

반도체 압력 및 유량센서

전국진*, 이영주**, 김현철**

(*서울대 공대 전자공학과 조교수,

**서울대 공대 전자공학과 대학원 박사과정)

1. 서 론

실리콘을 기초 물질로 이용한 반도체 센서는, 이미 일반화된 반도체 일괄 제조공정(batch process)에 의한 단위 생산비의 절감, 소형화에 따른 소모 전력의 감소와 경량화, 빠른 응답(response) 특성, 마이크로머시닝(micromachining) 기술을 이용하여 센서를 기존의 집적회로화 함께 하나의 실리콘 기판(基板)상에 제작하는 소위 '지능화 센서(smart sensor)'로의 가능성 등의 여러가지 장점을 가지고 있다[1]. Microelectronics의 핵심인 집적회로(IC) 가공기술 및 LIGA 기술에 근거를 두는 마이크로머시닝 기술은 2차원 및 3차원의 구조를 구현하는 기술을 말하며, mm이하의 크기 및 μm 이하의 정밀도를 이룩할 수 있다. 마이크로머시닝 기술로는 미세구조, 극소형 센서 및 액츄에이터(actuator)의 구현의 가능하며, 1970년대의 단순한 반도체 센서의 개발을 필두로, 1980년대의 논리회로를 내장한 센서, multi-sensor 및 스프링, 캔틸레버, 마이크로그리퍼, 모터, 기어 등의 미세구조의 형성으로 연결되었으며, 1990년대에 이르러서는 센서, 논리회로 및 액츄에이터가 혼재한 마이크로메카트로닉스(Micro Mechatronics 또는 MEMS: Micro Electro Mechanical System)로 발전되고 있다.

센서는 압력, 유량, 온도, 자장, 광 등을 측정하는 물리적 센서, pH, 이온, 산소 등의 구성물을 감지하는 화학센서, 인체의 혈당량, 뇌의 상태, 냄새

등을 측정하는 마이오 센서로 대별될 수 있다. 이중 압력, 유량센서는 가장 광범위하게 사용되고 있으며, 자동차에 있어서 흡입·배기량, 엔진의 manifold, 엔진오일, 브레이크 오일, 타이어, 연료 등의 상태를 측정하고 공조기에서의 공기 속도 측정, 화학이나 반도체 산업에서의 유량제어(mass flow control), 노(furnace)의 흡기량을 측정하는데 사용되고 있다[2, 3]. 예를 들어 1980년대에는 미국 Ford사와 Motorola사가 공동으로 반도체공정기술을 이용한 capacitive 압력센서를 개발하여 엔진의 control system에 이용하였다[4]. 이러한 압력센서 및 유량센서는 각각 1988년에 17억불, 16억불씩의 매출을 기록하였으며, 1995년에는 30억불 및 27억불로 늘어날 전망으로 있어 가장 많이 사용되는 센서로 각광을 받고 있다.

2. 압력센서

압력센서는 절대적인, 혹은 상대적인 압력을 측정하는 소자로, 감지원리에 따라 metal형, piezoresistive(압저항형), capacitive(용량형), piezoelectric(압전형), MOSFET형 및 piezjunction형으로 구분될 수 있다. 이중 metal형은 금속을 이용하나, 그외에는 주로 반도체물질인 silicon을 이용하며, 마이크로머시닝기술로 제작된다.

Metal형은 Al, Cu/Ni 등을 사용한 strain gauge type으로 만들어져 압력이 가해지면 strain gau-

ge가 변형하여 저항의 변화가 일어나게 된다. 즉, 저항은 $R = \rho(L/A)$ 로 주어지게 되는데, 이때 ρ 는 비저항(resistivity), L은 길이, A는 단면적이다. Gauge factor는 $K = 1 + 2\mu$ 로 주어지게 되며, μ 는 Poisson 상수를 나타낸다. Metal형은 제작은 매우 간단하나, 감도가 낮은 단점이 있다.

압저항형은 silicon을 이용하며, stress에 의하여 silicon의 원자간 간격의 변형으로 전자와 lattice간의 상호작용이 변화하여, 이동도 및 비저항의 변화가 일어나는 것을 이용한다. 따라서 strain gauge와 원리는 비슷하나 metal형보다 감도가 크며, 마이크로머시닝기술을 이용하여 제작된다. 가해진 stress와 비저항의 관계는 $\Delta\rho/\rho = \pi\sigma$ 로 주어지며, $\Delta\rho$ 는 stress가 가해졌을 때의 비저항의 변화, σ 는 가해진 stress, π 는 piezoresistive 계수를 나타낸다. π 는 전계, 전류 및 인가된 stress의 방향에 따라 π_{11} , π_{12} , π_{44} 의 세가지가 직접적인 영향을 미치며, 물질의 종류(n-type 또는 p-type), silicon이 bulk인가 박막인가에 따라 달라진다[1]. 압저항형 센서는 그림 1(a)와 같이 얇은 정사각형의 silicon diaphragm위에 4개의 저항을 bridge형태로 형성하여 제작할 수 있는데[5], diaphragm은 silicon, polysilicon, silicon oxide 및 silicon nitride 등으로 만들어진다. 압력이 가해지면 diaphragm이 휘어 저항이 stress를 받게되며, L은 diaphragm의 길이, h는 diaphragm의 두께라할때 압력범위는 L^4/h^3 에 비례하며, 저항의 변화는

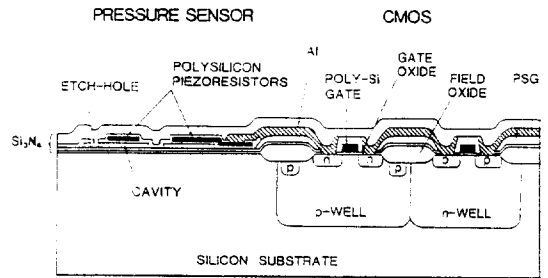
$$dR/R = \pi_{11} \cdot \sigma_{\parallel} + \pi_{12} \cdot \sigma_{\perp}$$

로 주어지고, 이때 아래첨자 \parallel 및 \perp 는 평행, 수직방향의 변수를 나타낸다. 압저항형 압력센서는 직선적인 특성을 나타내며, 저항이 온도변화에 민감하므로 온도보상회로 등을 필요로 한다.

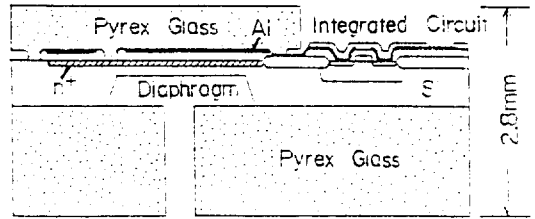
용량형은 그림 1(b)와 같이 silicon diaphragm과 지지대 사이의 parallel plate capacitor를 형성한 후 diaphragm의 휨(deflection)에 따라 capacitance, C가 증가하는 것을 감지하는 소자로 capacitance는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \iint \frac{\epsilon}{W - S(x,y)} dx dy$$

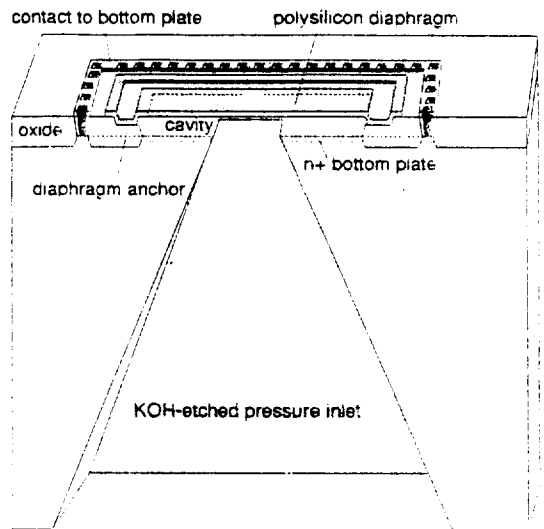
이 식에서 ϵ 는 gap 물질의 유전상수, W는 zero-pressure일 때의 gap의 크기, S는 휨의 거리, A는



(a) Piezoresistive형



(b) Capacitive형



(c) Polysilicon diaphragm을 이용한 압력센서

그림 1. 압력센서의 종류

diaphragm의 면적을 나타낸다. 압력범위는 압저항형과 같으며, piezoresistive형에 비해 감도가 높고 온도변화에 덜 민감하나, 비직선적인 특성을 나타내며, 제작이 어려운 단점이 있다. 근래에는 그림 1(c)에 보여지는 것과 같은 polysilicon 또는 fusion bonding에 의해 제작된 단일결정의 diaphragm을 이용한 용량형 압력센서가 제작되어, 용

이한 제작과 높은 감도를 얻을 수 있다. 그러나 얇은(1~2 μm 정도) polysilicon diaphragm과 작은 gap(1 μm 이하)으로 인하여 압력범위가 적어지는 문제점이 있다.

압전형은 ZnO와 같은 piezoelectricity 성질이 있는 물질을 박막으로 형성하여 stress가 인가되면 분극현상에 의한 전계(electric field)가 변화하여 MOSFET의 전하(charge)를 변화시키거나, 양단에서 potential 차이를 유발한다. 압전형은 공정이 비교적 간단하나, 생성되는 전하가 신속히 없어져서 과도적인 전하를 측정하여야 하므로 고감도의 감지회로가 필요하다.

MOSFET형은 stress가 가해질 때 전하의 이동도(mobility)가 변화하여 drain 전류가 증가하는 효과를 이용하며, piezjunction 형은 p-n 접합에 stress가 걸릴 때 포화전류(saturation current)가 증가하는 것을 이용한 것으로, 높은 집적도를 얻을 수 있으나, 감도가 낮은 단점이 있다.

압력센서로부터 나오는 신호를 처리하기 위한 신호처리회로는 저항형에는 Wheatstone-bridge, 용량형에는 charge integrator 등을 이용하는데, 최근에는 MOS 신호처리회로와 압력센서가 동일한 chip 위에 구현된 결과가 여러곳에서 보고되고 있다[6]. 이 중 MIT에서 발표된 것은 fF 이하의 capacitance를 구별해 낼 수 있는 회로로서 집적회로가 내장되지 않고서는 기생저항 때문에 가능하지 않으며, 비슷한 기법이 Analog Device 사의 accelerometer에도 이용되고 있다(그림 3). 또한, 32 \times 32 array의 압력센서가 1.8cm \times 1.7cm 크기에 구현되어 on-chip 신호처리회로와 함께 반도체 센서의 집적화, 소형화 가능성을 제시하고 있다[7].

3. 유량센서

실리콘 유량센서는 주로 기체의 유동(流動)을 측정하게 되며, 실리콘 미세가공을 이용하여 특수한 구조를 만든 후, 유속의 변화에 따른 압력의 변화를 감지하게 만든 예도 있으나[8], 실리콘 유량센서의 대부분은 열형이며, 온도의 변화에 따른 물질의 전기적 특성의 변화-저항의 변화, 열전현상(thermoelectric effect), 초전현상(pyroelectric effect), 접합전압(junction voltage: V_{BE})의 변화를

감지해내는 것이 기본적인 원리이다.

열형 유량센서의 경우 저항체 가열부 주위에 위치한 감지부의 온도가 유체의 속도와 함수관계를 가지게 된다. 박막 구조를 가지는 평판 구조의 유량센서에서는, 유체의 흐름이 요란이 없는 laminar flow인 경우 유체의 속도(v)와 온도변화(ΔT)의 관계는 다음과 같은 간단한 식으로 표시된다.

$$\Delta T = [C_1 + C_2 \cdot \sqrt{v}] \cdot (T_s - T_f)$$

이 식에서 T_s , T_f 는 각각 온도 감지요소 부분의 온도와 유체의 온도를 나타내며, C_1 은 전도, 복사, 자연대류(natural convection) 등에 의한 열손실을 나타내는 상수이고, C_2 는 유속(v)에 의한 강제대류(forced convection)로 인한 열손실을 나타내는 비례상수이다.

유체의 흐름에 의해 유기된 온도의 변화는 열전쌍에 의해 직접적인 출력전압의 변화로 나타나거나, 감지부로 쓰인 저항체의 비저항을 변화시킴으로써 저항의 변화를 검사하는 휘트스톤 브리지회로 등의 외부회로를 통하여 출력 전압(혹은 전류)의 변동으로 나타나게 된다. 그림 2에는 대표적인 실리콘 유량센서의 몇가지 예를 단면도로 표시하였다.

그림 2에서 보인 예들은 모두 가열부와 온도 변화를 감지하기 위한 요소로 이루어져 있으며, 구조적으로는 열전도도가 낮아 열차단 특성이 뛰어난 절연체 박막으로 구성된 박막형이거나 초전현상을 이용한 후막형으로 되어있다. 이렇게 형성된 박막

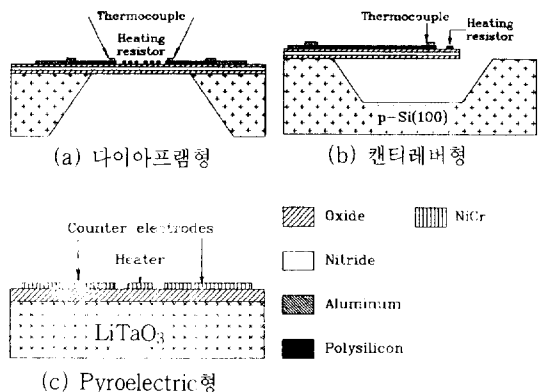


표 1. 몇가지 유형의 유량센서 비교

	크기 [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	최소선폭 [μm]	감도 [$\text{mV}/(\text{m}/\text{s})^{1/2}$]	dynamic range [m/s]	최소측정 가능치 [m/s]	감지물질	감지원리	참고문헌
캔티레버형 열전대	450×450 (sensor)	4	14	0~25	0.1	알루미늄 다결정 실리콘	열기전력 효과	[3]
microbridge형 열저항체	400×400 (sensor)	10	5	0~7	0.1	다결정 실리콘	열저항 효과	[3]
beam형 열저항체	6000×8000 (sensor)	75	1000 (증폭 후)	10~60	1	니켈	열저항 효과	[12]
Si channel 열저항체	4500×500 (sensor)	10	832 (증폭 후)	0~5	0.01	티타늄	열저항 효과	[10]
다이아프램형 열저항체	3500×5000 (sensor)	10	9	0~5	0.1	금/크롬	열저항 효과	[13]
capacitive microchannel	9700×3000 (chip)	3.5		$\sim 10^{-4}$	10^{-5}	실리콘	유속에 따른 압력 변화	[8]
pyroelectric anemometer	6000×6000 (chip)	100	~ 1	0~30	0.1	LiTaO ₃ /NiCr	정전용량 변화	[9]
다이아프램형 열전대	1000×1000 (chip)	4	18.7	0~10	<0.1	알루미늄 다결정 실리콘	열기전력 효과	[11]

위에 가열부와 온도 감지요소를 위치시킴으로써, 후막 구조에 비해 기판으로 빠져나가는 불필요한 전도열을 차단시켜서 센서의 감도를 향상시키게 된다. 이들 구조에서 기판으로 사용된 실리콘은 높은 열전도도($148 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$)를 가지고 있어, 측정시 유체의 온도와 동일한 기준 온도를 제공한다.

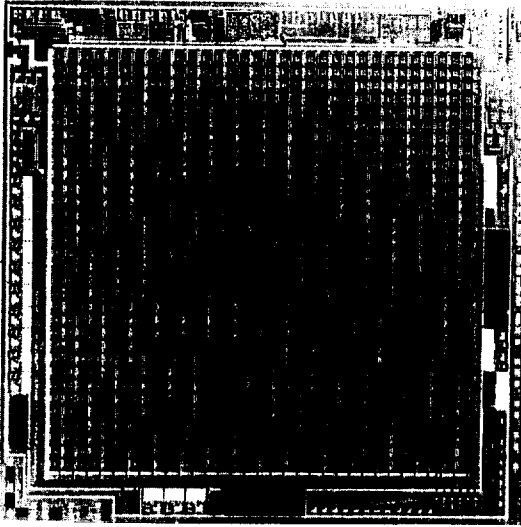
표 1에는 이미 개발되어 있는 여러 유형의 유량센서들의 특징을 비교하였다. 표 1의 첫번째 줄에 정리한 캔티레버형 유량센서는 한쪽 끝이 고정된 절연 박막 캔티레버 위에 열전쌍을 직렬로 배열한 열전대를 위치시키고, 고정되지 않은 쪽에 가열용 저항을 만들어서, 유속의 방향이 일정하게 정해진 경우의 유량측정에 사용되는 센서이며, 두번째 예는 양쪽 끝이 고정된 다리모양의 절연체 박막 구조 위에 가열부와 온도 감지용 저항을 위치시킨 구조를 하고 있다. 가열용 저항체를 중심으로 동일한 거리만큼 위치시킨 두개의 감지용 저항에서, 유속이 있을 경우 유체 흘러들어오는 쪽의 감지부 온도와 가열부를 지나면서 가열된 유체의 온도때문에 달라지는 흘러나가는 쪽의 감지부 온도의 차를 두 저항의 변화의 차로 감지하게 된다. 세번째의 예는 두개의 실리콘 빔(beam)위에 동일한 두개의 니켈 저항을 만들고, 하나를 기준 저항으로 삼아 유속의 변화

에도 나머지 하나의 감지용 저항이 일정한 온도를 유지하도록 하는 회로를 구성하여 유속의 변화에 따라 감지용 저항에 흐르는 전류나 저항 양단에 걸리는 전압을 출력함으로써 동작하게 된다. 특히 이 센서는 자동차의 흡기량 측정을 위하여 개발되었다.

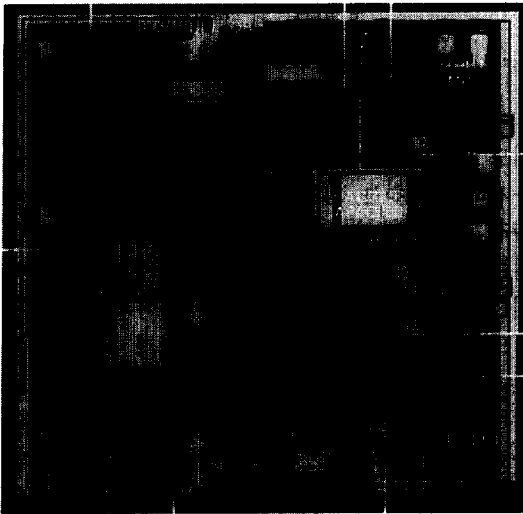
또 네번째에 정리한 실리콘 채널형 유량센서는 실리콘 기판에 열저항형 센서구조를 형성한 후 유리(quartz)를 미세가공하여 유체가 흐르는 유도관 통로를 만들어 실리콘 기판과 제작된 유리를 붙인 복합 구조이다. 이 유량센서 역시 유체의 우회 통로를 형성하여, 적은 양의 유체만이 흐르게 함으로써 열전달에 의한 유체의 온도 변화를 크게하여 센서의 감도를 향상시킨 예이다. 다섯번째 줄에 정리된 다이아프램형 유량센서는 다이아프램 위에 두개의 금속 저항을 조밀하게 형성하여 하나의 저항은 가열용으로 쓰고, 나머지 하나는 온도에 따른 금속의 비저항의 변화를 출력함으로써 유량을 감지한다. 온도의 변화에 따른 물질의 저항의 변화는 저항온도계수(TCR: Temperature Coefficient of Resistance)로 표현하며, 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\text{TCR} = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT}$$

이 식에서 R_0 는 기준온도에서의 저항값을 나타



(a) Toyota사의 압력센서 array



(b) Analog Device 사의 가속도계

그림 3. 압력센서 및 가속도계

내며, R 및 T는 각각 저항과 온도이다. 금속의 경우 반도체에 비해 넓은 온도 범위에서 거의 일정한 저항온도계수를 나타내어 감지용 저항으로 사용하기에 유리한 면이 있으나, 집적회로의 표준 제작공정에서 쓰이지 않는 금속이 많아 한계가 있다.

특히, 표 1에서 여섯번째로 예시된 capacitive microchannel형 센서는, 실리콘 기판에 유체가 흐르는 미세한 통로를 만들고, 다른 웨이퍼에는 용량형 압력센서를 만든 후 두 웨이퍼를 접합 기술(ano-

dic bonding)을 이용하여 결합한 구조를 하고 있으며, 벤츄리관의 원리와 유사하게 외부 유속의 변화에 따라 유체가 흐르는 통로에 유기되는 압력의 변화를, 통로에 연결된 압력센서의 다이아프램의 굴절로 인한 정전 용량의 변화로써 감지하는 역학적 유량센서이며, 상당히 작은 유속범위에서 사용될 수 있는 유량센서이다.

일곱번째로는 초전현상(pyroelectric effect)을 나타내는 물질인 LiTaO_3 세라믹 기판상에 평판 커패시터를 만들고 이 커패시터 주위에 가열체를 두어, 유속에 따라 변하는 온도를 커패시터의 정전용량의 변화로 감지하는 비(非) 실리콘 유량센서이다. 초전현상을 가진 물질의 경우 격자구조에서의 분극 작용(dipole moment)이 달라지게 되어 이 물질을 전극으로 하는 커패시터를 만들면, 달라진 전하량 만큼의 전류가 반대 전극으로 흐르게 된다. 따라서 이런 종류의 센서는 평형 상태에 도달하게 되는 경우 출력이 사라지게 되므로, 분극을 일으키는 신호를 단속(chopping)하거나, 인가 전류나 전압을 교류로 써야한다.

마지막에 소개된 다이아프램형 유량센서는 다결정 실리콘과 알루미늄을 감지물질로 사용하여, 다이아프램 상에서 온도 감지요소를 가열부를 중심으로 직교좌표축에 대칭적으로 배치함으로써 유량 및 유속의 방향을 동시에 측정할 수 있도록 하는 구조로 되어있다.

4. 결 론

시스템의 자동화, 지능화를 이루기 위해서 센서의 이용이 증가하는 추세에 있으며, 반도체 집적회로 제작기술을 근간으로 하는 마이크로머시닝기술을 이용하여 센서의 소형화, 고성능화, 가격의 저렴화를 꾀할 수 있다. 본고에서는 물리량을 측정하는 압력센서 및 유량센서의 원리와 종류에 대해 고찰해보았다. 압력센서로는 상대압력 및 절대압력을 측정하며, 다이아프램 및 캔티레버를 이용한 압저항형(piezoresistive) 또는 용량형(capacitive)이 고감도 및 소형화를 위해 널리 쓰이고 있다. 또한 유량 및 유속을 측정할 수 있는 유량센서에는 열형이 널리 쓰이는 것을 알 수 있었고, thermal isolation을 위하여 oxide, nitride 등과 같은 박막의 캔티레버,

다이아프램, beam 등의 구조물과 다양한 감지물질
을 이용하는 것을 알 수 있었다. 다이아프램과 같은
미세 기계구조는 마이크로머시닝기술을 이용하여,
현재 μm 이하의 정확도로 제작이 가능하나, 2차원
및 3차원의 실제 응용에 쓸 수 있는 미세구조를 구
현하기 위해서는 제작기술에 대한 연구가 필수적이
며, 재료에 대한 개발도 병행되어야 할 것이다. 센
서가 동작하는 환경은 매우 험하므로, 패키징 기술
또한 개발이 필요하다. 더욱이 센서 패키징은 자동
화로의 전환이 매우 어려우므로, 생산원가 절감을
위해서 개발되어야 한다. 미래의 좀더 풍요로운 생
활을 위해서는 자동화시스템, 의료기기, 수송수단
에 이용될 마이크로센서의 개발이 필요하리라 생각
된다.

참 고 문 헌

- [1] Middelhoek, 「Silicon Sensors」
- [2] W. Göpel, J. Hesse and J. N. Zemel, 「Sensors—A comprehensive survey」, vol. 1. Fundamentals and General Aspects, VCH.
- [3] G. Wachutka, R. Lenggenhager, D. Moser and H. Baltes, “Analytical 2D—Model of CMOS Micro—machined Gas Flow Sensors”, Transducers '91, p.22, San Francisco, June 1991.
- [4] R. Sulouff, “Silicon Sensors for Automotive Applications”, Transducers '91, p. 170, 1991.
- [5] L. Chistel and K. Petersen, “A Catheter Pressure Sensor with Side Vent Using Multiple Silicon Fusion Bonding”, Transducers '93, p.620, Yokohama, June 1993.
- [6] J. Kung and H. Lee, “An Integrated Air—gap—capacitor Process for Sensor Applications”, Transducers '91, p. 1010, 1991.
- [7] K. Suxuki, K. Najafi, K. Wise “A 1024—Element High—Performance Silicon Tactile Imager”, p.674, IEDM, Sanfransisco, Dec, 1988.
- [8] Steve T. Cho Khalil Najafi, Clark E. Lowman and Kensall D. Wise, “An Ultrasensitive Silicon Pressure—Based Microflow sensor”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 39, p. 825, 月 1992.
- [9] H. Y. Hsieh, A. Spetz and J. N. Zemel, “Wide Range Pyroelectric Anemometers for Gas Flow Measurements”, Transducers '91, p.38, 1991.
- [10] Masayoshi Esashi, “Micro Flow Sensor and Integrated Magnetic Oxygen Sensor Using It”, Transducers '91, p.34, June 1991.
- [11] 이 영주, 전 국진, 김 성태, 부 종욱, “2차원 유속 감지를 위한 반도체 유량센서”, 대한 전자공학회 춘계학술 발표대회 논문집, p.154, May 1993.
- [12] C. H. Stephan and M. Zanini, “A Micromachined, Silicon Mass—air flow Sensor for Automotive Applications”, IEEE Transducers '91, p.30, 1991.
- [13] Euisik Yoon, “An Integrated Mass Flow Sensor With On—Chip CMOS Interface Circuitry”, technical report No. 184, The University of Michigan, Nov, 1990.



전국진(全國眞)

1955년 3월 24일생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 미시간대학교 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학교 전기및 전자공학과 졸업(공학). 1986~89년 워싱턴 주립대학 조교수. 현재 서울대 공대 전자공학과 조교수. 주관심분야:반도체 공정및 반도체 센서 등



이영주(李泳柱)

1968년 8월 23일생. 1991년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1993년 동대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 현재 동 대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야: 반도체 센서 및 액츄에이터, microelectromechanical systems.



김현철(金鉉哲)

1967년 8월 25일생. 1990년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1992년 동대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 현재 동 대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야: 반도체 센서 및 인터페이스 회로, microelectromechanical systems.