

論文2001-38SD-9-1

삼각 팁을 이용한 저전압 구동형 정전방식 마이크로액추에이터 (Electrostatic Microactuators operated at low drive voltages Using Triangular Tip)

金 奉 煥 * , 成 又 慶 * , 全 國 鎭 *

(Bong Hwan Kim, Woo Kyeong Seong, and Kuk Jin Chun)

요 약

본 연구에서는 저전압 구동형 정전방식을 이용하여 마이크로 이하 간격(sub-micron gap)을 갖는 마이크로액추에이터를 제작하였다. 사각 팁과 삼각 팁의 두 가지 방식으로 마이크로액추에이터를 제작하여 비교하였다. 삼각 팁으로 제작된 마이크로액추에이터의 gap은 $0.55\mu\text{m}$ ~ $1.35\mu\text{m}$ 이었다. $0.55\mu\text{m}$ gap을 갖는 제작된 마이크로액추에이터의 경우에 13V의 낮은 전압에서 $1\mu\text{m}$ 의 변위와 $2.3\mu\text{N}$ 의 발생력을 나타내었다. 이 마이크로액추에이터의 1차 공진주파수의 측정값의 23kHz이었다.

Abstract

Electrostatic comb-drive microactuators with sub-micron gap were fabricated and tested. We designed and fabricated two type of electrodes which are rectangular and triangular tip. The fabricated microactuators with triangular tip resulted in the electrode gaps in the range of $0.55\mu\text{m}$ ~ $1.35\mu\text{m}$. Displacement of $1\mu\text{m}$ and electrostatic force of $2.3\mu\text{N}$ were observed in a triangular-tip microactuator with $0.55\mu\text{m}$ gap when a DC drive voltage of 13 volts was applied. Measured 1st resonance frequency of microactuators was about 23 kHz..

1. 서 론

현재 매우 정밀하고 고속으로 위치를 제어할 수 있는 마이크로액추에이터의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 마이크로액추에이터는 반도체 공정기술을 이용하여 제작되는 초소형 정밀기계, 정밀 sensor 등과 같은 MEMS(Microelectromechanical Systems)의 핵심 요소 중에 하나이다. 특히, 마이크로액추에이터는 기록 밀도가 매우 높은 super compact HDD(Hard disk drive)에서 magnetic head의 tracking을 위한 micropositioner로의 응용 전망이 매우 밝다^[1,2,3].

마이크로액추에이터는 구동방식에 따라서 분류하면

정전형, 전자기형, 압전형, 형상기억합금형, 열공압형, 열팽창형 등 그 종류가 다양하다. 이 중에서 정전형과 전자기형이 활발히 연구되어 왔으며, MEMS의 구동소자로서 개발되고 있다. 이 두 가지 방식을 비교하면, 정전방식은 제작이 용이하지만 발생력이 작다는 단점이 있고 전자기형은 발생력이 크지만 상대적으로 제작공정이 복잡하다는 단점이 있다. 또한, 전자기형은 코일에 전류를 흘려 유도자기장을 발생시켜 구동하는 전류구동방식으로 MEMS와 같이 매우 작은 면적에 집적화시키면 Joule heating에 의한 발열로 device가 파괴되는 문제점이 발생한다. 반면에, 정전형은 정전용량 변화로 구동하는 전압구동형이므로 발열 문제가 없다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 가지고 있는 정전형 마이크로액추에이터를 MEMS에 응용하기 위해서는 발생력이 작은 단점을 극복해야 한다. 즉, 낮은 전압에서 높은 발생력을 제공하는 저전압 구동형 정전방식 마이크로

* 正會員, 서울大學校 電氣컴퓨터工學部

(School of Electrical Engineering & Computer Science)

接受日字:2000年7月19日, 수정완료일:2001年7月18日

로액추에이터의 개발이 요구된다^[4,5]. 저전압 구동형 정전방식 마이크로액추에이터 개발을 위해서, 현재 comb-drive 방식에 있어서 polysilicon electrode 사이의 gap을 줄이는 방법^[6,7]과 electrode의 aspect ratio를 크게하여 두께를 증가시키는 방법^[8,9]의 두 가지가 주로 연구되고 있다. 이 중에서 Furuhashi^[7] 등은 gap을 sub-micron으로 작게 하는 방법으로 oxidation machining 기술을 제시하였다. 그렇지만, 이 방법은 일반적인 comb-drive 제작공정에 새로운 oxidation 공정이 추가되어야 하며, 또한 초기에 높은 전압으로 mover electrode를 stator electrode에 의해 형성된 sub-micron gap으로 이동시키는 복잡한 initial positioning과 fixing의 정렬과정이 필요하다는 단점이 있다. 본 논문은 oxidation machining과 같은 추가 공정과 정렬과정이 필요 없이, sub-micron gap을 형성하여, 구동전압을 낮은 정전방식 마이크로액추에이터의 제작과 구동 특성을 다루고 있다.

2. 마이크로액추에이터의 설계

2.1 정전방식 마이크로액추에이터의 발생력

일반적인 comb-drive는 mover의 이동방향에 수직방향으로 형성된 comb-drive gap(g)에서의 정전용량 변화에 의해서 이동방향으로 정전기력이 발생한다. Comb-drive에서의 발생력은 electrode의 개수에 비례하므로 발생력을 크게 하기 위해서는 단위면적당 electrode의 개수를 많게 해야한다. 단위면적당 electrode의 개수를 많게 하기 위해서는 electrode의 길이를 짧게 하고 mover와 stator를 가깝게 해야한다. 이러한 이유에서 mover와 stator의 거리를 가깝게 하면, mover 이동방향과 수평방향으로 안쪽과 바깥쪽에 형성된 transverse gap(g1, g2) 각각에 의해서 부가적인 정전력이 발생된다(Fig. 1 참조). 이러한 발생력을 정리하여 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = F(x) + F(t) = nn_b \epsilon_o V^2 \frac{t}{g} + \frac{1}{2} n_b \epsilon_o V^2 t \left[\frac{2nl_f}{(g_1 - d)^2} - \frac{l_b}{(g_2 + d)^2} \right]$$

이 식에서 알 수 있듯이, 단위면적당 electrode의 개수

를 많게 한 정전방식 마이크로액추에이터의 발생력은 comb-drive gap에 의한 comb-drive force, F(x)와 transverse gap에 의한 transverse force, F(t)로 구성된다. 또한, 같은 전압 조건에서 발생력을 크게 하기 위해서는 두께(t)를 크게 하거나, gap(g)를 작게 해야 한다.

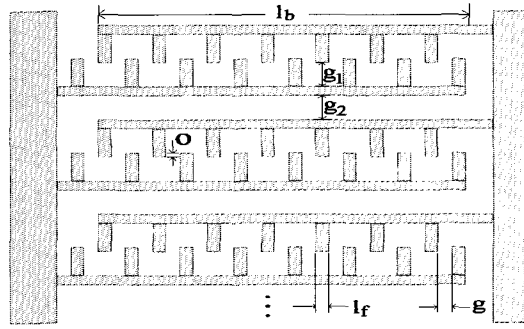


그림 1. Comb-drive의 전극 어레이 구조
Fig. 1. Electrode array structure of comb-drive.

2.2 Triangular electrode tip

정전방식 마이크로액추에이터에서 gap의 크기는 작을수록 발생력이 커지지만, 그 gap의 크기는 제작공정에 의해서 결정된다. 일반적으로 반도체 공정인 UV lithography를 사용하여 제작하는 경우에, 두께가 3 μm 정도이면 최소 gap 크기는 2 μm로 알려져 있다. 따라서, Fig. 1의 electrode 구조에서 gap(g)를 2 μm 보다 더 작게 하려면 overlap(O)를 없애고 오히려 mover의 electrode 끝과 stator의 electrode 끝과의 사이에 2 μm 정도 거리를 두어야한다(Fig. 2 (b)). 그렇지만, 이런 경우 발생력이 크게 감소하게 된다. 이러한 문제점을 해

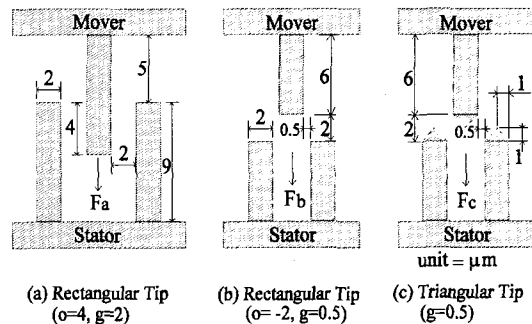


그림 2. 사각과 삼각 팁의 전극 구조
Fig. 2. Electrode shapes of rectangular and triangular tip.

결하기 위해서 Fig. 2 (c)에서와 같은 triangular electrode tip을 적용하였다.

Fig. 2에서와 같이 overlap이 되어 있고($O=4 \mu\text{m}$) gap이 $4 \mu\text{m}$ 인 일반적인 rectangular tip (a)와, overlap이 되어 있지 않고($O=-2 \mu\text{m}$) gap이 $0.5 \mu\text{m}$ 인 rectangular tip (b), gap이 $0.5 \mu\text{m}$ 인 triangular tip (c), 각각의 경우에 대해서 발생력의 변화를 알아보기 위해서 FEM (finite element method) 전자기장 해석을 이용하여 simulation하였고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 전자기장해석을 위해서 Flux2D 소프트웨어를 사용하였고, 이 때 사용된 simulation 조건으로 mover와 stator의 전압차 V 는 12 V이고, electrode의 두께, t 는 $3 \mu\text{m}$ 이다.

표 1. 여러 전극형태의 정전력

Table 1. Electrostatic forces of several electrode shapes.

	Electrostatic Force (F)	Ratio (F/Fa)
Rectangular Tip with overlap	$F_a = 2.4 \text{ nN}$	1.0
Rectangular Tip without overlap	$F_b = 1.7 \text{ nN}$	0.71
Triangular Tip	$F_c = 2.7 \text{ nN}$	1.1

Table 1에서 보면, overlap을 없애고($O=-2 \mu\text{m}$) 대신에 gap을 작게 하면($g=0.5 \mu\text{m}$) 발생력이 약 30% 정도 감소한다. 참고로 실제 overlap을 없애면서 gap($g=2 \mu\text{m}$)을 줄이지 않은 경우에는 50% 정도 발생력이 감소한다. 이로부터 gap이 sub-micron으로 하더라도 overlap이 없으면 발생력이 증가하지 않고 오히려 감소함을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 electrode tip의 형상을 triangular shape으로 하였고, 그 결과 초기 발생력이 10% 정도 증가하였다. 그렇지만, mover가 움직여서 stator에 가까워지면 overlap이 발생하게 되므로 기존 rectangular tip에 비해서 발생력이 매우 커지게 되며, 이에 대한 상세한 내용을 2.2절의 시뮬레이션 결과에서 언급하였다.

3. 마이크로액추에이터의 제작

마이크로액추에이터의 제작을 위해서 주로 MEMS 기술의 하나인 surface micromachining 기술을 사용하

였다. 마이크로액추에이터의 제작에 사용된 포토 마스크의 수는 Poly0, PSG, Poly1로 3장이다. 우선 실리콘 웨이퍼의 surface passivation을 위해서 wet oxidation 공정으로 3,000 Å의 silicon oxide를 형성한 후, LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 공정을 이용하여 1,500 Å 두께의 silicon nitride를 증착하였다. 그 다음에 ground electrode를 형성하기 위해서 Poly0 마스크를 사용하였다. 이 ground electrode는 마이크로액추에이터의 mover 밑에 형성되며, mover와 같은 신호 전압이 걸리도록 하여, electrode 방향이 아닌 아래쪽에서의 정전기력이 발생되지 않도록 한다. LPCVD 공정으로 doped polysilicon을 3000 Å 증착한 후, Poly0 마스크로 lithography하고 RIE(Reactive Ion

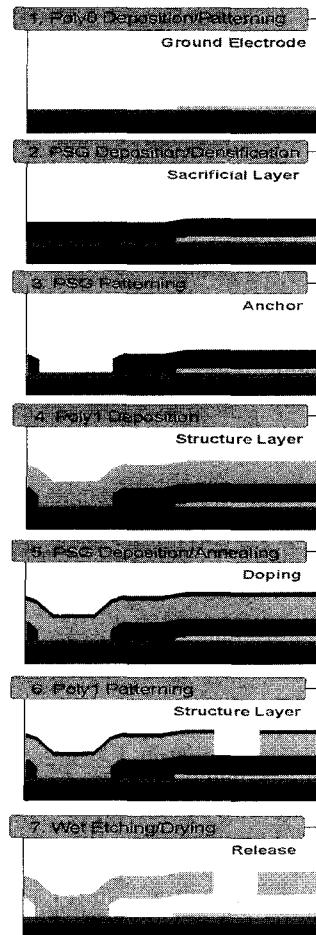


그림 3. 다결정실리콘 마이크로 액추에이터의 공정 순서도

Fig. 3. Fabrication process of polysilicon microactuator.

Etching) 공정으로 건식식각하여 patterning한다. 희생층은 PSG(phosphorous silicate glass)를 LPCVD로 증착한 후, 950°C에서 60분 동안 annealing하여 densification 공정을 수행하였다. PSG의 두께는 densification 후 2 μm 를 목표로 하였다. 증착된 PSG 층을 PSG 마스크로 lithography 한 후에 RIE로 patterning하여 마이크로 구조물의 지지부 역할을 하는 anchor를 형성하였다.

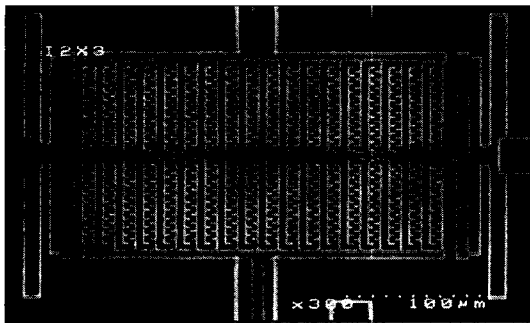


그림 4. 제작된 마이크로액추에이터의 SEM 사진
Fig. 4. SEM Photograph of fabricated microactuator.

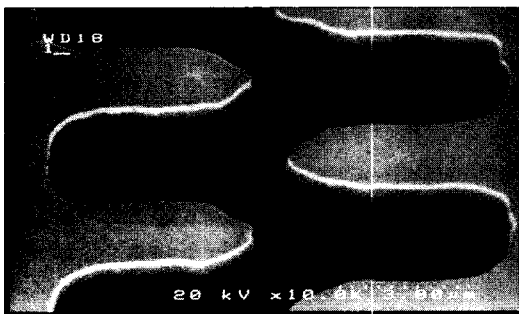


그림 5. 삼각 팁을 가진 전극의 SEM 사진
Fig. 5. SEM Photograph of electrode with triangular tip.

마지막으로, 구조층은 LPCVD로 undoped polysilicon을 3 μm 증착하였고, 그 위에 phosphorus doping과 etching mask용으로 PSG를 5000 Å 증착하였다. 그 후 질소 분위기에서 1000°C, 60분 annealing하여 phosphorus를 구조층 polysilicon에 doping하였다. Poly1 마스크로 lithography하고, PSG 5000 Å를 RIE로 식각하여 구조층 poly의 etching mask를 제작하였다. 이 oxide etching mask를 사용하여 구조층 poly를

patterning하여 마이크로액추에이터의 mover, stator, flexure 등의 마이크로 구조물을 제작하였다. 마이크로 구조물이 제작된 wafer를 dicing한 후에, CO₂ supercritical drying 법을 사용하여 희생층을 제거하는 release 공정을 수행하였다. 앞에서 언급한 마이크로액추에이터의 제작 공정을 순서대로 정리하면 Fig. 3과 같다. Fig. 4는 제작된 마이크로액추에이터의 주사전자 현미경(SEM) 사진을 보여주며 Fig. 5는 triangular tip을 갖는 electrode를 보여주고 있다. Fig. 5의 제작된 마이크로액추에이터에서 알 수 있듯이 gap이 0.55 μm 이며, triangular tip을 이용하여 성공적으로 sub-micron gap을 갖는 마이크로액추에이터를 제작할 수 있었다.

4. 특성평가 및 결과

제작된 정전방식 마이크로액추에이터의 전기, 기계적 특성을 laser vibrometer(Polytec OFV 3001/512)와 dynamic signal analyzer(HP 35670A)로 구성된 특성평가 장치를 이용하여 측정하였다. 측정결과 제작된 마이크로액추에이터의 1차 공진주파수는 23 kHz이었다.

4.1 전압-변위-발생력 특성

마이크로액추에이터의 발생력은 먼저 변위를 측정하고, 그 다음 이 발생된 변위에 flexure의 spring constant를 곱함으로써 spring force를 계산하였고, 이 spring force와 정전기력에 의한 발생력이 항상 평형을 이루므로, 이 spring force를 마이크로액추에이터의 발생력으로 하였다. 사용된 spring constant는 제작된 마이크로액추에이터의 flexure를 실측한 후에 FEM 구조 해석(Ansys 5.3)으로 계산하였다. 이러한 방식으로 계산된 flexure의 spring constant는 2.31N/m이다. Fig. 6은 전압에 따라서 측정된 마이크로액추에이터의 변위를 나타내었고, spring constant로부터 계산된 발생력도 함께 나타내었다. Fig. 6에서 보면, triangular tip을 갖는 마이크로액추에이터가 rectangular tip을 갖는 것보다 같은 전압에서 더 큰 발생력을 나타냄을 알 수 있으며, 또한 전압이 높아져서 변위가 커질수록 triangular tip과 rectangular tip 사이의 발생력의 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다. 이것으로부터 overlap이 없더라도 sub-micron gap을 형성함으로써 발생력을 크게 하는 효과를 낼 수 있으며, 인가해준 전압이 커서

mover가 stator에 가까워질수록 발생력의 증가효과가 커짐을 확인할 수 있었다. Overlap이 $-2.35 \mu\text{m}$ 이며 gap이 $0.55 \mu\text{m}$ 인 경우의 triangular tip 마이크로액추에이터의 경우, 13 V의 저전압에서 $1 \mu\text{m}$ 의 변위를 구현하였으며, 이 때의 발생력은 $2.3 \mu\text{N}$ 이었다.

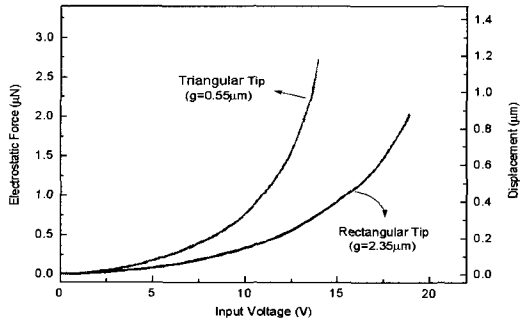


그림 6. 사각과 삼각 팁 사이의 정전력 비교
Fig. 6. Electrostatic force comparison between rectangular and triangular tip.

4.2 gap에 따른 발생력의 변화

Fig. 7은 triangular tip을 갖는 마이크로액추에이터에 있어서, 전압-발생력 곡선을 여러 가지 gap에 대하여 보여주고 있다. 이 그래프로부터, gap이 작을수록 발생력이 커지고, 따라서 같은 전압에서 발생하는 변위가 커짐을 알 수 있다. 전압 12 V에서의 gap에 따른 발생력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8로부터 제작된 triangular tip 마이크로액추에이터의 발생력이 gap에

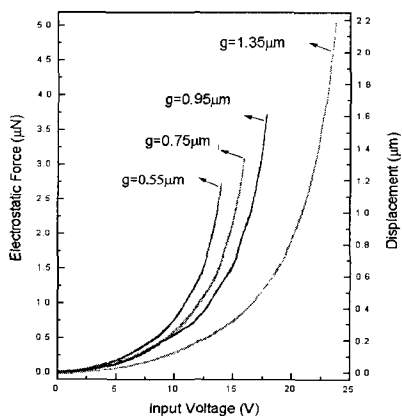


그림 7. 삼각 팁을 가진 마이크로액추에이터의 정전력 곡선
Fig. 7. Electrostatic force curves of microactuator having triangular tip.

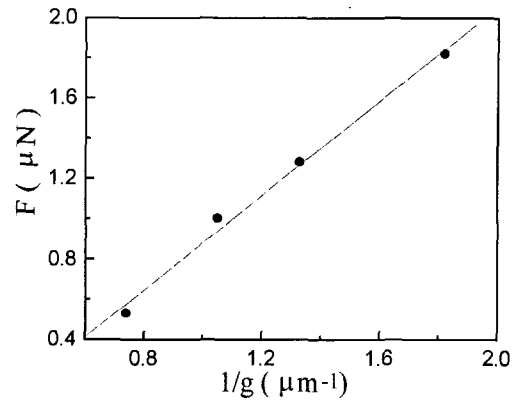


그림 8. Gap에 의한 정전력
Fig. 8. Electrostatic force versus gap.

반비례함을 확인하였고, 2.1절에서 서술한 발생력식을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 저전압 구동형 정전방식 마이크로액추에이터로 triangular tip을 갖는 electrode 구조를 설계하여, sub-micron gap을 갖는 마이크로액추에이터를 제작하였다. 제작된 마이크로액추에이터의 gap은 $0.55 \mu\text{m} \sim 1.35 \mu\text{m}$ 이었다. $0.55 \mu\text{m}$ gap을 갖는 제작된 마이크로액추에이터의 경우에 laser vibrometer로 측정된 결과, 13V의 낮은 전압에서 $1 \mu\text{m}$ 의 변위와 $2.3 \mu\text{N}$ 의 발생력을 나타내었다. 이 마이크로액추에이터의 1차 공진 주파수의 측정값은 23 kHz이었다. 또한, triangular tip을 갖는 마이크로액추에이터의 발생력이 gap에 반비례함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Long-Shen Fan, Hal H. Ottesen, Timothy C. Reiley and Roger W. Wood, "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-based, Two-stage Servo System," IEEE Transactions in Industrial Electronics, Vol.42, No.3, pp. 222~233, 1995
[2] Takahiro Imamura, Takao Koshikawa and Masaki Katayama, "Transverse Mode Electro-

- static Microactuator for MEMS-based HDD Slider," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 216~221, 1996.
- [3] S. Nakamura, K. Suzuki, M. Ataka and H. Fujita, "An Electrostatic Micro Actuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drives," Transducers'97(1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators), pp. 1081~1084, 1997.
- [4] 김봉환, 전국진, 성우경, 이효정, "SOI를 이용한 하드 디스크 드라이브용 정전형 트랙 추적 마이크로 액추에이터의 제작" 대한전자공학회지, Vol 37-SD, No 8, pp571~578, August, 2000.
- [5] Bong-Hwan Kim and Kukjin Chun, "Fabrication of an electrostatic track-following micro actuator for hard disk drives using SOI wafer" Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 11, No. 1, January 2001, pp1-6.
- [6] T. Hirano, T. Furuhashi, K.J. Gabriel and H. Fujita, "Operation of Sub-Micron Gap Electrostatic Comb-Drive Actuators," Transducers'91(1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators), pp. 873~876, 1991.
- [7] T. Furuhashi, T. Hirano, K.K. Gabriel and H. Fujita, "Sub-Micron Gaps Without Sub-Micron Etching," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 57~62, 1991.
- [8] E.H. Klaassen, K. Petersen, J.M. Noworolski, J. Logan, N.I. Maluf, J. Brown, C. Stormont, W. McCulley, and G. Kovacs, "Silicon Fusion Bonding and Deep Reactive Ion Etching; A New Technology for Microstructures," Transducers '95(1995 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators), pp. 556~559, 1995.
- [9] W.H. Juan and S.W. Pang, "A Novel Etch-Diffusion Process for Fabricating High Aspect Ratio Si Microstructures," Transducers'95(1995 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators), pp. 560~563, 1995.

저 자 소 개



金 奉 煥(正會員)

1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 공학사. 1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 공학석사. 1999년 3월~현재 : 서울대학교 전기공학부 박사과정. <관심분야> Anti-

stiction, Hard Disk Drive용 second actuator, Silicon direct bonding, MEMS sensor



全 國 鎭(正會員)

1977년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사. 1981년 8월 : University of Michigan 공학석사. 1986년 5월 : University of Michigan 공학박사. 1986~1989년 : 워싱턴 주립대 조교수. 1989~1994년 : 서울대학교 전자공학과 조교수. 1994년~현재 : 서울대학교 전기공학부 부교수, 교수. 1997년~현재 : 서울대학교 마이크로시스템기술센터장. (사) 한국

센서학회 이사. 공업기반기술사업 기획평가단 위원. Journal of Micromechanics and Microengineering Associate Editor. 2000년~현재 : 서울대학교 차세대 무선통신용 트랜시브시스템 개발사업단장. <관심분야> Sensor, E-beam lithography, RFMEMS, BioMEMS



成 又 慶(正會員)

1990년 2월 : 서울대학교 무기재료공학과 학사. 1992년 2월 : 서울대학교 무기재료공학과 석사. 1992~1995년 : 대우전자 중앙연구소 주임연구원. 1995~1999년 : 고등기술연구원 전자재료연구실 선임연구원. 1998~2001년 : 아주대학교 분자과학기술학과 박사. 2001~현재 : 서울대학교 차세대 무선통신용 트랜시브시스템 개발사업단 Post Doctor. <관심분야> Hard disk drive, Microactuator

센서학회 이사. 공업기반기술사업 기획평가단 위원. Journal of Micromechanics and Microengineering Associate Editor. 2000년~현재 : 서울대학교 차세대 무선통신용 트랜시브시스템 개발사업단장. <관심분야> Sensor, E-beam lithography, RFMEMS, BioMEMS