

비등간격 수평감지 전극구조의 정전용량형 다결정 실리콘 가속도계

論 文
50C-7-6

A Polysilicon Capacitive Microaccelerometer with Unevenly Distributed Comb Electrodes

韓基鎬* · 曹永昊**
(Ki-Ho Han · Young-Ho Cho)

Abstract - We present a surface-micromachined polysilicon capacitive accelerometer using unevenly distributed comb electrodes. The unique features of the accelerometer include a perforated proof-mass and the inner and outer comb electrodes with uneven electrode gaps. The perforated proof-mass reduces stiction between the structure and the substrate and the unevenly distributed electrodes shorten the electrode length required for a given sensitivity. The polysilicon accelerometer has been fabricated by the conventional 6-mask surface-micromachining process and shows a sensitivity of 1.03mV/g with a hybrid detection circuitry.

Key Words : Microaccelerometer, Unevenly Distributed Electrode, Capacitive Detection, Perforated Proof-Mass

1. 서 론

최근 자동차의 안전성에 관한 소비자의 관심이 크게 증가함과 동시에 자동차 안전성에 관한 법적 규제가 명문화됨에 따라 에어백 시스템의 장착이 필요하게 되었고, 점차 기본 사양으로 되어가고 있다. 자동차에 장착될 에어백 가속도계는 일반계측용 센서와는 달리, 자동차라는 특수한 환경 내에서 작동의 신뢰성을 유지할 수 있어야 하고 또한 승객의 안정성과 직접적인 관계가 있으므로, 정확하고 빠른 고신뢰성 가속도계의 개발이 필수적이다.

이러한 관점에서 볼 때, 근래 전자제품의 기술혁신을 이룩한 집적회로 제작기술을 기반으로 하여 물리량 감지를 위한 미세구조물과 감지신호의 보정, 증폭, 처리를 위한 전자회로를 결합한 반도체 가속도센서는 기존의 기계전자식 충격센서 [1]에 비해 소형화, 다기능화, 고성능화와 함께 제작경비의 저렴화를 동시에 이룰 수 있어 자동차 전장용 센서 [2]로 크게 유리하다.

본 연구에서는 표면미세가공기술을 이용한 자동차 에어백용 정전용량형 가속도계의 새로운 구조를 제안하였으며, 이를 해석, 설계, 제작하였고, 제작품의 성능을 측정, 분석하였다.

2. 구조 설계 및 제작

2.1 가속도계 구조의 설계 및 특징

제안된 가속도계의 기본구조는 그림 1에 도시한 바와 같이

감지전극인 이동전극과 고정전극이 비등간격 빗살 구조로 이루어져 있어, 가속도계의 질량체와 연결된 이동전극이 외부 가속도에 의해 움직일 경우 전극 간격이 가까운 쪽이 먼 쪽보다 질량체 변위에 의한 정전용량의 변화가 크게 나타난다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 본 가속도계는 감지전극이 질량체 양쪽으로 서로 대칭적으로 구성되어 있고, z 방향으로 외부 가속도가 인가되면 질량체의 변위가 발생하고 이때 질량체 바깥쪽 감지전극의 정전용량, C_1 ,과 안쪽 감지전극의 정전용량, C_2 ,이 차동으로 변화한다. 또한 본 가속도계의 질량체는 기존에 질량체의 주축이 하나인 구조를 가진 비등간격 감지구조 [3]와는 달리 주축이 두개인 구조이므로 대칭적인 force-balance가 가능하여 force-balance 시 질량체가 뒤틀리지 않는 구조적 장점이 있다.

한편 이 가속도계의 다공평판형 질량체 구조는 정전용량 변화 감지를 위한 고정전극 및 이동전극의 길이가 기존의 가속도계 [4]보다 상대적으로 짧아 제작공정 시 점착(stiction) 현상이 감소하고, 이로 인해 수율 증가를 꾀할 수 있다. 또한 본 가속도계는 기존의 표면미세가공기술에 의한 정전용량 가속도계 [4,5]의 경우와는 달리 전극 연결 구조가 위·아래로 교차할 필요가 없어 차후 단일 박막가공으로 가속도계를 제작할 수 있는 구조적 장점이 있다.

2.2 감지 전극의 해석 및 설계

그림 1과 같은 가속도계에서 이동전극과 고정전극 사이의 정전용량은 각각 다음과 같다.

$$C_1 = n \epsilon_0 A \left(\frac{1}{d_1 + \Delta d} + \frac{1}{d_2 - \Delta d} \right) \quad (1a)$$

$$C_2 = n \epsilon_0 A \left(\frac{1}{d_1 - \Delta d} + \frac{1}{d_2 + \Delta d} \right) \quad (1b)$$

* 正 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000 年 10 月 4 日

最 終 完 了 : 2001 年 6 月 14 日

여기서, n 은 C_1 과 C_2 각각의 고정전극과 이동전극이 마주하는 개수이고, d_1 과 d_2 는 각각 그림 1에서 표시한 바와 같이 전극 사이의 먼 간격과 가까운 간격을 나타낸다. Δd 는 외부 가속도에 의한 질량체 변위, ϵ_0 는 감지전극 사이에 존재하는 공기의 유전율, A 는 단위 감지전극 당 마주하는 면적을 의미한다. ΔC 에 의해 발생하는 차동 정전용량, ΔC ,은 C_1 과 C_2 의 차이이며, 식(1)로부터 $d_1 \gg \Delta d$ 와 $d_2 \gg \Delta d$ 를 가정하면 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta C = 2n\epsilon_0 A \left(\frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right) \Delta d \quad (2)$$

또한, 그림 1의 가속도계 구조로부터 전극부의 길이는 다음과 같다.

$$\frac{n}{2}(d_1 + d_2 + 2w_e) = L_E \quad (3)$$

여기서, w_e 는 감지전극의 폭이며, L_E 은 전극부의 길이를 의미하는 상수이다.

차동 정전용량에 관한 식(2)와 주어진 전극부의 길이에 관한 식(3)으로부터 차동 정전용량 변화가 가장 큰 $d_1:d_2$ 의 최적비를 계산할 수 있다. d_1 과 d_2 의 비를 k 라하고, $k=d_2/d_1$, d_1 을 제작공정에 의해 결정되는 상수라고 하면, k 의 변화에 대한 차동 정전용량 변화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\delta(\Delta C)}{\delta k} = -4\epsilon_0 A (L_E - 2nw_e) \frac{\Delta d}{d_1^3} \frac{k^2 - 2k}{k^3} \quad (4)$$

식(4)로부터 $k=2$ 일 때 $\delta(\Delta C)/\delta k$ 는 0이 됨을 알 수 있고, 이는 즉 $d_1:d_2$ 가 1:2일 때 제한된 전극부 길이에 대한 차동 정전용량이 최대가 됨을 의미한다. 이를 이용하여 가속도계를 설계하였으며, 이에 사용된 설계 사양들을 표 1에 정리하였다. 또한 설계된 가속도계의 설계결과와 예측성능을 표 2에 표기하였다.

2.3 제조 공정

그림 2는 표면미세가공기술을 이용한 다결정 실리콘 가속도계의 제작 과정을 나타낸 것이다. 가속도계를 제작하기 위해 N-type (100) 실리콘 웨이퍼 위에 1 μ m 두께의 산화막을 성장시키고, 그 위에 식각 방지층으로 사용될 Si_3N_4 (2000 Å)

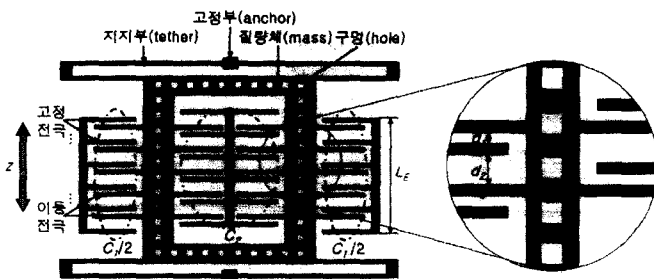


그림 1 가속도 센서의 평면도
Fig. 1 Top view of the accelerometer structure

표 1 가속도계 사양

Table 1 Accelerometer specification

Detection range	± 50 g
Normal deflection due to gravity	< 0.01 %
Maximum displacement deviation at 400Hz	< 0.05 %
Sensitivity	> 0.5 fF/g

표 2 가속도계 설계 및 예상성능

Table 2 Accelerometer design and estimated performance

Mass	0.736 μ g
Stiffness	1.012 N/m
Natural frequency	5.9 kHz
Number of electrodes	60 ea
Sensitivity	0.483 fF/g
Nonlinearity	3.174 %

를 증착시킨다. 구조물의 배선으로 사용될 다결정 실리콘 (2000 Å)을 증착시킨 후, 이 다결정 실리콘의 전도성을 높이기 위해 인(phosphorus)을 확산(그림 2(a))한다. 배선을 형성하기 위해 다결정 실리콘을 건식 식각하고, 그 위에 희생층으로 사용될 2 μ m 두께의 PSG (Phospho Silicate Glass)를 증착한다. 이 PSG에 구조물을 지지할 고정부(anchor)를 형성하고

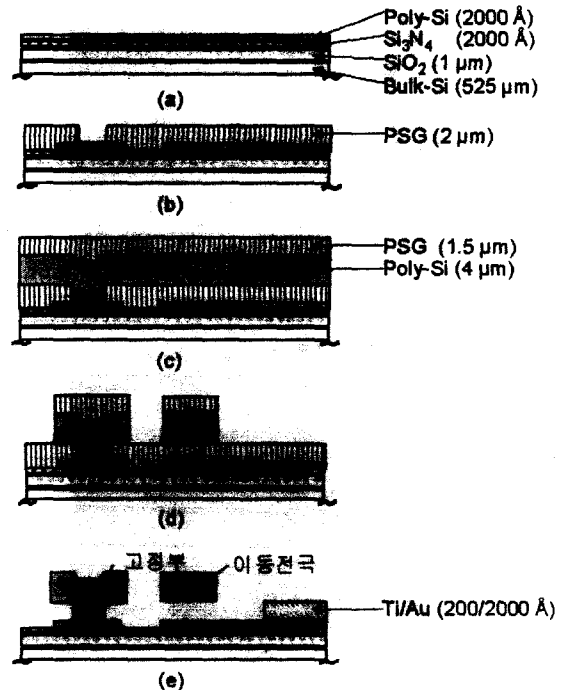


그림 2 제작공정
Fig. 2 Microfabrication process

(그림 2(b)), 그 위에 구조물을 형성할 다결정 실리콘 4 μ m를 증착한다. 다시 이 위에 PSG 1.5 μ m를 증착하고(그림 2(c)), 구조물을 형성할 다결정 실리콘의 잔류응력의 대칭성과 전도성을 위해 1000 $^{\circ}$ C에서 2시간 열처리를 거친 다음, 구조물을 형성하기 위하여 PSG와 다결정 실리콘을 건식 식각한다.(그림 2(d)) 이후 희생층(PSG)을 제거하고, wire bonding을 위한 금속 pad을 형성하기 위해 lift-off 공정을 이용하여 Ti/Au을 가속도계의 pad 위에 형성(그림 2(e))한다.

본 가속도계의 질량체의 구조는 주축이 두개이므로 하나의 주축을 가진 가속도계에 비해 감지전극의 길이가 짧아 제조 공정 중 감지전극과 기판 사이의 점착 현상이 발생할 확률이 작으며, 제작된 가속도계 200개중 약 190개의 완전한 구조를 얻을 수 있었다.

그림 3은 제작된 가속도계의 SEM 사진이며, (a)는 가속도계 전체구조의 SEM 사진이고, (b)는 전극의 부분 확대 SEM 사진이다. 또한 가속도계의 성능을 예측하고 분석하기 위해서는 가속도계의 구조재료인 다결정 실리콘의 탄성계수와 잔류응력에 관한 실험치가 필요하다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 구조물을 형성하는 다결정 실리콘의 탄성계수와 잔류응력을 측정하기 위한 시험 구조물들로서 가속도계와 함께 제작되었다.

3. 감지회로의 설계 및 제작

가속도계의 감지회로는 PAM (Pulse Amplitude Modulation) 방식으로 설계하였으며 잡음의 영향을 줄이기 위해 chopping 방법[4]을 사용하였다. 이러한 감지회로의 기

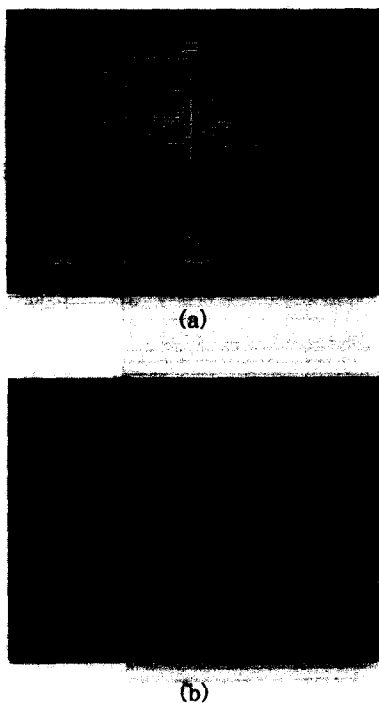


그림 3 제작된 가속도계: (a) 전체 구조물; (b) 확대된 전극
Fig. 3 Microfabricated accelerometer: (a) overall structure; (b) enlarged electrodes

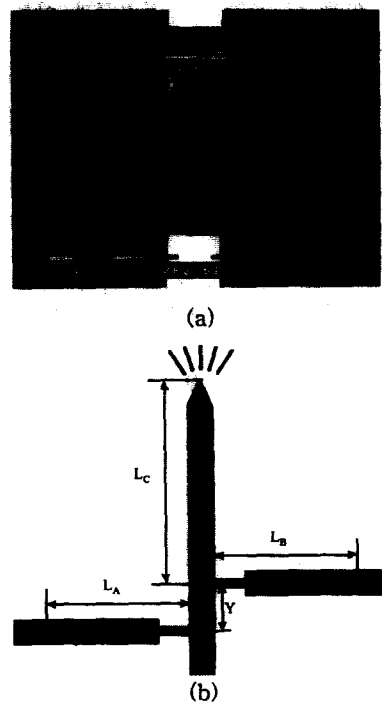


그림 4 다결정 실리콘의 특성 시험을 위한 on-chip 시험 구조물: (a) 탄성계수 측정 구조물; (b) 잔류응력 측정 구조물

Fig. 4 On-chip test structures for polysilicon property characterization: (a) Young's modulus test structure; (b) residual stress test structure

본 구성도는 그림 5와 같다. 그림 5에 표시한 바와 같이 신호발생기로부터 180 $^{\circ}$ 위상차를 가지는 두 반송파가 가속도 센서의 고정전극 양단에 인가된다. 이때 외부 가속도에 의해 가속도 센서의 이동전극이 이동하게 되고, 이 움직임에 의해 이동전극에 미세한 전하가 유기된다. 유기된 미세전하는 그림 5의 전치 증폭기를 통해 전압으로 변화한다. 이 이동전극과 전치 증폭기 사이의 node에는 DC bias를 잡아주고 modulation된 신호를 통과시키기 위해 높은 저항, R_b 을 연결한다. 전치 증폭기를 거친 신호는 HPF(High Pass Filter)와 증폭기를 통해 곱셈기에 인가되며, 또한 이 곱셈기에는 그림 5

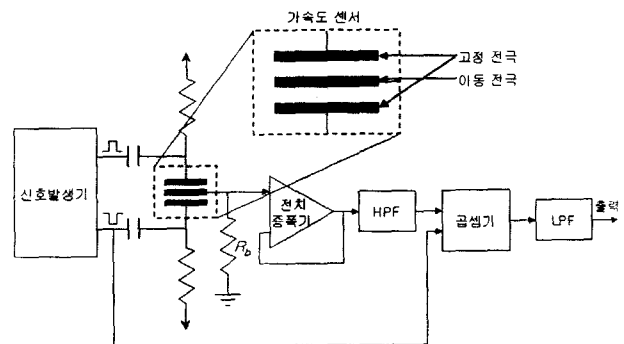


그림 5 감지회로의 구성도
Fig. 5 Block diagram for detection circuitry



그림 6 제작된 가속도계 및 감지회로
 Fig. 6 Fabricated accelerometer and detection circuitry

에 도시한 바와 같이 신호발생기 신호가 함께 인가된다. 출력 신호는 신호발생기 주파수의 두 배되는 신호와 외부 가속도에 의해 발생하는 신호가 중첩되어 나타나며, 이 신호는 LPF(Low Pass Filter)와 증폭기를 거쳐, 최종 출력 신호가 된다. 본 실험에서는 PCB 기판형태의 감지회로를 제작하였고, 그림 6에서 제작된 감지회로를 보이고 있다.

4. 측정결과 및 분석

제작된 미세구조물의 치수는 현미경을 사용하여 측정되었으며, 측정 결과 가공공정에 의한 오차가 약 0.2μm였다. 한편 탄성계수 측정을 위한 시험구조물(그림 4(a))로부터 탄성계수를 고유주파수와 구조물의 치수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{2\pi^2 f_n^2 m L^3}{t w^3} \quad (5)$$

여기서 f_n 과 m 은 각각 탄성계수 측정을 위한 시험고조물의 고유주파수와 질량이고, L 과 w 는 각각 지지보의 길이와 폭을 나타낸다. 시험구조물에서 측정한 고유주파수는 5.16 kHz이었으며, 식(5)로부터 다결정 실리콘 구조물의 탄성계수가 115.0±11.5 GPa임을 측정하였다.

그림 4(b)는 잔류응력을 측정하기 위한 시험구조물이며, 이 구조체의 침 끝점이 움직인 거리, y ,와 잔류응력 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{E y Y}{(L_A + L_B)(L_C + 0.5Y) C_F} \quad (6)$$

여기서, L_A 와 L_B 는 각각 지지보 A와 지지보 B의 길이, L_C 는 지지보 B와 침이 만나는 회전점과 침 끝점 사이의 거리, 그리고 Y 는 지지보 A와 지지보 B 사이의 거리이다. C_F 는 보정 상수이며, 본 잔류응력 측정을 위한 시험구조물의 경우에는 1.01이다. 식(6)로부터 다결정 실리콘의 잔류응력이 22.7 ± 1.2 MPa로 측정되었다.

그림 7(a)는 가진 테스트에 의한 기준 가속도계의 출력 신호이며, 그림 7(b)는 제작된 가속도계의 출력 신호이고, 이로부터 약 2.4 mV rms 잡음이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이때 인가된 가속도의 가진 주파수와 크기는 각각 100 Hz와 15.3 g였다.

그림 8은 제작된 가속도계의 선형성을 관찰하기 위하여 0에서 15.3 g까지 가속도를 인가하면서 가속도계의 출력 peak-to-peak 전압을 측정하여 정리한 결과를 정리한 것이다. 이 곡선으로부터 제작된 가속도계의 감도 및 비선형성을 각각 1.03 mV/g와 8.69 %로 얻었으며, 이러한 비선형성은 위에서 언급한 가속도계의 잡음에 의한 것으로 판단된다. 한편 전기적 가진에 의한 가속도계의 고유주파수는 5.12 kHz로 측정되었다.

5. 결론

본 논문에서는 독자적 모델의 비등간격 수평감지 전극구조의 정전용량형 다결정 실리콘 가속도계를 설계, 제작, 시험하였다. 제안된 가속도계의 감도증대를 위한 감지전극의 비등간격 비를 1:2로 설계하였으며, 이와 함께 자동차 에어백용 가속도계의 설계사양을 적용하여 구조치수를 결정하였다.

설계된 가속도 센서는 mask 6장을 이용한 표면미세가공 기술을 통하여 제작되었다. 또한 가속도계 출력 측정을 위

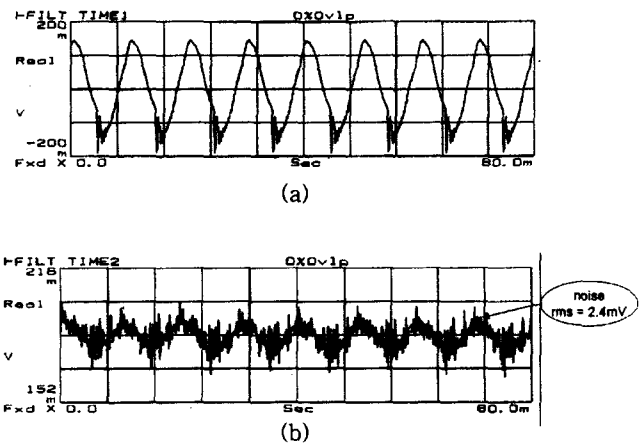


그림 7 가속도계의 시험 결과: (a) 입력 가속도; (b) 측정된 가속도
 Fig. 7 Accelerometer test results: (a) input acceleration; (b) Measured acceleration

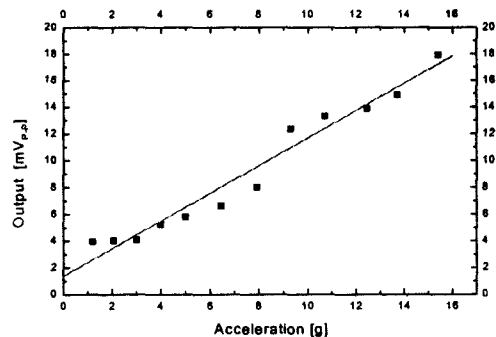


그림 8 입력 가속도에 대한 가속도계 출력
 Fig. 8 Accelerometer output versus input acceleration

한 미소 전하 감지회로를 설계하였으며, 가속도계 감지구조와 PCB 기판 형태로 구현된 감지회로를 결합하여 가속도계를 제작하였다. 가진 테스트를 통하여 제작된 가속도계를 측정하였으며, 결과를 분석하였다. 가속도계의 감도 및 비선형성에서 예상치와 차이가 있었으며, 이는 기판 형태로 구현된 감지회로가 기생정전용량이 크고 외부 잡음에 민감하기 때문으로 판단되며, 이를 개선하기 위하여 미소 전하 감지회로는 ASIC으로 구현되어야 할 것으로 판단된다.

제작된 가속도계의 구조는 감지전극이 질량체 안쪽과 바깥쪽으로 대칭적으로 구성되어 있어 대칭적인 force-balance가 가능하고 force-balance 시 질량체가 뒤틀리지 않는 구조적 장점이 있다. 또한 다공평판형 질량체 구조는 정전용량 변화 감지를 위한 고정전극 및 이동전극의 길이가 기존의 가속도계보다 상대적으로 짧아 제작공정 시 점착 현상이 감소하고, 이로 인해 수율이 증대된다. 더욱이 본 가속도계의 감지전극 연결 구조는 서로 위·아래로 교차할 필요가 없어 차후 단일 박막공정으로 가속도계를 제작 할 수 있는 구조적 장점이 있다. 따라서 이러한 구조적 장점을 고려하면 이는 독자적 모델의 자동차 에어백용 가속도계로 발전이 가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업단인 디지털 나노구동연구단의 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동 기판의 구현에 관한 연구" 과제의 일환으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] E. O. Doebelin, *Measurement Systems Application and Design*, Mc-Grow Hill, New York, Fourth Edition, 1990, pp.323-336
- [2] 조영호, "자동차용 반도체 집적 센서 및 마이크로 액츄에이터", 한국자동차공학회지, 제14권 3호, pp.12-25, 1992.
- [3] L. Zimmermann, J. Ph. Ebersohl, F. Le Hung, J. P. Berry, F. Baillieu, P. Rey, B. Diem, S. Renard, P. Caillat, "Airbag application: a microsystem including a silicon capacitive accelerometer, CMOS switch capacitor electronics and true self-test capability," *Sensors and Actuators*, A46-47, pp.190-195, 1995.
- [4] W. Kuehnel and S. Sherman, "A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry," *Sensors and Actuators*, A45, pp.7-16, 1994.
- [5] M. Offenber, H. Munzel, D. Schubert, O. Schatz, F. Larmer, E. Muller, B. Maihofer, and J. Marek, "Acceleration Sensor in Surface Micromachining for Airbag Applications with High Signal/Noise Ratio," *Sensors and Actuators SAE*, pp.35-41, 1996.

저 자 소 개



한 기 호 (韓 基 鎬)

1970년 2월 27일 생. 1993년 한국과학기술원 과학기술대학 전기및전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 관심분야: 마이크로 관성센서,

미소신호감지를 위한 ASIC 설계 및 미소소자와의 on-chip 제작.

Tel : 042-869-5038, Fax : 042-869-3050

E-mail : hkh@kaist.ac.kr



조 영 호 (曹 永 昊)

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

구실 연구원. 1987~1990년 Berkeley Sensor & Actuator Center(BSAC) 연구 조교, 1990~1991년 BSAC Post-doc.,

1991~1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원. 1994~현재 KAIST 기계공학과 부교수. 창의적연구진흥사업 디지털나

노구동연구단장. 관심분야: 마이크로 액추에이터, 마이크로 관성센서, 미소 광기전복합 소자, 디지털나노구동기판 및 응용

Tel : 042-869-3038, Fax : 042-869-3050

E-mail : mems@kaist.ac.kr