

실리콘 광도파로, 미소거울 및 접촉식 정전구동기가 집적된 광스위치

論 文

50C-12-8

An Optical Microswitch Integrated with Silicon Waveguides, Micromirrors, and Electrostatic Touch-Down Beam Actuators

陳令鉉* · 徐敬宣* · 曹永昊* · 李相信** · 宋基彰*** · 夫鍾郁***

(Young-Hyun Jin · Kyoung-Sun Seo · Young-Ho Cho · Sang-Shin Lee · Ki-Chang Song · Jong-Uk Bu)

Abstract - We present an integrated optical microswitch, composed of silicon waveguides, gold-coated silicon micromirrors, and electrostatic contact actuators, for applications to the optical signal transceivers. For a low switching voltage, we modify the conventional curved electrode microactuator into a electrostatic microactuator with touch-down beams. We fabricate the silicon waveguides and the electrostatically actuated micromirrors using the ICP etching process of SOI wafers. We observe the single mode wave propagation through the silicon waveguide with the measured micromirror loss of 4.18 ± 0.25 dB. We analyze major source of the micromirror loss, thereby presenting guidelines for low-loss micromirror designs. From the fabricated microswitch, we measure the switching voltage of 31.74V at the resonant frequency of 6.89kHz. Compared to the conventional microactuator, the present contact microactuator achieves 77.4% reduction of the switching voltage. We also discuss a feasible method to reduce the switching voltage to 10V level by using the electrode insulation layers having the residual stress less than 30MPa.

Key Words : Optical switch, Electrostatic actuator, Micromirror, Touch-down beam

1. 서 론

최근 광통신이 비약적으로 발전함에 따라, 가입자망에서 사용되는 값싼 광송수신 모듈의 필요성이 증대되게 되었다. 이러한 광송수신 모듈의 가격 저렴화를 위해 현재 사용되고 있는 PD, LD, 그리고 MEMS 광스위치 [1-5] 등 구성요소를 집적화 [6] 하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

MEMS 기술을 이용한 광스witch는 빛을 전달하는 매개체에 따라 크게 광도파로를 사용하는 방식 [1,2]과 광섬유를 사용하는 방식 [3-5]으로 나눌 수 있다. 먼저 광섬유를 이용하는 방식의 경우, 주로 미소거울을 이용하여 광단속 기능을 수행함으로써 신뢰성이 높은 광단속 기능을 구현할 수 있는 반면, 제작된 소자에 광섬유를 조립 및 정렬하는 추가 공정이 필요하다. 이와 반대로 광도파로를 사용하는 스위치는 광섬유를 조립하는 등의 추가적인 공정은 필요하지 않으나, 광단속 기능을 위해 열광학 또는 전기광학등의 원리를 사용하기 때문에 미소거울을 이용하는 스위치에 비해 신뢰성 및 단속비 측면에서 불리한 점을 포함하고 있다.

따라서 본 논문에서는 실리콘 광도파로와 그 사이에서 광단속을 위한 미소거울을 이용한 새로운 구조의 광스위치(그림 1)를 제안하였다. 본 스위치는 광도파로를 사용하여 광송수신 모듈과의 집적화가 용이하게 하였으며, 미소거울을 사용하여 신뢰성과 단속비 향상을 꾀하였다. 또한, 제안한 광스위치의 광도파로와 미소거울 그리고 미소거울용 구동기를 한 장의 실리콘 기판에 집적화하여 제작할 수 있는 공정을 개발하였으며, 제작된 광스위치의 성능을 평가하고, 성능 향상을 위한 방법에 관해 논하였다.

2. 이론적 해석 및 설계

2.1 스위치의 구조 및 동작 원리

그림 1은 본 논문에서 제안하는 스위치의 개략적인 구조를 나타낸다. 릿(rib)형 실리콘 광도파로를 H자 모양으로 제작하고, 광도파로 연결 부위에 위치한 금 도금된 실리콘 미소거울을 구동하여 스위칭 기능을 수행하게 된다. 스위치가 OFF 상태에서는 두 미소거울이 광도파로 사이에 있게되어 입력단에서 들어온 빛이 그대로 출력단으로 전달된다. 그와 반대로 ON 상태에서는 구동기가 작동하여 미소거울이 광도파로 사이에서 빠져나가게 되고, 이로 인해 입력된 빛은 PD로, LD에서 방사되는 빛은 출력단으로 전달되게 된다.

* 正 會 員 : 한국과학기술원 디지털나노구동 연구단

** 正 會 員 : Noveraoptics Inc.(USA, San Jose)

*** 正 會 員 : LG 전자기술원 소재재료연구소 마이크로시스템 그룹
接受日字 : 2001年 8月 14日
最終完了 : 2001年 10月 19日

2.2 광도파로

실리콘 광도파로 [7,8]는 가격이 싸고, 광통신에서 사용되는 파장대에서의 손실이 적으며, 다른 물질을 사용하는 광도파로에 비해 비교적 큰 단면의 광도파로를 만들어 접속손실을 쉽게 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한, 실리콘 광도파로는 MEMS 기술에 의한 미소구동기 등의 타 미세 구조물과 집적화하여 일체형으로 제작이 가능하다는 큰 장점이 있다.

실리콘을 이용한 단일모드 광도파로는 그림 2와 같은 립 형태로 제작한다. 이러한 광도파로에서 단일모드 도파를 위한 조건 [7,8]은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{a}{b} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

단, 식 (1)은 다음과 같은 두 개의 식을 만족할 때만 쓰일 수 있다.

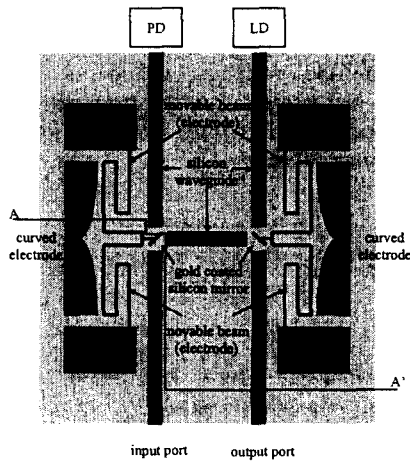


그림 1. 실리콘 광도파로와 금 도금된 미소거울 및 미소구동기로 이루어진 광스위치의 평면도
Figure 1. Top view of the optical microswitch (off-state), composed of rib-type silicon waveguides, gold-coated silicon micromirrors and electrostatic curved electrode actuators.

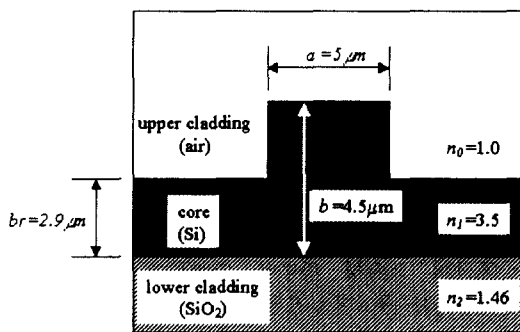


그림 2. 립 형태의 실리콘 광도파로의 단면도.
Figure 2. Cross-sectional view of the rib-type silicon waveguides.

$$2b\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \geq 1 \quad (2)$$

$$0.5 \leq r < 1 \quad (3)$$

여기서 a 와 b 는 광도파로 코어 부분의 폭과 높이를 각각 나타내고, r 은 코어와 립 부분의 높이 비를 나타낸다. n_1 와 n_2 는 각각 코어와 하부 클래딩의 굴절률이다.

이상의 이론을 근거로 그림 2와 같이 광도파로를 설계하였다. 여기에서 광도파로의 높이 b 는 사용한 SOI (Silicon-on-Insulator) 웨이퍼의 상부 실리콘 높이에서 결정되었으며, 나머지 변수들은 식 (1), (2), (3)을 만족하도록 결정하였다. 그림 3은 설계된 광도파로에서 도파되는 모드분포의 모의실험 결과를 나타내며, 모드의 크기는 각각 x 축과 y 축 방향으로 $2.7\mu\text{m}$ 와 $1.8\mu\text{m}$ 로 예상되었다.

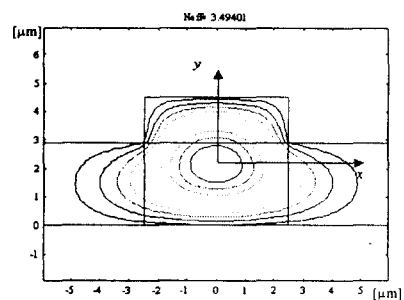
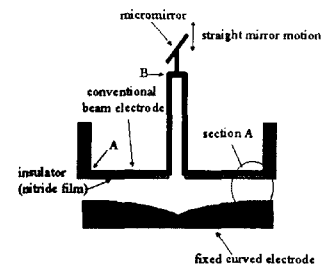
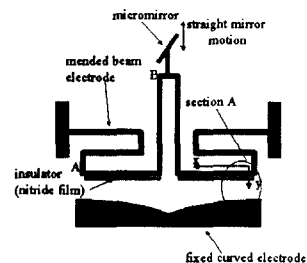


그림 3. 실리콘 광도파로 내의 모드 분포.
Figure 3. Estimated mode profile of the silicon waveguide.



(a)



(b)

그림 4. 곡면 전극을 이용한 정전형 미소구동기의 개략도: (a) 기존의 보 형태의 디자인; (b) 이동접촉식 보 형태의 디자인.

Figure 4. Schematic view of the electrostatic curved electrode microactuators: (a) conventional beam design; (b) touch-down beam design.

2.3 미소거울 구동기

MEMS 구동기의 동작방식 중 정전 구동방식은 동작시간이 빠르며, 전력소모가 작다는 장점으로 인해 본 스위치에 적용하기 아주 적합한 방식이라 할 수 있으나, 비교적 큰 구동거리를 위해서는 구동 전압이 높아져야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존 Legtenberg 등[9]이 제안한 곡면전극 구동기(그림 4a)를 변형하여 보와 전극 사이에 고정간격을 없애기 위해 보가 이동하여 전극과 완전히 맞닿을 수 있는 구조(그림 4b)를 고안하였다. 따라서, 종래의 전극 구조(그림 4a)에서는 보 전극의 끝부분이 고정되어 있어 곡면전극과 이격거리가 있는 반면, 본 논문에서는 그림 4b와 같이 굽어진 형태의 보 전극, 즉 이동접촉 보(touch-down beam)를 이용하여(그림 4b) 곡면전극과 마주하는 부분의 보 전극이 이동하여 곡면전극과 접촉하게 함으로써 구동 전압을 줄일 수 있도록 하였다. 이때, 보 전극과 곡면전극 사이의 절연막으로서 실리콘 질화막을 사용하였다.

2.3.1. 구동 전압 및 특성

곡면전극 구동기의 구동 전압을 해석하기 위하여 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하였다. 구동 전압 해석을 위해, 그림 4의 A부분을 확대하여 그림 5에 곡면전극 구동기의 개략적인 모양을 도시하였다. 여기에서 $s(x)$ 는 곡면전극의 모양을 나타내는 함수이고, $w(x)$ 는 보 전극의 변형모양을 나타낸다. N 은 절연을 위한 실리콘 질화막의 잔류응력에 의해 생성되는 보의 축방향 힘을 나타내고 있다. d_a 와 d_i 는 각각 초기의 곡면전극과 보 전극의 간격과 절연을 위한 실리콘 질화막의 두께를 나타낸다.

보 전극의 총 포텐셜 에너지, Π 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\Pi = U_b + U_m + V_{el} \quad (4)$$

여기에서 U_b 는 보의 굽힘에 의한 에너지를, U_m 은 보의 축방향 변형에 의한 에너지를, V_{el} 는 정전력에 의한 에너지를 나타내며, 각각은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

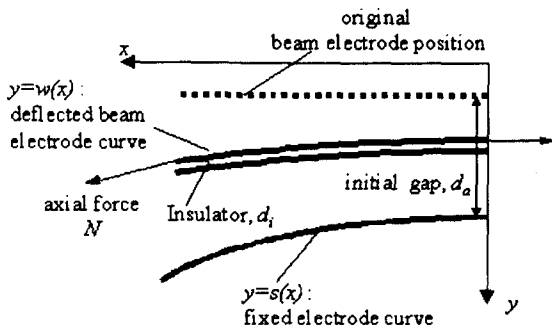


그림 5. 그림 4의 곡면전극 정전형 미소구동기 해석을 위한 개략도. (그림 4b의 A 부분).

Figure 5. Schematic diagram of the curved electrode microactuator of Fig. 4. (section A in Fig. 4b).

$$U_b = \frac{1}{2} \int EI \left[\frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (5)$$

$$U_m = \frac{1}{2} \int N \left[\frac{dw(x)}{dx} \right]^2 dx \quad (6)$$

$$V_{el} = -\frac{1}{2} \int \frac{\epsilon_a h V^2}{d_a + \frac{d_i}{\epsilon_i} + s(x) - w(x)} dx \quad (7)$$

여기에서 E 는 실리콘의 영계수를, I 는 보의 관성 모멘트를 나타내고, h 는 보의 높이이다. 또한 ϵ_a 는 공기 중에서의 유전상수이고, ϵ_i 는 절연막이 유전률을 나타낸다.

본 구동기의 스위칭 전압은 이동전극과 고정전극간의 정전력에 의해 접촉이 일어나는 문턱전압 (pull-in voltage)으로서, 다음과 같이 [10] 나타낼 수 있다.

$$V_{PI}^2 = \frac{\int EI \left[\frac{d^2 g(x)}{dx^2} \right]^2 dx + \int N \left[\frac{dg(x)}{dx} \right]^2 dx}{\int \frac{\epsilon_a h [g(x)]^2}{\left[d_a + \frac{d_i}{\epsilon_i} + s(x) - c_{PI} g(x) \right]^3} dx} \quad (8)$$

여기에서 c_{PI} 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} & \int \frac{c_{PI} [g(x)]^2}{\left[d_a + \frac{d_i}{\epsilon_i} + s(x) - c_{PI} g(x) \right]^3} dx \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{g(x)}{\left[d_a + \frac{d_i}{\epsilon_i} + s(x) - c_{PI} g(x) \right]^2} dx \end{aligned} \quad (9)$$

보 전극의 변형함수 $g(x)$ 를 구하기 위하여 그림 6과 같이 보 3에 정전력에 의한 분포하중이 작용하는 보 전극을 모델링 하였다 (그림 4a의 A-B 부분). 보 3의 변형식을 구하기 위해 가상 힘 P 를 가정하고, 에너지 방법을 사용하여 보의 변형 식을 구해보면, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} g(x) = & x^4 - 4l_3 x^3 + \frac{2l_3^2}{D(l_1 + l_2 + l_3)} \\ & \times \{ D(3l_1 + 3l_2 + 2l_3) - 3l_2^2 l_3 (2l_1 + l_2) \} x^2 \end{aligned} \quad (10)$$

식 10에서 l_1, l_2, l_3 는 그림 6에 나타난 바와 같으며, D 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} D = & 12\alpha(l_1 + l_3)(l_1 + l_2 + l_3) \\ & + l_2^2 \{ l_2(l_2 + 4l_1) + 4l_3(l_2 + 3l_1) \} \end{aligned} \quad (11)$$

이때, α 는 아래식과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{I}{A} \quad (12)$$

절연막으로 사용한 실리콘 질화막의 잔류응력, F_r 에 의해 보 전극에 축방향 힘, N 이 발생하며, 이는 힘 평형 상태와 재료의 응력-변형 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{2\beta}{\beta+2} F_r \tag{13}$$

여기에서 β 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{A_S E_S}{A_N E_N} \tag{14}$$

식 (13)에서 N 은 실리콘 보에 남는 잔류응력을 나타내고, 식 (14)에서 A_S 와 E_S 는 실리콘 보의 단면적과 영계수를, A_N 과 E_N 은 실리콘 질화막의 단면적과 영계수를 각각 나타낸다.

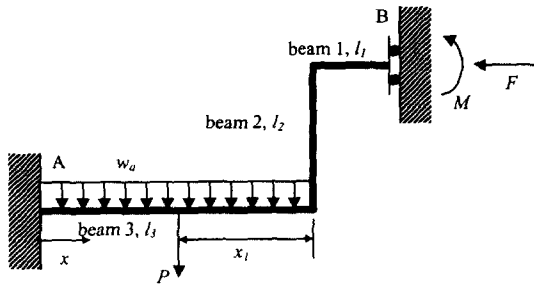


그림 6. 균일한 분포하중 w_a 와 가상하중 P 가 가해진 보 전극의 모델. (그림 4a의 A-B 부분).
 Figure 6. Beam electrode model (A-B of Fig. 4a) with a uniformly distributed load, w_a , and virtual load, P .

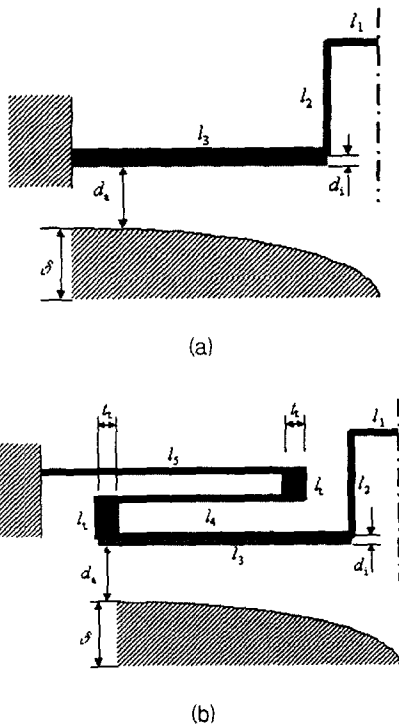


그림 7. 설계된 미소구동기의 개략도: (a) 기존의 보를 이용한 디자인; (b) 이동접촉보를 이용한 디자인.
 Figure 7. Microactuator prototypes: (a) conventional beam design; (b) touch-down beam design.

표 1. 미소구동기의 설계변수. (그림 7)

Table 1. Dimensions of the microactuator prototypes shown in Fig. 7.

Design variables	Microactuator Prototype Dimension [μm]	
	Conventional beam design (Fig. 4a)	Touch-down beam design (Fig. 4b)
Initial gap, d_a	1.5	0 (after voltage applied)
Insulator thickness, d_i	0.5	
Maximum deflection, δ	10	
Beam thickness, t	3	
Beam height, h	4.5	
Beam length, l_1	10	
Beam length, l_2	40	
Beam length, l_3	550	
Beam length, l_4	0	450
Beam length, l_5	0	575
Truss length, l_t	0	13
Truss thickness, t_t	0	10

제안한 이동접촉 보를 이용한 구동기의 구동전압 또한 앞서 유도한 식으로 해석할 수 있다. 이때에는 이동접촉 보에 의해 초기 곡면전극과 보 전극의 간격 d_a 가 없어지는 효과 ($d_a=0$)가 나타나게 된다. 단, 이러한 효과를 나타나게 하기 위해서는, 기존 곡면전극 구동기와 다르게 이동접촉 보 형태의 구동기에서 추가된 보 부분 (그림 4b의 mended beam 부분)의 스프링이 구동전압보다 낮은 전압에서 움직일 수 있도록 설계되어야 한다.

2.3.2. 설계 및 구동 전압 예측

본 논문에서 제안한 이동접촉 보를 이용한 구동기의 성능을 기존 구동기와 비교평가를 위해 그림 7에 도시한 바와 같이 동일한 구동거리 $12\mu\text{m}$ 를 기준으로 기존의 구동기와 이동접촉 보를 이용한 구동기를 각각 설계하였다. 두 종류의 구동기 모두 보 전극은 폭 $3\mu\text{m}$, 길이 $550\mu\text{m}$ 의 실리콘 보를 사용하였고, 보 전극과 곡면전극의 초기간격은 $1.5\mu\text{m}$ 로 고정하였다. 두 종류의 구동기에 대한 상세 설계 결과를 표 1에 정리하였다. 앞절에서 유도한 구동전압의 이론식과 FEM 모의 실험의 결과로부터 얻은 각 디자인에 대한 구동전압과 공진 주파수를 표 2에 정리하였다. 구동전압의 계산에 있어, 절연막으로 사용된 실리콘 질화막의 잔류응력은 1 GPa 로 가정하였다.

표 2. 디자인 된 스위치의 예상 성능.
Table 2. Estimated switch performances.

	conventional beam design (Fig. 4a)	touch-down beam design (Fig. 4b)
Switching voltage	170 V	36 V
Resonant Frequency	18.64 kHz	6.89 kHz

3. 제작 공정

본 논문에서 제안하는 광스위치는 SOI 기판에 광도파로, 미소거울, 미소거울 구동용 구동기를 플라즈마 건식 식각공정을 사용하여 모두 집적화하여 제작하였다. 그림 8은 그림 1에 나타난 광스위치의 단면 AA'에서의 제작공정을 나타낸다. 먼저, 그림 8a에서와 같이 상부 실리콘을 1.6 μ m 플라즈마 건식 식각하여 광도파로를 제작한다. 그림 8b에서는 역시 플라즈마 건식 식각 공정을 통하여 미소거울로 사용될 부분을 제작한다. 그림 8c에서는 미소구동기 부분을 역시 같은 공정을 통해서 제작하고, 그림 8d에서와 같이 미소구동기 부분의 전극을 형성하기 위해 인을 1,000 $^{\circ}$ C에서 20분간 도핑한다. 다음으로는 보 전극과 곡면전극 사이에 절연막을 형성하기 위해서 실리콘 질화막을 증착한 후, 건식 식각 공정을 통해 수직면에만 실리콘 질화막을 남긴다 (그림 8e). 그 뒤, 금속 전극 형성과 미소거울 코팅을 위한 금속막을 증착하고 (그림 8f), 희생층으로 사용된 산화막을 제거하여 (그림 8g) 광스위치를 완성하게 된다.

또한, 플라즈마 건식 식각 공정을 통해 제작된 미소거울의 표면 조도 향상을 위해 미소거울이 제작된 기판에 열산화막을 기른 뒤, 산화막을 다시 제거하는 공정 (smoothing-out process)을 추가로 수행하였다. 이러한 공정을 통해 표면 조도가 향상된 식각 수직면을 그림 9에서 확인 할 수 있다.

그림 10은 제작된 광스위치의 SEM 사진을 보여주고 있다. 그림 10a는 광도파로와 미소거울을 포함하는 광스위치 전체를 나타내고 있고, 그림 10b는 금으로 도금된 미소거울과 광도파로를 확대한 모습이다. 그림 11a와 그림 11b는 제작된 두 종류의 미소구동기를 보여주고 있다.

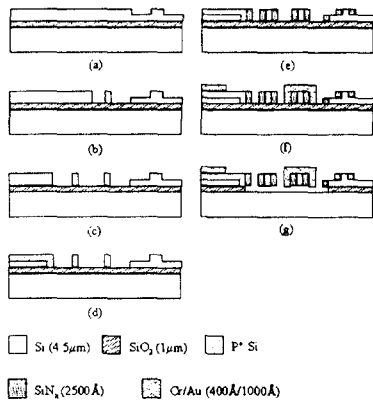


그림 8. 제안한 광스위치의 제작 공정.(그림 1의 AA' 단면도).
Figure 8. Fabrication process for the optical microswitch of Fig. 1. (cross-section of A-A').

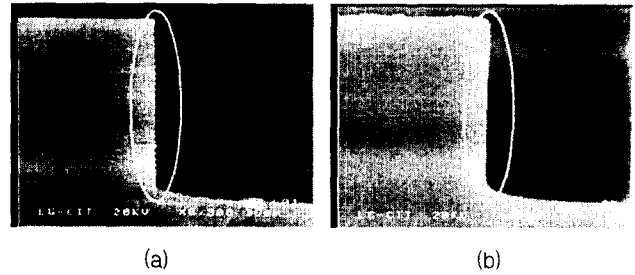


그림 9. 플라즈마 식각 공정을 이용해 제작한 식각 수직면의 단면 형상: (a) 표면조도 향상 공정 수행 전; (b) 표면조도 향상 공정 수행 후.

Figure 9. Cross-sectional view of the vertical surface fabricated by an ICP RIE process; (a) before the sidewall smoothing out process; (b) after the sidewall smoothing out process.

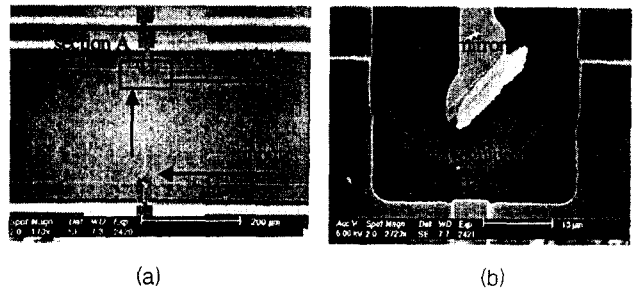


그림 10. 제작된 광스위치의 전자현미경 사진: (a) 광도파로와 미소거울; (b) 미소거울의 확대도 (그림 (a)의 A 부분)

Figure 10. SEM photographs of the fabricated microswitch: (a) waveguides and mirrors; (b) enlarged view of mirror (section A in (a)).

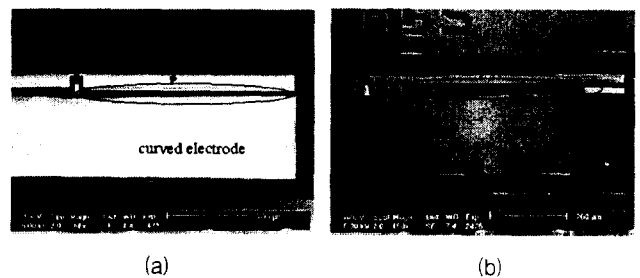


그림 11. 제작된 미소구동기의 전자현미경 사진: (a) 기존의 보를 이용한 디자인 (그림 4a); (b) 이동접촉 보를 이용한 디자인 (그림 4b).

Figure 11. SEM photographs of the fabricated microactuator: (a) conventional actuator of Fig. 4a; (d) touch-down actuator of Fig. 4b.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 광손실 측정

제작된 광스위치의 광학적 평가를 위해, 광원으로는 파장 1550nm, 출력 1.45±0.01mW인 레이저 다이오드 (LD)를 사용하였으며, 3축 정렬기를 사용하여 수신단에서 최고의 출력을 얻을 수 있도록 광스위치를 정렬하였다. 제작된 광도파로에서는 설계한 바와 같이 단일모드의 광신호가 도파되는 것으로 관찰되었으며 (그림 12), 도파되는 모드의 크기는 x축 방향으로 2.76±0.01µm, y축 방향으로 1.90±0.01µm로 측정되었다.

제작된 광스위치에서 발생하는 광손실의 평가를 위해 그림 13과 같은 측정장치를 사용하였다. 광스위치 전체의 손실은 입력/출력단에서 광섬유와 광도파로 사이의 접속부에서 생기는 손실 (coupling loss), 광도파로를 진행하며 생기는 손실 (propagation loss), 두 광도파로 사이의 공간 접속손실 (free space coupling loss) 및 미소거울에서 생기는 손실로 나눌 수 있다. 각 손실 요인에 대한 측정된 결과가 표 3에 나타나 있다. 여기에서 광도파로의 도파손실은 입력단 접속손실에 포함되어 있다. 또한, 광도파로 사이의 공간 접속손실은 그림 14와 같이 측정되었다. 이러한 실험결과를 바탕으로 미소거울에서 생기는 손실은 4.18±0.25dB로 측정되었으며, 광스위치의 측정 성능을 표 3에 나타내었다.

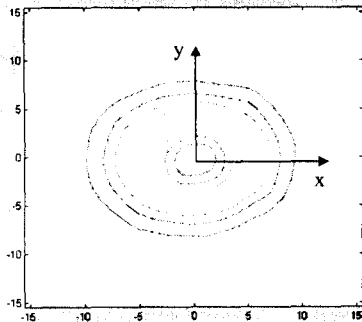


그림 12.. 제작된 광도파로에서 측정된 모드 분포.
Figure 12. Measured mode field distribution in the fabricated waveguide.

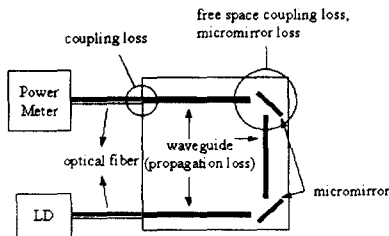


그림 13. 미소거울의 손실 측정을 위한 실험 장치 및 광손실의 원인.
Figure 13. Experimental set-up for micromirror loss measurement and optical loss source.

표 3. 제작된 광도파로의 성능 측정 결과

Table 3. Measured data from the fabricated waveguide.

	Measured value
Input coupling efficiency	10.4±0.1 %
Output coupling efficiency	65.6±0.5 %
Free space coupling efficiency	25.2±0.9 %
Insertion loss (OFF state)	20.34 dB
Insertion loss (ON state)	5.99 dB

미소거울에서의 손실을 분석하기 위해 광도파로에서 도파되는 모드를 가우시안 (Gaussian) 함수로 가정하였다 (그림 15). 광도파로를 빠져나와 자유공간을 z만큼 진행한 빛의 모드 크기 [11]는 다음과 같이 표시가 가능하다.

$$w_x(z) = w_x \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_x^2}\right)^2} \quad (15)$$

$$w_y(z) = w_y \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_y^2}\right)^2} \quad (16)$$

여기에서 w_x, w_y 는 각각 광도파로 안에서 진행하는 모드크기의 x축, y축 방향 성분을 나타낸다. 광도파로 끝단에서 z의 거리만큼 떨어진 미소거울에서 반사되는 유효파워, $P_R(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

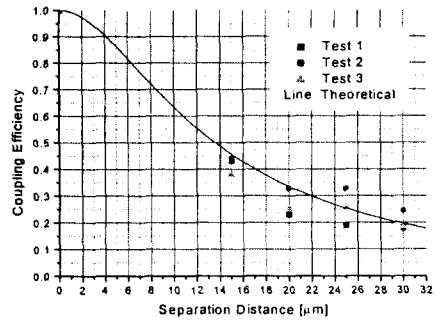


그림 14. 광도파로간의 자유공간 접속 손실.
Figure 14. Coupling efficiency as a function of waveguide separation distance.

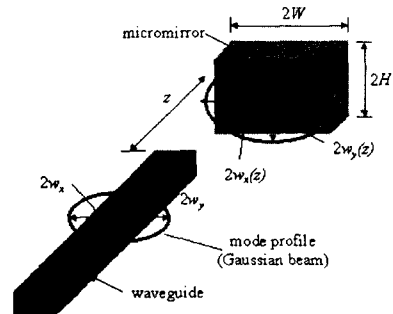


그림 15. 광도파로와 광도파로 끝으로부터 z 거리에 있는 미소거울에서의 모드 분포.
Figure 15. Mode field distributions in the waveguide and at the mirror surface across the free space, z.

$$P_R(z) = \int_{-H}^H \int_{-W}^W P_{tot}(x, y, z) dx dy \quad (17)$$

$$= Erf\left[\frac{\sqrt{2}W}{w_x(z)}\right] Erf\left[\frac{\sqrt{2}H}{w_y(z)}\right]$$

식 17에서 사용된 Erf 는 에러함수 (error function)을 의미하고, $2W$, $2H$ 는 각각 미소거울의 폭과 높이를 나타낸다. $P_{tot}(x,y,z)$ 는 자유공간상에 존재하는 파워를 나타낸다. 분해식으로부터 광도파로에서 출력된 빛이 미소거울에서 90% 이상 반사가 이루어지기 위해서는 미소거울의 높이 $2H$ 가 다음과 같은 식을 만족하도록 설계되어야 함을 알 수 있다.

$$\frac{\sqrt{2}H}{w_y(z)} \geq 1.16 \quad (18)$$

본 논문에서 사용한 광스위치의 제작 공정에서는 식각 깊이가 각각 다른 미소거울과 광도파로를 제작하기 위해 두장의 마스크를 사용하였고, 이로 인해 제작 과정에서, 미소거울과 광도파로 사이에 정렬오차가 발생하였다. 광도파로와 미소거울 사이에 Δ_x 의 상대 변위를 가지고 있을 때, 접속효율 [11]은 다음 식으로 표시 가능하다.

$$\eta_D = \text{Exp}\left[-\left(\frac{\Delta_x}{w_x}\right)^2\right] \quad (19)$$

광도파로와 미소거울 사이의 90%이상의 접속 효율, 즉 손실을 0.5 dB 이하로 줄이기 위해서는 모드 크기에 대해 정렬 오차를 다음 식을 만족하도록 제작하여야 한다.

$$\frac{\Delta_x}{w_x} \leq 0.325 \quad (20)$$

여기에서 w_x 는 광도파로 내의 x 축 방향 모드크기이다.

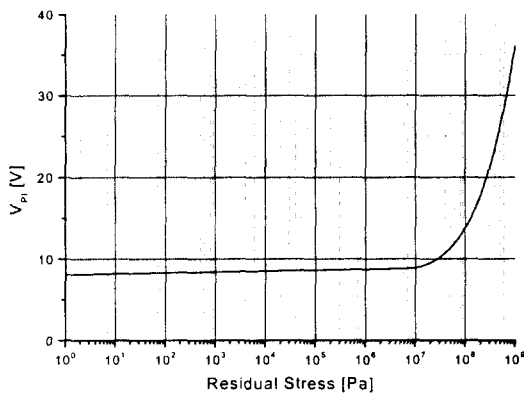


그림 16. 이동접촉 보의 절연막으로 사용된 실리콘 질화막의 잔류응력 변화에 대한 스위칭 전압의 변화.
Figure 16. Switching voltage curve of the microactuator shown in Fig. 4b: estimated for different residual stress levels in the silicon nitride insulation layer.

표 4. 측정된 스위치의 성능.

Table 4. Measured switch performances.

	conventional beam design (Fig. 4a)	touch-down beam design (Fig. 4b)
Switching voltage	140±2 V	31.70±4 V

4.2. 구동기의 스위칭 전압 측정

제작된 구동기의 측정된 스위칭 전압을 표 4에 정리하였다. 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 제안한 이동접촉 보를 사용한 구동기가 기존의 구동기에 비해 약 77.4% 정도 낮은 전압에서 스위칭이 일어남을 알 수 있다. 또한, 이론적 해석을 통하여 제안한 구동기의 스위칭 전압이 절연막으로 사용된 실리콘 질화막의 잔류응력에 민감하게 변하는 것을 알 수 있었다 (그림 16). 그림 16에 실리콘 질화막의 잔류응력과 스위칭 전압과의 관계를 나타내었다. 이 그래프에서 실리콘 질화막의 잔류응력을 30 MPa [12]로 낮춘다면, 제안한 구동기가 10V에서 스위칭이 일어날 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 광송수신 모듈에 집적화시키기 위한 새로운 구조의 광스위치를 제안하고 그 성능 시험을 하였다. 제안한 광스위치는 실리콘 광도파로를 사용하여 광신호를 전송하고 그 사이에서 구동되는 미소거울을 사용하여 스위치 기능을 구현하였다. 실리콘 광도파로와 미소거울, 거울을 구동하기 위한 구동기 모듈을 한 장의 기판에 플라즈마 건식 식각 공정을 사용하여 집적화하여 제작하였다.

먼저, 제작된 실리콘 광도파로에서 단일 모드의 광신호가 도파되는 것을 확인하였고, 그 모드의 크기는 x 축과 y 축 방향으로 각각 $2.76 \pm 0.01 \mu\text{m}$ 와 $1.90 \pm 0.01 \mu\text{m}$ 으로 측정되었다. 미소거울은 실리콘을 플라즈마 건식 식각 공정을 사용하여 제작한 뒤, 표면 조도 향상을 위한 공정을 수행하고, 높은 반사율을 얻기 위해 금을 도금하였다. 이렇게 제작된 미소거울의 손실은 $4.18 \pm 0.25 \text{dB}$ 로 측정되었으며, 손실의 원인은 광도파로에서 방사되는 모드 크기에 비해 미소거울의 크기가 충분치 못해 효율적인 반사가 일어나지 못했고, 제작 공정 중, 미소거울과 광도파로 사이의 정렬오차 때문인 것으로 밝혀졌다. 이러한 손실을 줄이기 위한 미소거울 설계 지침을 제시하였다.

미소거울을 구동하기 위한 구동기는 기본적으로 곡면전극 구동기를 사용하였고, 낮은 스위칭 전압을 위해 보와 전극이 완전히 맞닿을 수 있는 이동접촉 보를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 이동접촉 보 구동기와 기존 구동기를 제작하여 구동전압을 측정·비교한 결과 제안한 구동기가 기존의 구동기에 비해 77.4% 정도 낮은 전압에서 구동이 가능한 것으로 밝혀졌다. 또한, 제안한 구동기는 절연막으로 사용된 실리콘 질화막의 잔류응력을 30MPa 이하로 낮출 경우, 10V 이하의 전압으로 구동이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 G7 초소형 정밀기계 기술개발 사업과, LG 전자기술원, 그리고 과학기술부 창의적 연구진흥사업 디지털 나노구동연구단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 광도파로의 모의실험은 한국과학기술원 전기전산학과 신상영 교수님과 광과실험실의 도움을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

[1] H.-S. Kang, *Fabrication of a 2×2 Thermo-optic Digital Optical Switch*, Master Thesis, KAIST, 1998

[2] S.-S. Lee, *Digital Optical Switch using an Electro-optic Polymer*, Ph.D. Thesis, KAIST, 1998.

[3] R.A. Miller, Y.-C. Tai, G. Xu, J. Bartha, and F. Lin, "An Electromagnetic MEMS 2×2 Fiber Optic Bypass Switch,," *Tech. Dig. of Transducers '97*, Chicago, 1997, pp.89-92

[4] C. Marxer, M.-A. Gretillat, N.F. de Rooji, R. Battig, O. Anthamatten, B. Valk, and P. Vogel, "Vertical Mirrors Fabricated by Reactive Ion Etching for Fiber Optical Switching Applications," *Proc. IEEE MEMS Workshop*, Japan, 1997, pp.49-54

[5] L.A. Field, D.L. Burriesci, P.R. Robrish, and R.C. Ruby, "Micromachined 1×2 Optical Fiber Switch," *Tech. Dig. of Transducers '95*, Sweden, 1995, pp.344-347

[6] M. Choi, H. Koh, E. Yoon, K. Shin, and K. Song, "Self-Aligning Silicon Groove Technology Platform for the Low Cost Optical Module," *Proc. 49th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, 1999, pp.1140-1144

[7] R.A. Soref, J. Schmidtchen, and K. Petermann, "Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂," *IEEE J. of Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 8(1991), pp.1971-1974

[8] J. Schmidtchen, A. Splett, B. Schuppert, K. Petermann, and G. Burbach, "Low Loss Single Mode Optical Waveguides with Large Cross-section in Silicon-On-Insulator," *Electronics Letter*, Vol. 27, No. 16(1991), pp.1486-1487

[9] R. Legtenberg, E. Berenschot, M. Elwenspek, and J. Fluitaman, "Electrostatic Curved Electrode Actuators," *Proc. IEEE MEMS Workshop*, Netherlands, 1995, pp.37-42

[10] H.A.C. Tilmans and R. Legtenberg, "Electrostatically Driven Vacuum -encapsulated Polysilicon Resonators: Part II. Theory and Performance," *Sensors and Actuators*, A45 (1994) , pp.67-84

[11] E.M. Zolotov, P.G. Kazanskii, and A.M. Prokhorov, "Investigation of a Contact between an Channel Waveguide in LiNbO₃ and a Single-Mode Fiber," *Sov. J. Quantum Electron*, Vol. 12, No. 1(1982), pp.107-110

[12] Y. Yee, H.-J. Nam, S.-H. Lee, J.U. Bu, Y.-S. Jeon, and S.-M. Cho, "PZT Actuated Micromirror for Nano-tracking of Laser Beam for High-density Optical Data Storage," *Proc. IEEE MEMS Workshop* Japan, 2000, pp.435-440

저 자 소 개



진영현 (陳令鉉)

1976년 9월 29일 생. 1998년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업. 2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 창의적 연구진흥사업 디지털나노구동연구단 연구

조원. 관심분야: 미소 광기전 복합소자, 광통신 및 정보저장 장치 용 나노구동기관.

Tel : 042-869-3078, Fax : 042-869-8690

E-mail : memsace@hanmail.net

이상신 (李相信)

1968년 9월 5일 생. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1997년~1998년 University of Southern California Post-doc. 1998년~2001년 2월 LG 전자기술원 소자재료연구소 마이크로시스템 그룹 책임연구원. 현재 Noveraoptics Inc. (USA, San Jose) 연구원. 관심분야 : 폴리머 광도파로를 이용한 광학 modulator, switch, attenuator 및 optical MEMS.

Tel : +1-408-894-3346

E-mail : sang-shin.lee@noveraoptics.com



서경선 (徐敬宣)

1971년 9월 14일 생. 1994년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업. 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 창의적 연구진흥사업 디지털나노구동연구단 연구원.

Tel : 042-869-3078, Fax : 042-869-8690

E-mail : ksseo@kaist.ac.kr

송기창 (宋基彰)

1966년 2월 24일 생. 1988년 한양대 금속공학과 졸업. 1990년 동 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1991년~현재 LG 전자기술원 소자재료연구소 마이크로시스템 그룹 책임연구원. 관심분야 : Optical MEMS

Tel : 02-526-4586, Fax : 02-3461-3508

E-mail : skc@lg-elite.com



조영호 (曹永昊)

1957년 8월 10일 생. 1980년 영남대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 1991년 미국 버클리대 기계공학과 졸업(공학박사). 1982년~1986년 한국과학기술연구원(KIST) CAD/CAM연구

실 연구원. 1987년~1990년 Berkeley Sensor & Actuator Center(BSAC) 연구 조교. 1990년~1991년 BSAC Post-doc., 1991년~1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원. 1994년~현재 KAIST 기계공학과 부교수. 현재 창의적연구진흥사업 디지털나노구동연구단장. 관심분야: 마이크로 관성센서, 마이크로 액추에이터, 미소 광기전복합 소자, 디지털나노구동 기관 및 응용

Tel : 042-869-8691, Fax : 042-869-8690

E-mail : mems@kaist.ac.kr

부종욱 (夫鍾郁)

1960년 2월 8일 생. 1984년 고려대 금속재료공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 금속재료공학과 졸업(공학박사). 1995년~1996년 The University of Michigan, Ann Arbor The Center for Integrated Sensors and Circuits Post-doc.. 1984년~현재 LG 전자기술원. 소자재료연구소 연구위원. 마이크로시스템그룹 그룹장, MEMS Product 그룹 그룹장.

Tel : 02-526-4551, Fax : 02-3461-3508

E-mail : jbu@lg-elite.com