

기계적으로 연동된 디지털 미소거울을 이용한 공간섭형 컬러 디스플레이 구현

한 원* · 조 영 호*†

* KAIST, 바이오및뇌공학과

Interferometric Color Display Using Micromechanically Coupled Digital Mirror Arrays

Won Han* and Young-Ho Cho*†

* Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST

(Received September 5, 2011; Revised February 13, 2012; Accepted February 21, 2012)

Key Words: Interferometric Modulator(간섭 변조기), Color Display(컬러 디스플레이), Mechanical Coupling(기계적 연동), Digital Actuator(디지털 구동기)

초록: 본 논문에서는 디스플레이 응용을 위해 동일한 크기를 갖는 공극을 가지며 기계적으로 연동된 미소거울들의 선택적인 구동을 사용하여 RGB 컬러를 재현하는 반사형 간섭 변조기를 제안한다. 기존의 투과형 간섭변조기는 별도의 배면 광원이 필요하기 때문에 전력 소모가 크며, 기존의 반사형 간섭 변조기는 세 가지 RGB 색상을 구현하기 위해서 서로 다른 크기를 갖는 3 개의 공극이 필요하기 때문에 공정이 복잡하다. 본 논문에서 제안하는 반사형 간섭 변조기는 간단한 공정을 위해 동일한 크기를 갖는 1 개의 공극을 가지며 기계적으로 연동된 미소거울의 디지털 구동을 통하여 세 가지 RGB 색상을 재현한다. 실험에서 제안하는 간섭 변조기는 스위칭 모드 (000), (010), (101)에서 각각 초록, 파랑, 빨강의 색상을 재현하였으며, 측정된 스펙트럼 피크치에서의 파장은 각각 511 ± 5 nm, 478 ± 5 nm, 644 ± 9 nm 였고, 대역폭은 각각 60 ± 1 nm, 45 ± 2 nm, 105 ± 4 nm 였고, 반사세기는 각각 77 ± 5 %, 73 ± 2 %, 81 ± 5 %이었다. 측정된 검정에 대한 스펙트럼의 반사세기는 27 ± 0 % 이하로 측정되었다. 본 논문에서는 디스플레이 응용을 위해 간단한 공정으로 제작이 가능한 간섭 변조기의 색재현 성능을 실험적으로 검증하였다.

Abstract: We present interferometric modulators that reproduce RGB colors through the selective actuation of mechanically coupled mirror arrays having identical air gaps. The conventional transmittive interferometric modulators need additional backlights, which leads to high power consumption. The previous reflective interferometric modulators using ambient lights need three different air gaps for reproducing the three RGB colors, thus giving rise to process complexity. For process simplicity, we propose the use of reflective interferometric modulators that are capable of producing green, blue, red, and black colors with the aid of mechanically coupled mirrors with identical air gaps. In an experimental study, the present interferometric modulators reproduce green, blue, and red colors at the switching modes (000), (010), and (101). The spectrum peaks for the colors are measured at the wavelengths 511 ± 5 nm, 478 ± 3 nm, and 644 ± 9 nm, respectively, with the bandwidths being 60 ± 1 nm, 45 ± 2 nm, and 105 ± 4 nm, respectively; further, the maximum intensities of the colors are 77 ± 5 %, 73 ± 2 %, and 81 ± 5 %, respectively. The black spectrum is measured below the intensity of 27 ± 0 %. Thus, we experimentally demonstrate the color reproduction capability of interferometric modulators fabricated by using a simple process.

- 기호설명 -

T : 복소굴절률
 δ : 위상차
 Y : 어드미턴스

E : 전기장
 H : 자기장
 M : 특성행렬
 R : 반사세기
 d : 필름의 두께
 k : 스프링 상수
 l : 스프링 길이

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근에 마이크로 구동기^(1,2)와 결합된 간섭 변조 기술⁽³⁾은 광통신 분야의 가변 필터⁽⁴⁾나 감쇄기 응용⁽⁵⁾뿐만 아니라 전자 노트나 전자 책을 위한 모바일용 디스플레이 분야에까지 그 응용 범위가 확장되고 있다.

디스플레이를 위한 기존의 투과형 간섭 변조기⁽⁶⁾는 별도의 배면 광원이 필요하기 때문에 전력 소모가 크며, 기존의 반사형 간섭 변조기⁽⁷⁾는 세 가지 RGB 색상을 구현하기 위해서 서로 다른 크기를 갖는 3 개의 공극이 필요하기 때문에 공정이 복잡하다. 서로 다른 크기를 갖는 공극을 구현하기 위해서는 반복되는 증착과 식각 공정으로 인해 생산 수율이 저하되고 이로 인한 가격 상승의 문제가 발생한다.

본 논문에서는 간단한 공정을 위해 동일한 크기를 갖는 1 개의 공극을 가지며 기계적으로 연동된 미소 거울의 디지털 구동을 통하여 세 가지 RGB 색상을 재현하는 반사형 컬러 간섭 변조기를 제안하고자 한다.

2. 동작 원리 및 설계

2.1 간섭 변조기의 구조 및 원리

Figure 1 은 지지 스프링(k_1, k_2)에 지지되고 연결 스프링(k_{12})에 연결된 세 개의 거울을 갖는 제안된 간섭 변조기의 구조를 보여준다. 각각의 거울은 전극과의 사이에서 인가된 전압($V \geq V_{pull-in}$)에 의해 스위칭 모드($b_1 b_2 b_1$)에 따라 선택적으로 구동한다. 여기서 b 는 구동상수로서 스위칭 OFF 시에는 0, 스위칭 ON 시에는 1 의 값을 갖는다. Figure 2 는 제안된 간섭 변조기의 동작 원리를 보여준다. 제안된 간섭 변조기는 스위칭 모드 (000), (010), (101), (111)에서 생성된 공극 $d_{000}, d_{010}, d_{101}, d_{111}$ 에 따라 특정 파장의 빛 만을 선택적으로 반사시킬 수 있는 간섭현상⁽⁸⁾을 이용하여 각각 초록(G), 파랑(B), 빨강(R), 검정(K) 색상을 구현한다.

Figure 3 은 복소굴절률 N 을 갖는 단일 층과 다수 층에서의 파동의 다중광속 간섭을 보여준다. 복소굴절률 N 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = n - ik \tag{1}$$

여기서 실수부 n 은 굴절률을 나타내고, 허수부 k 는 소멸계수를 나타낸다. 파동은 전기장 E 와 자기장 H 로 구성되어 있고, 복소 굴절률 N 인 매질

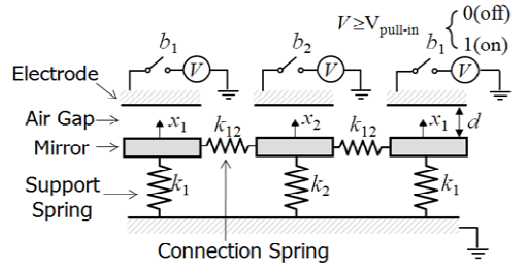


Fig. 1 Simplified model of the present interferometric modulators using the mechanically coupled mirrors driven by digital actuators

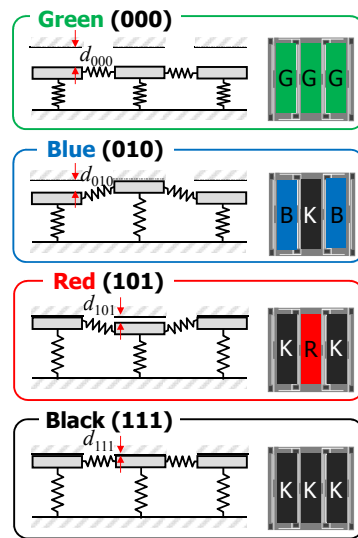


Fig. 2 Working principle of the present interferometric modulators reproducing green (G), blue (B), red (R), and black (K) colors for switching modes ($b_1 b_2 b_1$)

로 입사하는 파동은 경계면에서 반사파와 투과파로 나뉘게 된다. 이 때 파동은 두께 d 인 매질을 진행하는 동안 초기 공기에서 입사한 파에 비해 다음과 같은 크기의 위상차⁽⁹⁾ δ 를 가지게 된다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N d \cos \theta_{III} \tag{2}$$

여기서 λ 와 θ_{III} 는 각각 파장과 경계면 I 에서의 굴절각을 나타낸다. 전기장 E 와 자기장 H 의 비를 어드미턴스 Y 로 정의할 때, 어드미턴스⁽⁹⁾ Y 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \left| \frac{H}{E} \right| = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} N \cos \theta_{III} \tag{3}$$

여기서 ϵ_0 와 μ_0 는 각각 공기의 유전율과 투자율을 의미한다. 위상차 δ 와 어드미턴스 Y 값을 활용하면 두 경계면에서의 전기장과 자기장의 관계를 다

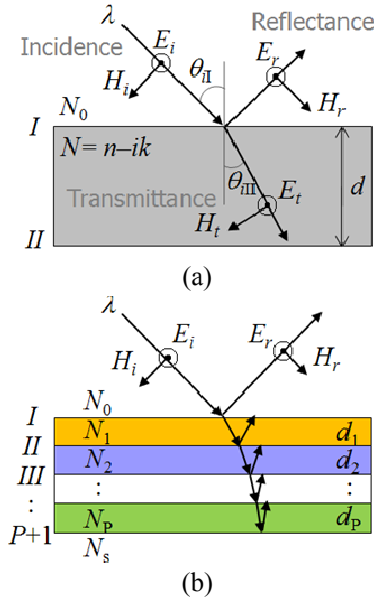


Fig. 3 Electromagnetic wave for boundaries: (a) single layer; (b) multiple layers

음과 같이 특성행렬⁽⁹⁾ M 을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} E_I \\ H_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \frac{\sin \delta}{Y} \\ iY \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_{II} \\ H_{II} \end{Bmatrix} = M_I \begin{Bmatrix} E_{II} \\ H_{II} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

where $E_I = E_{II} + E_{rI}$
 $H_I = (E_{II} - E_{rI})Y_0$

이러한 특성행렬 M 을 활용하면 다층 박막(Fig. 3(b))의 경우라도 각 층의 위상차와 어드미턴스를 알면 각 층의 특성 행렬을 계산할 수 있고, 각 층의 특성 행렬들을 곱하여 아래와 같이 하나의 특성 행렬 M 을 세울 수 있게 된다.

$$\begin{Bmatrix} E_I \\ H_I \end{Bmatrix} = M \begin{Bmatrix} E_{P+1} \\ H_{P+1} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

where $M = M_I M_{II} \dots M_P = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$

여기서 $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ 는 각각 2×2 특성 행렬의 행과 열의 성분을 의미한다. 이러한 특성 행렬 성분과 초기와 경계에서의 어드미턴스를 이용하면 반사세기⁽⁹⁾ R 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = r \times \bar{r}$$

where $r = \frac{E_{rI}}{E_{II}} = \frac{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}} \quad (6)$

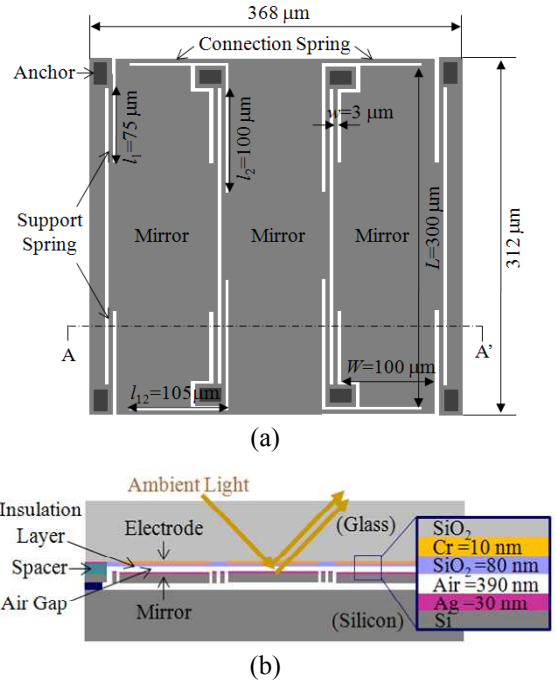


Fig. 4 Device layout and design of the present interferometric modulators: (a) top view; (b) cross-sectional view across A-A' in (a)

여기서 r, \bar{r}, Y_0, Y_s 는 각각 반사계수, 반사계수의 복소공액, 공기의 어드미턴스, 기판의 어드미턴스를 의미한다. 결국, 각 층의 복소굴절률 N 과 두께 d 를 설계하면 원하는 파장에 대한 반사세기 $R(\lambda)$ 를 얻을 수 있게 된다.

2.2 간섭 변조기의 설계

Figure 4 는 제안된 간섭 변조기의 레이아웃과 설계 치수를 보여 준다. 유리 상판과 실리콘 하판 사이에는 전극층, 절연층, 공기, 반사층이 있으며, 각각은 전기적, 광학적 성능을 고려하여 재질은 각각 Cr, SiO₂, Air, Ag 로 선택 되었다.

여기서, Ag 는 예비 테스트를 통하여 잔류 응력에 의한 5 μm 두께의 실리콘 기판의 굽힘 변형을 일어나지 않은 채 고 반사율을 구현하기 위한 두께로 30 nm 로 설계하였고, Cr 의 두께 d_{cr} 과 SiO₂ 의 두께 d_{sio2} 는 공극을 제거시킨 검정 색상 구현 모드에서 가시광 파장에서의 반사율을 최소화 하기 위해 아래 식에 의거하여 각각 10 nm 와 80 nm 로 설계하였다.

$$\min. \int_{\lambda_1=390nm}^{\lambda_2=780nm} R(d_{Cr}, d_{SiO_2}, \lambda) d\lambda \Rightarrow d_{Cr}, d_{SiO_2} \quad (7)$$

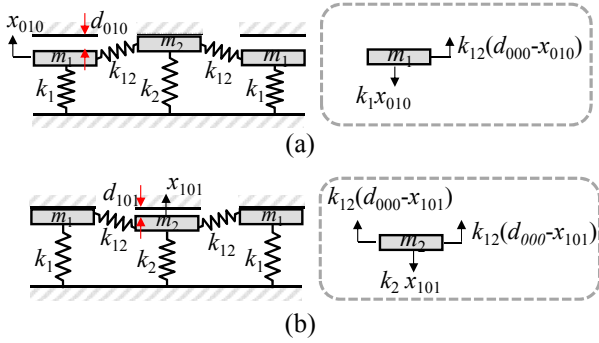


Fig. 5 Free-body diagrams at static equilibrium state for coupled actuation modes: (a) (010) mode; (b) (101) mode

공극의 두께 d_{000} , d_{010} , d_{101} 은 각각 가시광선 영역에서 특정 초록(455-492 nm), 파랑(492-577 nm), 빨강(622-780 nm)에서 반사세기의 차이가 최대가 되도록 아래 식에 의거하여 각각 390 nm, 330 nm, 211 nm 로 설계하였다.

$$\max \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(d_{Air}, \lambda) d\lambda - \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(d_{Air}, \lambda) d\lambda \right)^c \right] \Rightarrow d_{Air@R,G,B} \quad (8)$$

Figure 5 는 기계적으로 연동되어 구동하는 스위칭 모드 (010)과 (101)에서의 정적평형 상태에서의 자유물체도를 보여주며, 공극 d_{010} 와 d_{101} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{010} = d_{000} - x_{010} = \left(1 - \frac{k_{12}}{k_1 + k_{12}} \right) d_{000} \quad (9a)$$

$$d_{101} = d_{000} - x_{101} = \left(1 - \frac{2k_{12}}{2k_{12} + k_2} \right) d_{000} \quad (9b)$$

여기서, k_1 , k_2 , k_{12} 는 각각 지지 스프링 1 과 2, 연결 스프링의 강성 계수를 의미한다. 강성 계수 k_1 , k_2 , k_{12} 는 다음과 같이 주어진다.

$$k_1 = \frac{4Ewt^3}{l_1^3} \quad (10a)$$

$$k_2 = \frac{4Ewt^3}{l_2^3} \quad (10b)$$

$$k_{12} = \frac{2Ewt^3}{l_{12}^3} \quad (10c)$$

여기서, E , w , t , l_1 , l_2 , l_{12} 는 각각 영계수, 스프링 폭,

스프링 두께, 지지 스프링 1 과 2 의 길이, 연결 스프링의 길이를 의미한다. 결국, 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{010} = \frac{2l_{12}^3}{l_1^3 + 2l_{12}^3} d_{000} \quad (11a)$$

$$d_{101} = \frac{l_{12}^3}{l_{12}^3 + l_2^3} d_{000} \quad (11b)$$

식(11)은 공극 d_{010} 과 d_{101} 은 영계수, 스프링의 폭, 스프링의 두께는 무관하고, 단지 초기 공극의 크기와 스프링 길이의 함수로만 구현됨을 알 수 있다. 이러한 초기 공극과 스프링의 길이는 정교한 공정에 의해 정확히 구현될 수 있으므로, 기계적 연동 모드에서 정확한 공극 구현이 가능케 된다. 본 연구에서 각 거울의 크기는 LCD (Liquid Crystal Display)의 부화소 크기를 고려하여 $100 \times 300 \mu\text{m}^{2(10)}$ 로 설계되었고, 스프링의 길이 l_1 , l_2 , l_{12} 는 $65 \mu\text{s}^{(11)}$ 의 디스플레이 응답 조건 하에서 설계된 공극 d_{000} (390 nm), d_{010} (330 nm), d_{101} (211 nm)의 구현을 위해 각각 $75 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $105 \mu\text{m}$ 로 설계되었다.

3. 제작 공정

Figure 6 은 제안하는 간섭변조기의 공정 순서도이다. 공정은 유리 상판 제작, 실리콘 하판 제작, 유리 상판과 실리콘 하판의 조립 공정으로 구성된다. 유리 상판의 경우, 전극 형성을 위해 10 nm 두께의 Cr 을 쿼츠 유리 웨이퍼에 증착하여 패터닝(Fig. 6b)한다. 절연층 형성을 위해 80 nm 두께의 SiO_2 를 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)로 증착(Fig. 6c)한다. 실리콘 하판의 경우, 스페이서 형성을 위해 390 nm 두께의 SiO_2 를 SOI 웨이퍼 위에 증착하여 패터닝(Fig. 6e)한다. 거울과 스프링 구조는 SOI 웨이퍼의 5um 두께의 상층 실리콘을 DRIE (Deep Reactive Ion Etching)로 패터닝(Fig. 6f)하여 형성한다. Buried-Oxide 는 BOE (Buffered Oxide Etchant)에 의해 제거(Fig. 6g)시켜 거울과 스프링 구조를 릴리즈시킨다. 고반사층 형성을 위해 30 nm 두께의 Ag 를 증착(Fig. 6h)한다. 제작된 유리 상판과 실리콘 하판은 XYZ 정렬 지그를 사용하여 조립시킨다. Figure 7 은 제작된 소자의 SEM (Scanning Electron Microscope) 사진이고, Table 1 은 제작한 간섭 변조기에서 측정된 치수를 정리한 것이다.

Table 1 Designed and measured dimensions of the present interferometric modulator

Characteristics		Dimensions	
		Designed	Measured
Mirror	Thickness, t_m	5 μm	5 \pm 0.1 μm
	Width, W	100 μm	100 \pm 1 μm
	Length, L	300 μm	300 \pm 1 μm
Spring	Thickness, t_s	5 μm	5 \pm 0.1 μm
	Width, w	3 μm	3 \pm 0.1 μm
	Length 1, l_1	75 μm	75 \pm 1 μm
	Length 2, l_2	105 μm	105 \pm 1 μm
	Length 12, l_{12}	100 μm	100 \pm 1 μm
Electrode	Thickness, t_{Cr}	10 nm	8 \pm 2 nm
Insulation layer	Thickness, t_{SiO_2}	80 nm	78 \pm 2 nm
High-reflection layer	Thickness, t_{Al}	30 nm	28 \pm 2 nm
Spacer	Height, h	390 nm	389 \pm 1 nm

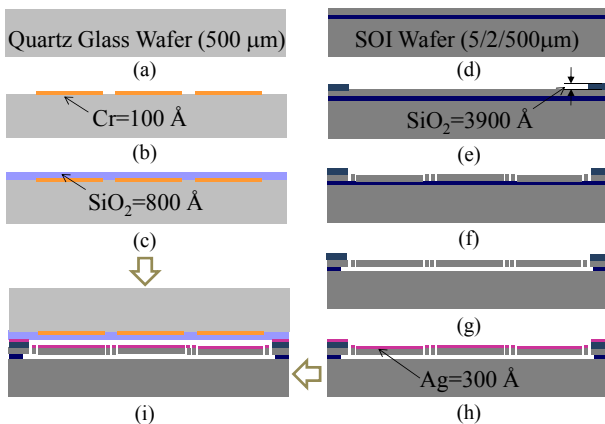


Fig. 6 Fabrication process of the interferometric modulator: (a) Starting glass wafer; (b) Cr evaporation & lift off; (c) SiO₂ PECVD; (d) Starting SOI wafer; (e) SiO₂ PECVD & etching; (f) Si DRIE; (g) Buried-oxide etching; (h) Ag evaporation; (i) Assembly

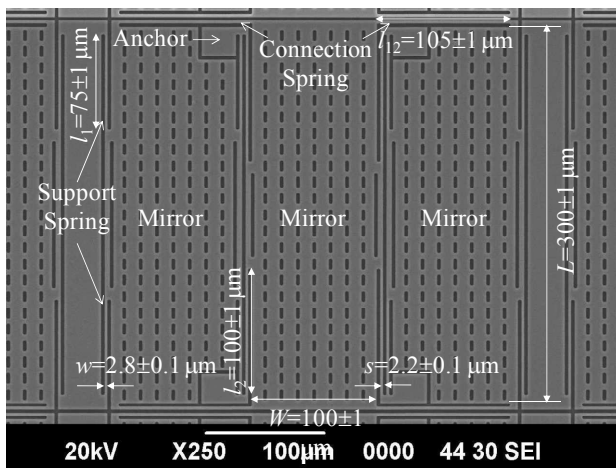


Fig. 7 Enlarged view for 1 pixel area of silicon plate at the fabricated interferometric modulator

4. 측정 결과 및 고찰

제작된 전자기력 간섭 변조기로부터 컬러 이미지를 카메라를 이용하여 측정하고, 출력 변위 및 응답 시간을 LDV (Laser Doppler Vibrometer, Polytech OFV 511)를 이용하여 측정하였고, 반사 스펙트럼은 백색광원에 대한 가시광선 영역에서의 반사 파장을 스펙트로미터(PI MicroSpec 2300i)를 이용하여 측정하였다.

4.1 컬러 이미지

Figure 8 은 스위칭 모드 (000), (010), (101), (111)에서 각각 초록(G), 파랑(B), 빨강(R), 검정(K)을 나타내는 제안하는 간섭 변조기의 사진이다.

4.2 출력 응답

Figure 9 는 300-Hz 6-V 의 사각파 전압으로 구동하는 간섭 변조기의 측정된 시간에 대한 LDV 출력 신호를 보여준다. 여기서 6 V 는 각 모드에서 거울과 전극 사이에서의 Pull-In 에 의해 디지털 입력 변위를 얻기 위한 최소 전압이다. 출력 신호는 (000) 모드와 (010), (101), (111) 모드와의 사이에서 스위칭에 의하여 측정된 결과이다. 측정된 응답시간은 각각의 출력 신호에서 상승과 하강 시의 정착시간을 모두 포함한 것으로 각각의 모드에서 측정된 응답 시간을 Table 2 에 정리하였다. 측정된 응답시간은 77~79 μs 로서 디스플레이 응용을 위한 응답 수준 (~65 μs ⁽¹¹⁾)을 만족한다. Figure 10 은 Fig. 9 의 신호를 스위칭 모드 (010), (101), (111)에 대하여 정리한 것으로서, 각각의 모드에서 측정된 출력변위는 62 \pm 5 nm, 181 \pm 10 nm, 394 \pm 5 nm 로서,

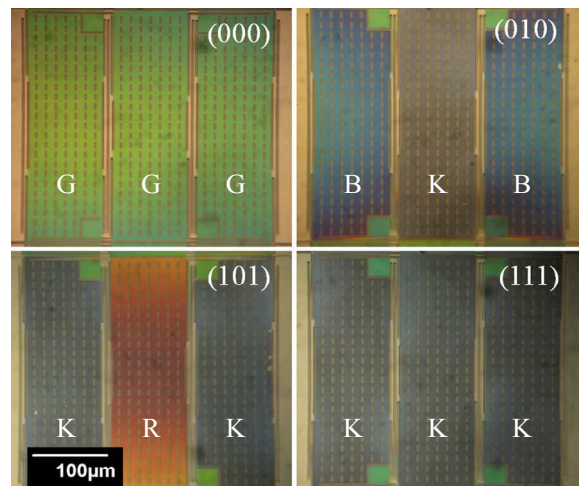


Fig. 8 Color images reproduced at the switching modes of (000), (010), (101), and (111) in Fig. 2

Table 2 Output response for the switching modes of (010), (101), and (111) in Fig. 2

Characteristics	(010)		(101)		(111)	
	theo.	exp.	theo.	exp.	theo.	exp.
Output displacement [nm]	60	62±5	180	181±10	388	394±5
Response time [μs]	30	79±8	32	77±6	31	77±10

Table 3 Reflectance spectrum of RGB and black colors

Spectrum peak	Green		Blue		Red		Black	
	theo.	exp.	theo.	exp.	theo.	exp.	theo.	exp.
Wavelength [nm]	528	511±5	477	478±3	675	644±9	-	-
Band width [nm]	63	60±1	59	45±2	142	105±4	-	-
Max. intensity [%]	85	77±5	83	73±2	88	81±5	9	27±0

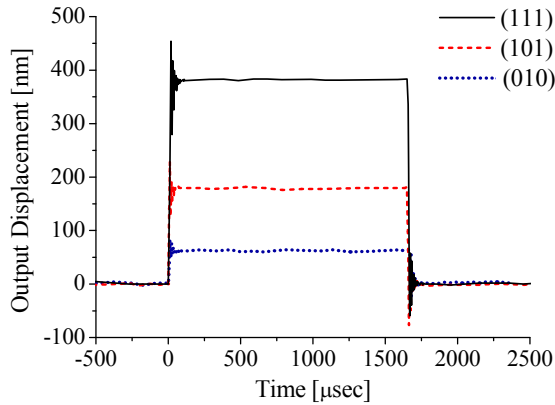


Fig. 9 Experimental time-dependent output displacement of the present interferometric modulator

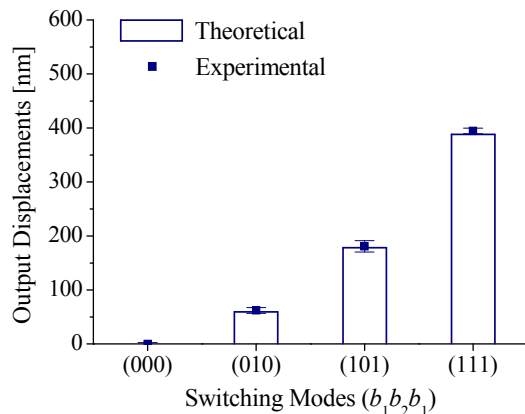


Fig. 10 Theoretical and experimental output displacement for switching modes

측정된 출력변위는 최대 오차 24 nm 이내에서 이론치와 일치한다. 측정된 출력 변위의 이론치와 실험치는 Table 2 에 정리하였다.

4.3 반사 스펙트럼

Figure 11 은 각 모드에서 생성된 색상에 대한 반사

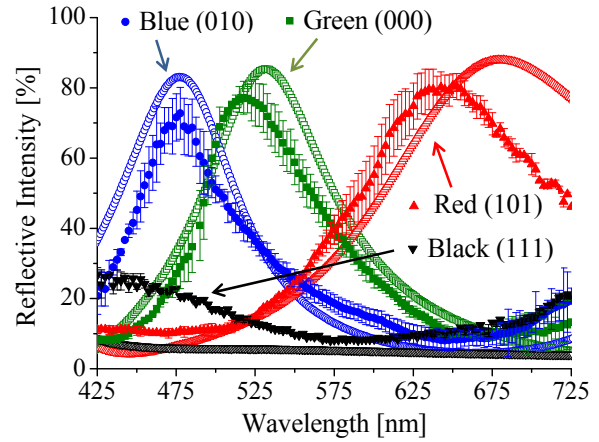


Fig. 11 Theoretical (empty symbols) and experimental (filled symbols) color spectrum for the incident visible light of $\lambda=425\sim725$ nm

스펙트럼을 보여준다. 본 실험에서는 동일한 색상을 재현하는 하나의 거울 면적 중 세 군데의 점(30×5 μm²)을 측정하여 각 파장에 대한 평균과 표준편차를 구하였다. 초록, 파랑, 빨강 스펙트럼의 피크치에서 측정된 파장은 각각 511±5 nm, 478±5 nm, 644±9 nm 였고, 대역폭은 각각 60±1 nm, 45±2 nm, 105±4 nm 였고, 반사세기는 각각 77±5 %, 73±2 %, 81±5 % 이었다. 각 피크치에서 측정된 파장과 대역폭과 반사세기는 Table 3 에서 정리하였다. 검정에서의 스펙트럼은 27±0 % 이하의 반사세기로 측정되었으며, 이 값은 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 이론치와 차이를 갖는다. 이것은 검정을 나타내는 스위칭 모드에서 거울과 전극의 불균일한 편평도로 인한 거울과 전극의 접촉 시 약간의 공극이 존재하기 때문에 유발된 것으로서 거울과 전극 면의 정교한 연마 가공의 공정으로 개선될 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 연구에서는 간단한 공정을 위해 1 개의 공극을 가지며 기계적으로 연동된 미소거울의 디지털 구동을 사용하여 세 가지의 RGB 색상을 재현하는 간섭 변조기를 설계, 제작하여 그 성능을 측정하였다. 실험에서 제안된 간섭 변조기는 스위칭 모드 (000), (010), (101), (111)에서 각각 0±3 nm, 62±5 nm, 181±10 nm, 394±5 nm 의 출력변위를 생성하고, 각각 초록, 파랑, 빨강, 검정 색상을 재현하였다. 재현된 색상에 있어 미소거울과 스프링의 구조적인 문제로 발생하는 동일색상 내 색재현 편차는 향후 미소거울 및 스프링의 강성을 조절하여 개선될 수 있을 것으로 기대한다. 본 논문에서는 디스플레이 응용을 위해 간단한 공정으로 제작이

가능한 간섭 변조기의 출력응답 및 색재현 성능을 실험적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 중견연구자지원사업(도약과제)인 “생체모사 인간감응 시스템” (과제번호 20110016502)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Zhang, X. M., Chau, F. S., Quan, C. and Liu, A. Q., 1999, “Modeling of the Optical Torsion Micromirror,” *Proceedings of SPIE*, 3899, pp. 109~116.
- (2) Zho, J. P., Chen, H. L., Huang, J. M. and Liu, A. Q., 2005, “A Study of Dynamic Characteristics and Simulation of MEMS Torsional Micromirrors,” *Sensors and Actuators A*, 120, pp. 199~210.
- (3) Chui, C., Floyd, P. D., Heald, D., Arbuckle, B., Lewis, A., Kothari, M., Cummings, B., Palmateer, L., Bos, J., Chang, D., Chiang, J., Wang, L.-M., Pao, E., Su, F., Huang, V., Lin, W.-J., Tang, W.-C., Yeh, J.-J., Chan, C.-C., Shu, F.-A. and Ju, Y.-D., 2007, “The iMoDTM Display: Considerations and Challenges in Fabricating MOEMS on Large Area Glass Substrates,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 6466, pp. 646609.
- (4) Römer, F., Prott, C., Irmer, S., Daleiden, J., Tarraf, A., and Hillmer, H., 2003, “Tuning Efficiency and Linewidth of Electrostatically Actuated Multiple Air-Gap Filters,” *Applied Physics Letters*, Vol. 82, pp.176~178.
- (5) Pruessner, M. W., Stievater, T. H. and Rabinovich, W. S., 2008, “In-Plane Microelectromechanical Resonator with Integrated Fabry-Perot Cavity,” *Applied Physics Letters*, Vol. 92, pp. 081101.
- (6) Taii, Y., Higo, A., Fujita, H. and Toshiyoshi, H., 2006, “A Transparent Sheet Display by Plastic MEMS,” *J. Society Information Display*, Vol. 14, pp. 735~741.
- (7) Miles, M. W., 2003, “Interferometric Modulation: MOEMS as an Enabling Technology for High-Performance Reflective Displays,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 4985, pp. 131~139.
- (8) Solgaard, O., Sandejas, F. S. A. and Bloom, D. M., 1992, “Deformable Grating Optical Modulator,” *Optics Letters*, Vol. 17, pp. 688~690.
- (9) Hecht, E., 2002, *Optics 4th*, Addison Wesley, San Fransico, Ch.9.
- (10) Hochbaum, A., Jiang, Y., Niu, W. and Faris, S., 1999, “Bright Reflective Color Filters Based on Cholesteric Liquid Crystal Polymer,” *Proc. 6th Inter. Display Workshops (IDW'99)*.
- (11) Wang, K., Sinclair, M., Starkweather, G. K. and Bohringers, K. F., 2007, “An Electrostatic Zigzag Transmissive Microoptical Switch for MEMS Displays,” *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 16, pp. 140~154.