 출력세기 분포에서  $0.275 \text{ mW/cm}^2$ 와  $0.35 \text{ mW/cm}^2$ 에서는 어떠한 값도 존재하지 않기 때문에 이 층의 폭을 기준으로  $0.35 \text{ mW/cm}^2$ 이상의 값은 logic "1"이 되고,  $0.275 \text{ mW/cm}^2$ 이하에서는 logic "0"이 되어 8가지 논리회로들을 구현할 수 있었다.  $A+B$ 와  $\overline{A \times B}$  gate에서는 바이어스광 없이 논리회로를 구현하였고, 그 외의 나머지 gate들에서는 바이어스광을 활용하여 더욱 유용한 gate들을 구현하였다. 또한 bR의 고속 광논리 특성을 확인하기 위하여 bR의 B상태와 여기된 K상태간의 피코초 정도의 가역적 순환과정을 이용하였다. 5 ns의 펄스 주기를 갖는 Nd-YAG 레이저의 제2고조파인 532 nm 펄스로 bR을 여기시켜 순환과정을 유도하였고, 파장이 632.8 nm인 He-Ne 레이저를 탐사광으로 사용하였다. Nd-YAG 레이저의 펄스에 의해서 B상태가 K상태로 여기된 후의 투과도 변화에 의한 고속 광논리 특성을 갖는 AND logic gate 결과를 실험을 통해 안정적으로 구현하였다.

본 연구가 실제 논리회로로 구현되기 위해서는 bR에 대한 생물학과 분석화학적 접근을 통해 gate의 반응속도와 효율의 최적화에 대한 연구가 진행되어야 하며, 광학소자의 소형화에 대한 개발도 추가적으로 이루어져 초소형이면서도 대용량 정보 전송이 가능한 광스위치의 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- [1] P. W. E. Smith, "Nonlinear optical properties of advanced," *SPIE proceedings*, vol. 1852, 1993.
- [2] R. R. Birge and C. F. Zhang, "Two-photon double resonance spectroscopy of bacteriorhodopsin," *J. Chem. Phys.*, vol. 92, pp. 7178-7185, 1990.
- [3] D. Oesterhelt and W. Stoerkenius, "Rhodopsin-like protein form the purple membrane of Halobacterium halobium," *Nature (London)*, vol. 233, pp. 149-152, 1971.
- [4] H. Takei, Z. chen, A. Lewis, and I. Nabenzahl, "Implementing receptive field with excitatory and inhibitory optoelectrical responses of bacteriorhodopsin film," *Appl. Opt.*, vol. 30, pp. 500-5009, 1991.
- [5] R. R. Birge, "Nature of the primary photochemical events in rhodopsin and bacteriorhodopsin," *Biochem. Biophys. Acta 1016*, pp. 293-327, 1990.
- [6] R. R. Birge, "Photophysics and molecular electronic application of the rhodopsin," *Ann. Rev. Phys. Chem.*, vol. 41, pp. 683-733, 1990.
- [7] A. Lewis, Y. Albeck, and Z. Lange, "Optical computation with negative light intensity with a plastic bacteriorhodopsin film," *Science*, vol. 275, pp. 1462-1464, 1997.
- [8] C. Zhang, Q. W. Song, C. Y. Ku, R. B. Gross, and R. Birge, "Determination of the refractive index of a bacteriorhodopsin film," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1409-1411, 1994.
- [9] D. V. Rao, F. J. Aranda, D. Narayana Rao, and Z. Chen, "All-optical logic gates with bacteriorhodopsin film," *Opt. Commun.*, vol. 127, pp. 193-199, 1996.
- [10] N. A. Hampp, A. Popp, C. Brauchle, and D. Oesterhelt, "Diffraction efficiency of bacteriorhodopsin film for holography containing bacteriorhodopsin wild type BRWT and its variants BRD85E and BRD96N," *J. Phys. Chem.*, vol. 96, 4679-4685, 1992.
- [11] L. Q. Gu, C. P. Zhang, and G. Y. Zhang, "Bacteriorhodopsin based photonic logic gate and its applications to grey level image subtraction," *Opt. Commun.*, vol. 131, pp. 25-30 1996.
- [12] J. E. Maiowicki, NASA Report AFRL-SN-TR-1998-124.
- [13] T. Zang, G. Fu, and Y. Li, "All-optical logic gates bacteriorhodopsin films," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 527-534, 2000.

## Realization of optical logic gates using photocycle properties of bacteriorhodopsin

Se Kwon Oh and Yeon Serk Yu<sup>†</sup>

*School of Information and Technology, Chongju University, Chongju 360-764, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: yuys@chongju.ac.kr*

(Received May 30, 2002 ; Revised manuscript received September 9, 2002)

We realized optical logic gates using a bacteriorhodopsin (bR) doped polymer film. The bR undergoes a complex photocycle characterized by several spectroscopically distinct intermediate states. We realized optical logic gates using a He-Ne laser (632.8 nm) and a He-Cd laser (413 nm) that consider B-state and absorption change of M-state in the photocycle of bR. Also, we realized high speed AND logic gate using He-Ne laser (632.8 nm) and the second harmonics at 532 nm from a pulsed Nd-YAG laser that considering absorption spectrum between B-state and K-state.

*Classification code* : OE.030.