추가된 수직전극을 구비한 저전압 구동의 광 스위칭용 정전구동 마이크로 액츄에이터

論 文
52C-1-9

A Low Voltage Driven Electrostatic Micro Actuator with an Added Vertical Electrode for Optical Switching

尹 容 燮* · 裵 紀 德* · 崔 瑩** · 高 秉 天***
(Yong-Seop Yoon · Ki-Deok Bae · Hyung Choi · Byung-Cheon Koh)

bstract - With the progress of optical communication technology recently, the development of micro actuator sing MEMS technology has been made for optical switching. The actuation types are various; electrostatic, lectromagnetic, and electrostatic +electromagnetic etc. Among them, the electrostatic type is the most popular ecause of the relative ease of fabrication, integration and shielding as well as low power consumption. However, needs a high voltage to generate a larger driving force. To overcome this problem, we proposed a new type of lectrostatic actuator with an extra vertical electrode in addition to the horizontal one. The vertical electrode also lays a role of making the stable angular rotation as a stopper. From the theoretical analysis and experiment, we nd the actuation voltage can be reduced up to 50 % of that of the conventional one.

Key Words : Electrostatic actuator, vertical electrode, horizontal, stopper.

1. 서 론

인터넷을 통한 데이터 전송의 증가와 멀티미디어 시대의 래에 따른 데이터 traffic 을 해결하기 위한 광통신 기술의 발전과 더불어 MEMS 기술을 이용한 광 스위치의 개발이 그 장점 - 작은 crosstalk, 큰 소광비, 빠른 스위칭 속도, 파장 및 편광에의 비의존성 등 - 으로 인하여 활발히 이루어지고 있다. Micromirror 를 이용한 광 스위치는 여러 연구기관에 의해, 구동 방법에 따라 전자기력형, 정전인력형, 전자기력+정전인력 방식 등의 액츄에이터로 개발되어 왔고 그 구조도 다양하게 제작되어 왔다[1-3]. 정전인력 방식은 구조 및 구동 방식이 간단하고, 저소비 전력 등의 장점이 존재하나 구동력의 증가를 위하여 높은 구동 전압이 요구되는 단점이 있고, 전자기력형은 선형성을 갖고, 큰 구동력을 이룰 수 있으나 자기장을 발생시키기 위하여 자성 물질의 사용이 요구되고, 전류에 의한 구동 방식으로 소비 전력이 크고, shielding 및 crosstalk 발생 등의 문제가 있다. 전자기력+정전인력 구조도 구동 전압 및 전류를 감소시킬 수 있으나, 구동 방식과 구조가 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 정전인력 방식의 새로운 구조를 제안하여 구동 전압이 낮은 액츄에이터를 제작하였다.

* 非 會 員 : 三星綜合技術院 MEMS Lab.
** 正 會 員 : 三星綜合技術院 MEMS Lab. 理博
*** 正 會 員 : 三星綜合技術院 MEMS Lab.장 연구위원 工博
接受日字 : 2002年 5月 15日
最終完了 : 2002年 11月 21日

2. 본 론

2.1 액츄에이터 디자인, 모델링 및 해석

그림 1 은 제안된 액츄에이터의 구조를 보여준다. 웨이퍼 상의 트렌치부에 형성되는 수평 및 수직 전극, 차폐 전극, 상부 전극(거울면) 그리고 포스트에 고정되어 거울면을 지지하며 복원력을 제공하는 비틀림 스프링으로 구성된다.

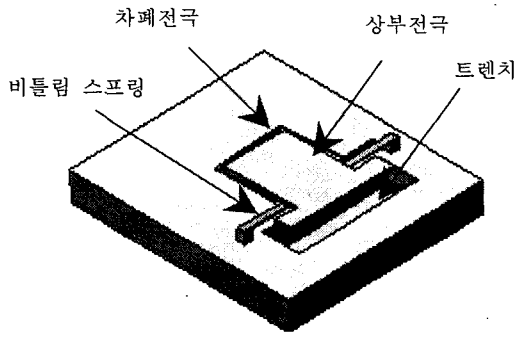


그림 1 제안된 액츄에이터의 구조
Fig. 1 Schematic design of a proposed actuator

일반적으로 정전력 구동의 액츄에이터는 상부와 수평 전극만으로 구성되는데 제안된 액츄에이터는 수직 전극을 구비하여 구동 전압을 크게 낮추고 스토퍼(stopper) 역할을 수행하여 거울면의 재현성 있는 회전(90 도)과 구동 안전성을 확보하도록 고안되었다. 상부와 수평 및 수직 전극 사이에 전위차가 존재하면 정전력이 발생하고 이에 의한 토오크는 상부 전극을 트렌치부로 회전시킨다. 이 때 수평 및 수직

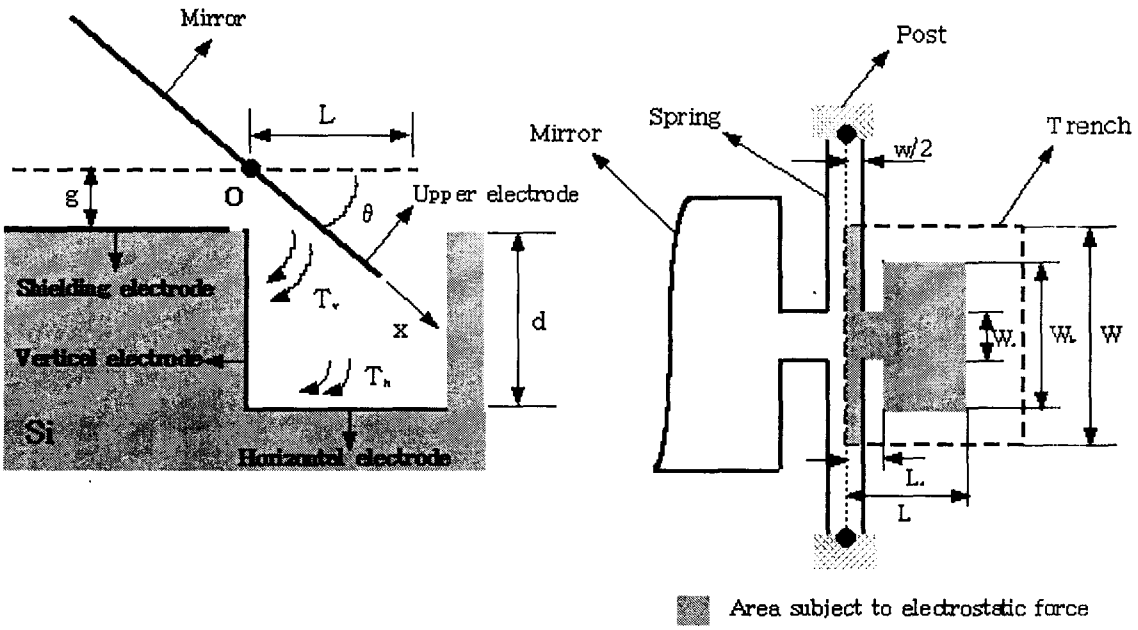


그림 2 제안된 액츄에이터의 해석 모델
Fig. 2 Analytic model of the actuator

전극에 의하여 상부 전극의 트렌치부로의 회전을 억제하는 역방향의 힘이 거울면에 발생되는데, 차폐 전극을 형성하고 거울면과 차폐 전극을 등전위면으로 하여 이 힘을 제거하고자 하였다. 스프링의 끝단에서는 거울면이 회전함에 따라 그 회전을 저지하는 반발 토오크가 발생하는데, 정전인력에 의한 토오크와 스프링에 의한 반발 토오크 사이의 역학적인 관계로부터 거울면의 회전각이 결정된다. 이를 위해서 제안된 구조에 대한 모델링(그림 2)과 모델링을 통한 정전인력에 의한 토오크 계산, 스프링의 반발 토오크 계산 등의 이론적인 해석이 필요하다

2.1.1 토오크 계산

거울면의 구동부에 작용하는 O 점 주위의 토오크(T_t) 는 수직 전극에 의한 토오크(T_v) 와 수평 전극에 의한 토오크(T_h) 의 합력으로 구할 수 있다. 수직 전극과 수평 전극에 의한 토오크는 각각 수직 전극과 수평 전극에 의한 정전력과 회전 중심으로부터의 거리의 곱으로부터 구해진다. 수평 전극에 의한 정전력(F_h) 과 수직 전극에 의한 정전력(F_v) 은 다음 과정으로 계산된다.

거울면이 θ 만큼 회전했을 때, 수평 및 수직 전극에 의한 전기장의 세기는 다음과 같고,

$$E_h = \frac{V}{(\frac{d+g}{\sin\theta} - x)\theta} \quad , E_v = \frac{V}{(\frac{\pi}{2} - \theta)x} \tag{1}$$

정전력은

$$F = \frac{\varepsilon A E^2}{2} \tag{2}$$

이다. 여기서 V 는 전위차, E 는 전기장, A 는 면적 그리고 ε 는 유전률을 나타낸다.

F_h 와 F_k 는 위 식들로부터 계산되고 T_h , T_v 는 다음 식으로 구해진다.

$$T_h = \int_0^L F_h x dA = \int_0^L \frac{\varepsilon V^2 x}{2(\frac{d+g}{\sin\theta} - x)^2\theta^2} \tag{3}$$

$$= \int_0^{w/2} F_h x dA + \int_{w/2}^{L_a} F_h x dx + \int_{L_a}^{L} F_h x dA$$

$$T_v = \int_g^L F_v x dA = \int_g^L \frac{\varepsilon V^2}{(\frac{\pi}{2} - \theta)^2 x} dA$$

$$= \int_g^{L_a} F_v x dA + \int_{L_a}^{L} F_v x dA \quad , L_a > g \tag{4}$$

$$= \frac{\varepsilon W_a V^2}{(\frac{\pi}{2} - \theta)^2}[\ln(L_a) - \ln(g)] + \frac{\varepsilon W_b V^2}{(\frac{\pi}{2} - \theta)^2}[\ln(L) - \ln(L_a)]$$

스프링에 의한 복원 토오크(T_r) 는 회전각이 θ 일 때 다음 식으로 계산되어진다.

$$T_r = \frac{2Gwt^3}{3l}\theta[1 - \frac{192}{\pi^5}\frac{t}{w}\tanh(\frac{\pi w}{2t})] \tag{5}$$

여기서 G 는 스프링 재질의 전단 계수이며, w,t,l 은 스프

기의 디자인 변수이다.

2.1.1 평형 위치 계산

상부 전극과 수직 및 수평 전극사이에 전압을 인가하면 거울면의 구동부에는 수직 및 수평 전극에 의한 토오크가 작용하고, 거울면은 회전하게 된다. 거울면의 회전은 연결된 스프링의 복원 토오크를 유발하는데 이들 토오크들 사이의 역학적 관계에 의하여 평형 위치가 결정된다.

$$T_t = T_v + T_h = T_r \qquad (6)$$

식 (6)을 만족시키는 θ 의 값이 인가한 전압 하에서의 평형 위치가 된다.

2.1.3 해석 결과

다양한 전압을 가했을 때, 위의 방정식을 풀 수 있고, 그 결과를 그림 3에 나타내었는데 회전각(θ)의 함수로서 인가 전압이 각각 50, 55 V 일 때, 토오크를 보여주고 있다.

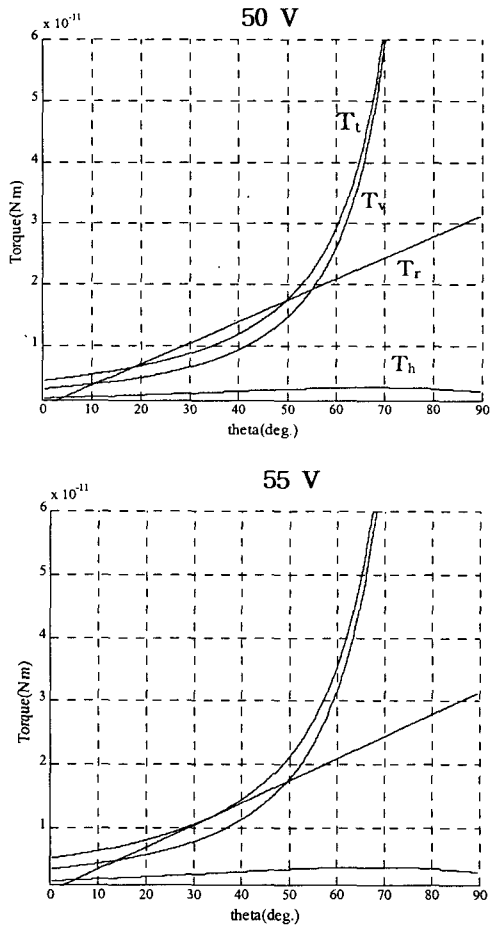


그림 3 전압에 따른 θ 의 함수로서 토오크 선도
Fig. 3 Torques in a function of θ with applied voltages

수직 전극에 의한 토오크가 수평 전극에 의한 것보다 큼을 알 수 있는데(θ 가 클수록 그 차이는 심화됨), 회전각이 증가할수록 수직 전극과 상부 전극사이의 거리가 가까워져 수직 전극에 의한 정전력이 크게 증가하는 반면, 수평 전극에 의한 정전력은 거리는 가까워지지만 작용 면적이 급격히 감소하여 정전력의 변화는 거의 없기 때문이다. 구동 전압이 55 V 일 때 문턱 전압이 발생함을 보여주는데 이 이상의 전압에서는 θ의 모든 범위에서 정전력에 의한 토오크 가 스프링의 복원 토오크보다 커서 거울면이 수직 전극에 달라붙게 됨을 의미한다(또한 수직 전극은 stopper 의 기능을 동시에 수행하도록 고안되었다). 이는 기존 정전력 방식의 구동 전압보다 50 % 이상 낮은 것으로서 추가된 수직 전극의 영향이 매우 큼을 해석적으로 보여주는 것이다. 해석에 사용된 디자인 변수를 표 1에 나타내었다. 거울면이 회전할 때, 포스트에 지지되어 거울면에 연결되어 있는 스프링의 끝단에서는 회전각만큼의 비틀림 변형과 이에 의한 전단 응력(shear stress)이 발생하고, 그 값은 거울면이 90 도 회전했을 때 가장 크다. *Mises yield criterion* 에 의하면 스프링 내의 최대등가응력이 스프링 재질의 항복 강도(yield strength)보다 크면 스프링의 소성 변형이 발생하여 거울면의 원활한 복원이 이루어지지 않는다. 따라서 스프링은 90 도의 비틀림 변형에도 탄성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 단면이 직사각형인 빔 형태의 스프링이 그 끝단에서 토오크를 받을 때 최대 전단 응력은 다음으로 표시된다[4].

$$\tau = c\frac{Gt}{l}\theta_{\max}, \quad Y \le \frac{\tau}{\sqrt{3}} \qquad (7)$$

여기서, c 는 상수이고, τ 는 전단 응력을 나타낸다.

위의 식에 표 1에 주어진 값과 θ에 최대 회전각(90 도)을 대입하면 최대 전단 응력을 구할 수 있다.

2.1.4 제작 공정 및 제작 결과

그림 4 에 액츄에이터 제작을 위한 공정도를 나타내었다.

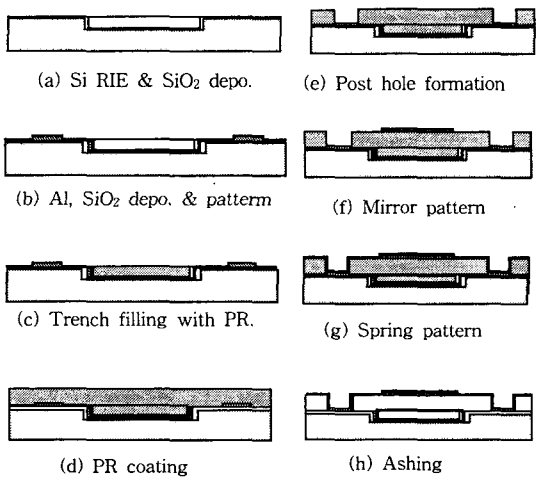


그림 4 액츄에이터의 제작 공정도
Fig. 4 Fabrication process

표 1 해석에 사용된 변수들의 값
Table 1 Values of design parameters

unit : μm

디자인 변수	d	l	w	t	W_a	W_b	W	L_a	L	g	Voltage(V)	G(N/m^2)	Y(MPa)
값	50	400	8	0.4	100	600	1000	15	45	15	50/55	26 x 10^9	170

거울면 구동부의 구동 공간 확보를 위하여 실리콘 건식식각 공정(ICP-RIE)을 이용하여 트렌치를 형성하였다. 이 때 트렌치의 깊이는 후속 공정의 어려움(트렌치 부의 평탄화 공정)을 피하기 위하여 작은 것이 좋지만 구동부가 트렌치 안에서 원활히 움직일 수 있도록 구동부의 길이보다는 크게 한다(50~55 μm). 구동 전극을 위한 알루미늄을 증착하고 포토 및 에칭공정으로 수직, 수평 및 차폐 전극을 형성하였다. 거울면과 수직 전극과의 절연을 위하여 SiO_2 를 증착하고 구동 전극과 포스트가 형성될 부분의 SiO_2 를 제거한 후, PR 을 사용하여 희생층을 도포하였다. 이 때 거울면의 90도 구동을 위하여 트렌치 부는 평탄해야 하는데 트렌치 부의 PR 프로파일은 평탄하지 않게 된다. 이를 해결하기 위하여 새로운 공정 프로세스(그림 5)를 적용하여 트렌치부의 평탄도를 향상시켰다(h" 은 수 천 Å 정도). 희생층 제거 후의 거울면의 휨에 따른 광 손실을 줄이기 위하여 거울면의 두께를 증가시켜 거울면의 변형을 최소화시키고 구동 전압을 낮추기 위해서는 스프링의 두께는 감소시켜야 한다. 이를 위하여 먼저 거울면을 위한 알루미늄을 증착(4.5 μm)하여 거울면을 형성하였고 그 위에 다시 알루미늄(0.4 μm)을 증착하여 스프링을 형성하였다[5]. 마지막으로 등방성 ashing 을 이용하여 희생층을 제거한 후 다시 PR 을 도포하여 희생층을 평탄화 시켰다.

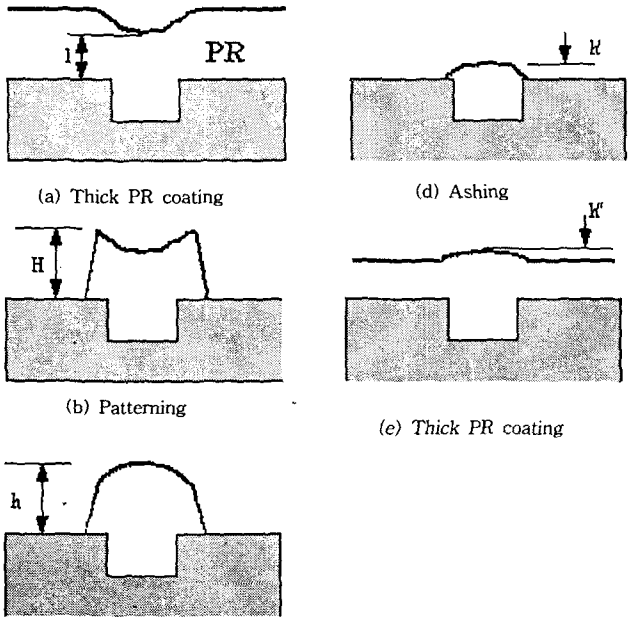


그림 5 평탄화 프로세스
Fig. 5 Planarization process

2.1.5 시험 및 측정

완성된 액츄에이터의 전자 현미경 사진을 그림 6 에 나타내었다.

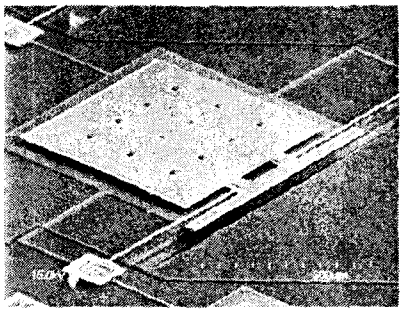


그림 6 제작된 액츄에이터의 SEM 사진
Fig. 6 SEM view of a fabricated actuator

그림에서 보는 것처럼 액츄에이터에서 거울면의 변형은 거의 발생되지 않았고 트렌치의 구동부가 편평하게 제작되었음을 알 수 있다. 제작된 액츄에이터에 전압을 인가하여 구동 테스트를 실시하였다. 인가 전압에 따른 거울면의 구동 각도는 측정하지 않았고 구동 전극이 수직 전극에 달라붙어 거울면이 수직으로 일어설 때의 전압을 측정하였다.

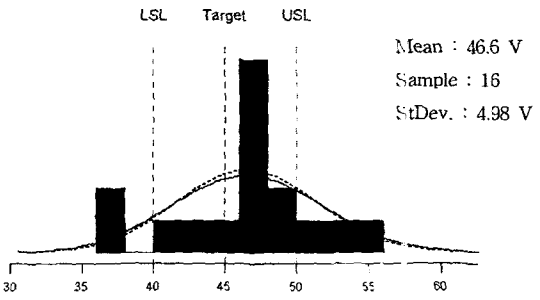


그림 7 구동 테스트 결과
Fig. 7 The result of driving test

그림 7 에 그 결과를 나타내었고, 횡 축은 구동 전압을, 종 축은 횟수를 의미한다. 측정 샘플의 개수는 16 개 이었고, 평균 구동 전압이 46 V, 표준 편차는 5 V 로 나타났다. 이는 해석치(55 V)보다 작은 것으로서 수직 전극에 의한, 구동부에 작용하는 토오크 계산(식 4)에서 스프링 중심부로

부터 구동부의 날개에 이르는 거리(La)까지의 토오크가 고려되지 않았고 전극 모서리 부분에서의 전기장 집중(concentration) 현상이 일어났기 때문으로 생각된다. 액츄에이터의 구동 특성을 파악하기 위하여 광학 측정 시스템을 이용하였으며, 90 도의 큰 비틀림 변형과 반복적인 구동(4 Hz)에 의한 기계적인 피로 및 점착(stiction) 현상은 실험실 분위기에서 700,000 사이클 구동 후에도 나타나지 않았다. 이로부터 제작된 비틀림 스프링이 탄성 영역 내에서 거동되고 있음을 유추할 수 있고, 소성 변형을 피하기 위한 스프링의 설계가 적절함을 확인할 수 있었다. 거울면의 rising 시간과 falling 시간은 각각 5 msec, 15 msec 로 측정되었다. 그림 8 에 구동된 후의 액츄에이터 모습을 나타내었다.

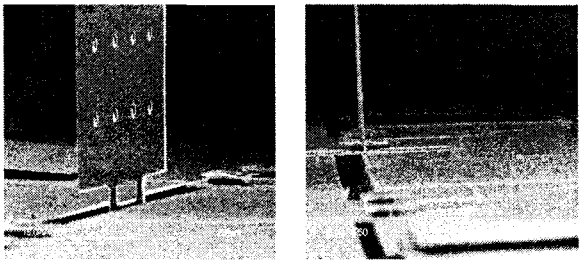


그림 8 구동 후의 액츄에이터 SEM 사진
Fig. 8 SEM views of a actuator after driving

3. 결 론

본 논문에서는 정전력으로 구동되는, 특히 저전압 구동을 위하여 상부, 수평 전극 외에 수직 전극을 구비한, 새로운 구조의 액츄에이터를 제안하고 이에 대한 설계, 구동 해석, 제작 및 구동 실험을 수행하였다. 구동 실험을 통하여 수직 전극을 구비한 트렌치 구조를 갖는 액츄에이터의 구동 전압이 기존의 정전인력 방식의 액츄에이터의 그것보다 50 % 이상 감소될 수 있음을 보여주었다. 평탄화를 위한 새로운 공정 프로세스를 이용하여 트렌치 구조에서의 PR 평탄화의 가능성을 제시하였다. 또한 수직 전극은 stopper 의 기능을 동시에 수행하여 구동의 안정성 및 재현성을 제공한다. 제안된 액츄에이터의 공정은 간단하며 특히 그것의 저전압 구조는 IC 와의 적합성이 좋고 구동 scheme 및 구동 회로 구성을 용이하게 한다.

참 고 문 헌

[1] Yongseop Yoon, Kideok Bae, and Hyung Choi, 2001 IEEE/LEOS Int. Conf. on Optical MEMS, 2001, pp.97-98

[2] H. Toshiyoshi, and H. Fujita., "Electrostatic Micro Torsion Mirrors for an Optical Switch," J. of MEMS., vol. 5, No. 4, Dec. 1996, pp. 231-237, 1996

[3] J. W. Judy, and R. S. Muller., "Magnetically actuated, addressable microstructure," J. of MEMS., Vol. 6, No. 3, pp. 249-256, 1997.

[4] S.H. Crandal, N.C. Dahl and T.J. Lardner, An Introduction to the mechanics of Solids, McGraw-Hill.

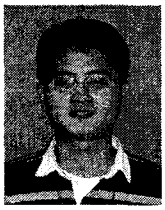
[5] J. Buhler, J. Funk, et al.,"Electrostatic Aluminum Micromirrors Using Double-Pass Metalization," J. of MEMS., Vol. 6, No. 2, pp. 126-135, 1997.

저 자 소 개

윤 용 섭 (尹 容 燮)

1967년 7월 15일생. 1990년 서울대 기계설계학과 학사. 1992년 포항공과대학원 기계공학과 석사. 1992년~ 2001년 삼성전자 중앙연구소 책임연구원. 2001년~현재 삼성 종합기술원 MEMS Lab. 전문 연구원. 주 관심 분야는 마이크로 구조물 설계, 제작

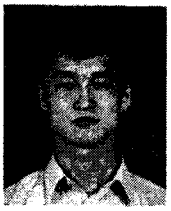
E-mail : yongsim@samsung.com



배 기 덕 (裵 紀 德)

1972년 6월 3일생. 1988년 고려대 기계공학과 졸업. 1988년~2000년 대우전자 2000년~현재 삼성 종합기술원 연구원, 주 관심분야는 실리콘 마이크로 머시닝

E-mail : kdbae@samsung.com



최 형 (崔 瀅)

1961년 10월 24일생. 1984년 연세대 물리학과 학사 1991년 동 대학원 물리학과 박사. 1991년~2001년 삼성전자 중앙연구소 수석 연구원. 2001년~현재 삼성종합기술원 MEMS Lab. micromachining technology group leader. 주관심 분야는 마이크로 구조물 제작 및 평가

E-mail : hchoi@samsung.com

고 병 천 (高 秉 天)

1953년 5월 10일생. 1975년 서울대 기계공학과 학사 1981년 동 대학원 기계설계학과 석사. 1988년 University of Michigan 박사(응용역학) 1995년~2001 년 삼성전자 중앙연구소 광메카 Lab.장연구위원, 2001년~현재 삼성종합기술원 MEMS Lab.장 연구위원

E-mail : bckoh@samsung.com