

마이크로 압력센서의 기술 동향

기술해설 1

The Technical Trend of Micro-Pressure Sensors

정 귀 상*
(Gwiy-Sang Chung)

Key Words(중요용어) : Pressure sensor(압력센서), Piezoresistive effect(압저항효과), Piezoresistive coefficient(압저항계수), Micromachining(마이크로머시닝), Semiconductor fabrication process(반도체 제조공정).

1. 서 론

최근 과학기술의 급속한 발달로 현대 사회는 커다란 변화를 겪고 있으며, 정보화 시대에 진입하고 있다. 고도 정보화 사회에서는 1차적으로 외계의 각종 정보를 정확하게 감지하여 마이크로프로세서에 의하여 신속·정확하게 대량으로 처리하여 각종 통신 수단에 전달되어야 한다. 따라서 수많은 정보들을 신속하면서도 정확하게 처리할 수 있는 기술의 개발은 정보화 시대의 도래를 가속화시킬 것이다. 이러한 정보화 시대를 실현시키기 위해서는 기본적으로 수많은 정보를 감지할 수 있는 각종 센서의 능력에 좌우된다 하여도 과언이 아닐 것이다.

자연계의 수많은 물리량 중에서도, 하중이나 무게·압력 등의 기계량을 전기적 신호로 변환하는 압력센서는 자동차, 항공기, 산업 공정, 사무자동화, 가전 전자 용품, 의료 그리고 환경 제어 등을 고도화시키는데 필수적인 전자 부품이다. 이러한 기계량의 변환소자로서, 종래에는 플루톤관, 차등트랜스 및 포텐손메타 등의 감압소자의 변위를 차등변압기로서 그리고 금속 스트레인 게이지나 콘덴서로 전압, 전류 혹은 정전용량의 변화로써 압력이나 스트레인 등을 측정하는 기계식 압력센서가 일반적으로 널리 이용되고 있지만, 현재도 고정도화 및 고신뢰성화를 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

일반적으로 단결정 실리콘은 거의 모든 전자소자의 재료로서 널리 사용되고 있으며 제조공정기술 또한 상당한 수준에 도달하고 있다. 최근에는 실리콘 자체의 우수한 압저항효과, 기계적 특성 그리고 반도체 제조공정을 이용한 미세가공기술인 마이크로머시닝을 이용하는 반도체 압력센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기계식 압력센서

에 비해서 전기적 변화를 이용하는 반도체 압력센서는 소형, 저가격, 고신뢰성, 고감도, 다기능, 고분해, 고성능 및 집적화 등의 우수한 특성을 지니고 있다.

본고에서는 이러한 특성을 가지는 반도체 압력센서중 특히, 압저항형과 용량형 압력센서의 구조와 원리, 그리고 연구·개발 동향 및 향후 전망에 관해서 기술하였다.

2. 압력센서의 종류 및 특성

일반적으로 압력센서는 원리에 따라 1) 스트레인 게이지, 2) 압전효과(piezoelectric effect)를 이용하는 방식, 3) pn 접합부의 응력효과를 이용하는 방식, 4) 광섬유의 광굴절(optical deflection)을 이용하는 방식, 5) 압저항 효과(piezoresistive effect)를 이용하는 방식 : 압저항형 압력센서 그리고 6) 다이아프램의 휨 정도에 따른 용량의 변화를 이용하는 방식 : 용량형 압력센서 등이 있다.

다이아프램상에 부착된 얇은 금속 박막에 외력을 가하면, 변형에 의해 박막의 전기저항이 변화하는 원리를 이용하는 스트레인 게이지는 가장 일반화된 압력 계측기이다. 감도가 낮고, 다이아프램의 크기가 크고, 재현성 그리고 집적화가 불가능하기 때문에 많은 응용 분야에 제약을 받고 있다.

압전효과를 이용하면 어떤 물질에 가해지는 기계적 응력이나 음성신호를 전기신호로 바꿀 수 있으나 실리콘에는 압전효과가 없고, 또한 ZnO, CdSd 등과 같은 압전재료들은 센서 제작시 미세가공기술을 이용할 수 없기 때문에 집적화, 대량생산 및 소형화가 불가능하다. 최근에는 스퍼터링 기술로 압전재료인 ZnO를 실리콘 기판상에 증착하여 감지부에 압전특성을 이용하고 마이크로머시닝으로 실리콘 기판을 미세가공하므로써 이와 같은

문제점들을 극복하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

pn접합부를 이용하는 경우, 높은 압력범위에서 이용되는 접합부를 이용하기 때문에 압력센서는 손상을 받기가 쉽고, 접합용력차이 등의 문제가 발생하여 소자의 신뢰성이 떨어져 재료 선별에 상당한 난점이 있다.

투명 탄성체의 한 방향으로 압력을 가했을 때, tensor 타원체로 나타나는 변형, 일그러짐에 의해 빛에 대하여 복굴절성 결정과 같이 작용하는 광탄성효과를 이용하는 광압력센서는, 비교적 정확한 동작은 하지만, long-term stability의 문제와 interface의 문제에 있어서 해결되어야 할 많은 문제점을 갖고 있다.

압저항형 반도체 압력센서의 연구·개발은 1954년에 Bell연구소의 C. S. Smith가 Si과 Ge의 압저항효과를 발견한 이후부터 활발히 연구가 진행되어 오고 있다.¹⁾ p 혹은 n형 실리콘 기판상의 일정 부위에 열확산 혹은 이온주입기술로 확산형 저항체를 만들고, 기판 뒷면을 이방성 습식 식각기술로 박막 다이아프램을 형성한 후에 압력 변화에 따른 압저항값 변화를 이용하는 것이다. 이것은 구조가 간단하고, 사용 가능한 압력의 범위가 넓고 제작의 용이성 때문에 일반적으로 많이 쓰이고 있다. 그러나 저항 변화의 한계로 인해 감도가 떨어지고 온도 드리프트가 크기 때문에 실제 사용시 소자 하나 하나의 교정이 필요하며 특별한 보상기술의 개발이 필요하다.

이에 반해 다이아프램의 휨을 이용해 두 전극 사이의 용량값을 검출해 내는 용량형 압력센서는 압저항형 압력센서 보다도 감도가 수십에서 수백 배 이상의 값을 가질 뿐만 아니라, 안정성이 뛰어나고 소비전력이 적다는 장점을 가지고 있다. 그러나 용량형 압력센서는 제작이 복잡하며 직선성이 나쁘기 때문에 사용 가능한 압력범위가 좁다. 또한 기생 용량이 크기 때문에 반드시 신호처리 회로를 집적화해야 하는 등의 문제점이 있다.

더구나 압저항형과 용량형 압력센서의 감도는 박막 다이아프램 두께의 제곱과 삼승에 각각 반비례하기 때문에 대량생산시 정확한 다이아프램 두께 제어 기술이 절대적으로 필요하다. 패킷징시 센서와 패킷징 용기와의 열팽창 계수 차이 때문에 온도에 따른 센서의 출력이 변화하게 된다. 따라서 반도체 압력센서의 실용화에 가장 어려운 부분의 하나인 패킷징 문제는 새로운 미세가공기술과 저온에서의 양극 접합기술 그리고 새로운 재료를 개발함으로써 개선할 수 있을 것이다.

현재 실용화를 위해서 개발이 진행되고 있는 마이크로 압력센서는 실리콘의 우수한 탄성성질을 이용하는 압저항형과 용량형이며, 각각의 형태는 장단점을 지니고 있기 때문에 응용분야에 따라 적절히 선택하는 것이 바람직하다.

3. 동작 원리

3.1. 압저항형 압력센서

일반적으로 도체 또는 반도체에 외력을 가하면 그것에 대응하는 내부응력에 의해서 물체의 전기저항이 변화하는 현상을 압저항효과라고 부른다. 이러한 현상을 1956년 C. Herring과 E. Vogt은 many-valley conduction/valence-band 모델로 다음과 같이 설명하였다.²⁾ 즉, 외력에 의한 결정의 격자변형은 한 계곡에서 다른 계곡으로 반송자들을 산란시킨다. 이러한 격자 변형의 효과는 반송자가 보다 높은 유효 질량의 상태로 산란되면, 저항률을 증가시키고, 보다 낮은 유효 질량의 상태로 산란이 되면서 저항률을 감소시킨다. 따라서 응력에 의해 반송자의 이동도와 분포가 변화된다.

반도체에 있어서 압저항효과에 대해서 간략히 기술하면 다음과 같다. 금속 박막은 전자의 이동도 변화에 의해서 저항이 변화하지만, 반도체는 반송자의 수도 변화하기 때문에 저항률의 변화가 훨씬 크다. 반도체에 있어서 저항률의 변화율 $\Delta\rho/\rho_0$ 는 (1)식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\rho/\rho_0 = \Pi_l\sigma_l + \Pi_t\sigma_t + \Pi_s\sigma_s \quad (1)$$

여기서, $\Delta\rho$ 는 저항률의 미소 변화량, ρ_0 는 응력을 받지 않았을 때의 저항률, σ_l 은 전류 방향에 평행인 종방향 응력(longitudinal stress), σ_t 은 전류 방향에 수직인 횡방향 응력(transverse stress) 그리고 σ_s 는 전류 방향에 어긋나는 각을 갖는 전단 응력(shear stress)이다. 또한 비례계수인 Π_l 은 종방향 압저항계수(longitudinal piezoresistive coefficient), Π_t 는 횡방향 압저항계수(transverse piezoresistive coefficient) 그리고 Π_s 는 전단 압저항계수(shear piezoresistive coefficient)이다. 일반적으로 세번째 항은 첫째 항과 두번째 항의 성분에 비해 훨씬 작으므로 보통 무시한다.

실리콘과 같은 대칭성을 갖는 입방결정에서 압저항계수는 단지 3개의 독립된 값 Π_{11} , Π_{12} 및 Π_{44} 만 가지며, 불순물 및 온도에 따라 변한다. C. S. Smith가 실온에서 측정된 대표적인 값(단위 $10^{12}\text{cm}^2/\text{dyn}$)은 p형 ($7.8\Omega \cdot \text{cm}$)에서 $\Pi_{11}=6.6$, Π

$l_2 = -1.1$, $\Pi_{44} = 138.1$ 이며, n형 ($11.7 \Omega \cdot \text{cm}$)에서 $\Pi_{11} = -102.2$, $\Pi_{12} = 53.4$, $\Pi_{44} = -13.6$ 이다.

또한 압저항계수는 결정축에 따라 변한다. 따라서, Π_{ij} 는 전장 및 전류의 방향이 i 이고, 응력의 방향이 j 일때의 압저항계수이며, 이는 탄성 성분으로 표현할 수 있다. Π_{11} , Π_{12} 및 Π_{44} 는 (1)식에서 정의한 Π_l 과 Π_t 로 표현하면 (2 및 3)식과 같고, n형 실리콘인 경우에는 Π_{11} 이 Π_{12} 및 Π_{44} 보다도 훨씬 크며, p형 실리콘의 경우에는 Π_{44} 가 Π_{11} 및 Π_{12} 보다 훨씬 크기 때문에 일반적으로 압저항계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Pi_l = \Pi_{11} - 2(\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})(1_1^2 m_1^2 + 1_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (2)$$

$$\Pi_t = \Pi_{12} + (\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})(1_1^2 l_2^2 + m_1^2 n_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (3)$$

$$\Pi_s = 2(\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})(1_1^3 l_2^2 + m_1^3 n_2^2 + n_1^3 n_2^2) \quad (4)$$

$$\Pi_s = \Pi_{44} + 2(\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})(1_1^2 l_1^2 + m_1^2 m_1^2 + 1_1^2 n_1^2) \quad (5)$$

여기서, l , m 및 n 은 결정축과 전류 방향의 방향여현이다. (4)식은 전장과 같은 방향일때의 전단 압저항계수이며 (5)식은 전장과 전류의 방향이 서로 수직일 때의 전단 압저항계수이다.

1957년 W. P. Mason과 R. N. Thurston는 압저항효과를 이용해서, 변위, 힘 그리고 토크 등의 측정에 응용할 수 있음을 보였다.³⁾ 압저항효과가 발견된지 40년이 경과된 지금도 연구결과는 계속 발표되고 있다.⁴⁾ 최근 Y. Kanda는 불순물 농도, 온도 및 결정축에 따른 압저항계수의 변화량을 그래프로 나타내었다.⁵⁾ 불순물 농도와 온도에 따라 서로 다른 값을 갖게 되며 p형층에서는 표면 농도가 증가할수록 Π_{44} 의 온도 의존성이 작아진다. 한편 n형층에서는 표면농도가 매우 높을 때, Π_{11} 은 온도가 감소하며 따라 감소하는 특성을 보인다. 또한 불순물 농도가 높을수록 온도 의존성이 우수하지만, 압저항계수가 작다. 따라서, 실리콘을 이용한 압력센서 제작시에는 적절한 결정축 방향의 선택과 더불어 센서의 사용 온도 범위에 따라 불순물 농도를 결정해야 한다.

압저항형 압력센서의 대표적인 단면도를 그림 1에 나타내었다. 공급 전류 V_{supply} 로 구동하는 단선 저항형 압력센서에 전류 I 가 흐르고 압력 P 를 인가했을 때의 전압 변화율을 ΔV 라고 하면, 공급 전압에 대한 출력 전압의 변화율은 종방향 저항 변화율과 횡방향 저항 변화율의 차로 (6)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V/V_{\text{supply}} = (\Delta \rho / \rho_0)_l - (\Delta \rho / \rho_0)_t \quad (6)$$

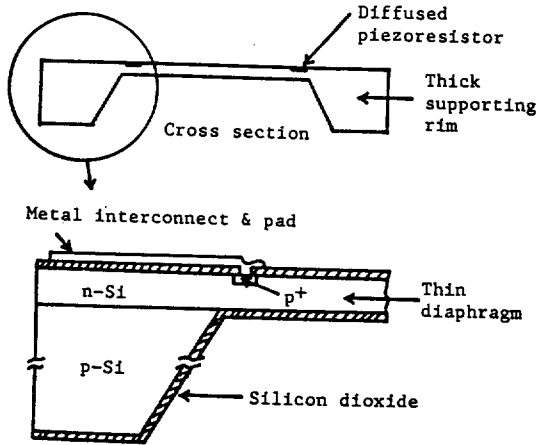
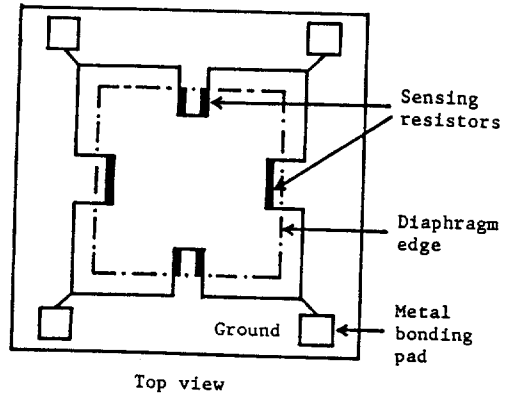


그림 1. 압저항형 압력센서의 단면도
Fig. 1. Cross section of piezoresistive pressure sensor.

다이아프램상에 그림 1처럼 저항이 브리지 형태로 구성되는 경우, 공급 전압에 대한 출력 전압의 변화율은 (7)식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta V/V_{\text{supply}} = [(\Delta \rho / \rho_0)_l - (\Delta \rho / \rho_0)_t] / [2 + (\Delta \rho / \rho_0)_l - (\Delta \rho / \rho_0)_t] \quad (7)$$

만일 종방향의 저항 변화율과 횡방향의 저항 변화율이 같다면, 브리지 저항의 경우 출력 전압의 변화율은 종방향 저항률과 횡방향 저항 변화율의 차를 1/2로 나눈 값과 같다. 한편 전단 압저항을 이용하는 single-element four-terminal strain-gauge을 이용하는 압저항형도 보고되고 있다.

압저항형 압력센서의 감도(sensitivity)는 일반적으로 (8)식으로 주어진다.

$$S_{\text{piezo}} = \Delta V/V_{\text{supply}} P = \gamma a^2/h^2 \quad (8)$$

여기서, γ 는 저항의 형태와 압저항형계수에 의해서 결정되는 상수, a 는 다이아프램 한번 길이의 절반 그리고 h 는 다이아프램의 두께이다. 따라서, 단결정 실리콘의 우수한 압저항효과를 이용하는 압저항형 압력센서의 성능은 다이아프램의 크기, 모양, 두께 및 균일성, 저항의 위치, 크기, 불순물 농도 및 형태 등에 크게 의존하기 때문에, 설계시에 이러한 요소들을 고려해야만 최적의 압력센서를 제작할 수 있다.

3.2. 용량형 압력센서

일반적으로 용량형 압력센서는 응용 분야에 따라 절대압(absolute pressure)형과 상대압(relative pressure)형으로 대별된다. 그림 2(a)와 (b)는 절대압형과 상대압형 압력센서의 대표적인 단면도이다. 절대압형은 다이아프램을 밀폐 조건에 둔 상태로 제작하여 기준압실내의 일정한 압력을 기준으로 하여 외부 압력을 측정할 수 있는 압력센서이다. 한편 상대압형은 유리부에 구멍을 뚫어주어 기준압실이 개방되어 있으므로 두 부분의 상대적인 압력, 즉 다이아프램 상하의 압력 차를 측정할 수 있는 압력센서이다.

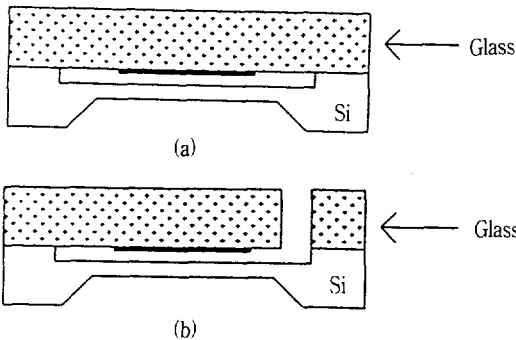


그림 2. (a) 절대압과 (b) 상대압 용량형 압력센서의 단면도

Fig. 2. Cross section of (a) absolute and (b) relative type capacitive pressure sensors.

절대압형 압력센서는 외부와 완전히 차단되어서 주위의 물질의 영향을 받지 않는 장점이 있으나 기준압실 내부의 공기가 압축되어 비직선성이 생기는 것과 온도가 증가하면 따라 기준압실의 공기 팽창으로 옴셋트와 온도 드리프트가 발생한다. 이에 반하여 상대압형 압력센서는 외부와 개방이 되어 있어 주위 물질에 영향을 받기 쉬우나 기준압실 내부가 밀폐 상태가 아니기 때문에 기준압실

내부의 공기 압축이나 팽창에 대한 영향은 없다.

용량형 압력센서는 외부에서 인가되는 압력에 따라서 용량 값이 변하는 것인데 기본 원리는 실리콘 박막 다이아프램에 인가되는 압력이 변하면, 다이아프램이 휘게 되며 이로 인하여 전극 간격이 바뀌기 때문에 용량이 변화하는 것이다. 용량형 압력센서의 감도는 (9)식으로 주어진다.

$$S_{cap} = \Delta C / C_0 P = 0.0746(1 - \nu^2) a^4 / E h^3 d \quad (9)$$

여기서, E 는 영모듈, ν 는 포아손률 그리고 d 는 두 전극간 거리이다.

(8)과 (9)식에서 다이아프램의 두께 혹은 면적의 항을 고려해 볼 때, 용량형 압력센서가 압저항형 압력센서에 비하여 감도가 월등히 우수함을 알 수 있다.

평행한 다이아프램에 압력이 인가되었을 때, 다이아프램은 평행한 전극의 조건을 만족시키지 못하고 중앙 부분이 가장 많이 휘고 중앙에서 벗어날수록 휨이 작아지게 된다. 이것은 다이아프램의 중앙 부분이 가장 큰 용량 값을 갖는다는 것을 의미한다. 다이아프램의 중앙변위 $W_0(P)$ 는 (10)식과 같이 주어진다.

$$W_0(P) = 1.56 \times 10^{-13} (2a)^4 P / h^3 \quad (10)$$

주어진 압력에 대한 휨값은 다이아프램 두께의 3승에 반비례하고, 한번 길이의 4승에 비례한다. 따라서 가장 효율적으로 감도를 향상시키기 위해서는 다이아프램의 넓이를 크게 하는 것이 좋지만 소형화가 요구되는 상황에서는 크기가 제한될 수밖에 없고, 두께를 얇게 해주는 것이 가장 좋은 방법이 된다. 그러나 제작 기술의 어려움으로 인하여 두께를 얇게 하는 데는 상당한 제한이 따르며, 다이아프램의 면적과 두께를 적절히 절충시켜야 한다. 또한 감도를 향상시키고 용량을 크게 해서 기생 용량을 적게 하기 위해서는 전극간 간격을 작게 하는 것이 바람직하다.

압력이 가해짐에 따라 가동 전극이 되는 다이아프램과 고정 전극과의 평행 상태를 유지할 수 없는데서 발생하는 비직선성 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로 다이아프램의 구조를 변형시킨 센트 보서의 구조를 갖는 용량형 압력센서의 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

4. 연구 · 개발 동향

금속이나 결정체의 압저항효과에 대해서는 1930년대부터 연구되었지만, 반도체의 압저항효과를 본격적으로 연구하고 압력이나 변위측정에 이용하려는 움직임은 1960년대 부터였다. Bell연구소의 기술자들에 의해 실리콘 자체를 다이아프램으로 이용하여, 확산층의 압저항효과를 조사하였다.⁶⁾ 1979년 Michigan 대학의 K. D. Wise 등은 이방성 습식 식각으로 제작한 실리콘 압저항형 압력센서의 온도 특성에 대해서 발표했으며,⁷⁾ 그후 대학 및 연구소 등에서 실리콘의 압저항효과를 이용한 압저항형 압력센서에 대해 활발히 연구를 했다. 특히, 마이크로프로세서의 급속한 진보와 더불어 디지털 기술 발달에 의한 정보처리의 고도화와 함께 센서의 신호 출력 자체가 미약하고 비직선적인 정보가 많기 때문에 이를 증폭하고 또한 사용 가능한 온도 범위가 낮기 때문에 온도 특성까지도 보상이 가능한 회로를 집적화한 스마트 압력센서가 개발되기 시작하였다.

자동차 및 비행기의 엔진 그리고 공업용 로봇제어용으로 마이크로프로세서 시스템에 직접 연결하여 사용할 수 있는 압력센서를 1983년 일본의 Toyota 중앙연구소 S. Sugiyama 등이 표준 바이폴라 트랜지스터 공정으로 압저항 브리지, 온도 보상회로, 증폭기 및 전압-주파수(V-F) 변환기등을 onechip화하여 아날로그 및 디지털 출력이 가능한 바이폴라 집적화 압력센서가 처음으로 개발되었다.⁸⁾ 그림 3(a)와 (b)는 각각 전압과 주파수 출력이 가능한 바이폴라 집적화 압력센서의 도식적 다이어그램과 주파수 출력용 신호처리 회로도이다.

그후 NEC중앙연구소의 H. Tanigawa 등에 의해서 바이폴라보다 집적도가 높고 소비전력이 낮은 NMOS 공정을 이용한 집적화 압력센서가 개발되었다.⁹⁾ 그림 4(a)와 (b)는 각각 NMOS 집적화 압력센서의 단면도와 신호처리 회로도이다.

또한, 그 이듬해 사용 조건의 변동에 따른 센서의 성능을 향상시킬 목적으로 구동 회로까지 내장한 CMOS 집적화 압저항형 압력센서도 개발되었다.¹⁰⁾ 그림 5(a)와 (b)는 각각 CMOS 회로를 내장한 집적화 압력센서의 단면도 및 신호처리 회로도이다. 여기서 V_{EXE} 는 기준 전압 발생 회로가 발생하는 기준 전압 V_{REF} 정확하게 센서를 구동할 수 있는 특징을 갖고 있다.

또한 압저항형 압력센서의 큰 문제점 중의 하나인 온도 의존성을 개선할 목적으로, 온도특성(감도 및 오프셋)까지 개선 가능한 보상회로를 내장한 완전 집적화 바이폴라 압력센서가 개발되었다.¹¹⁾ 그림 6(a)과 (b)는 감지부 및 보상회로를 포함한

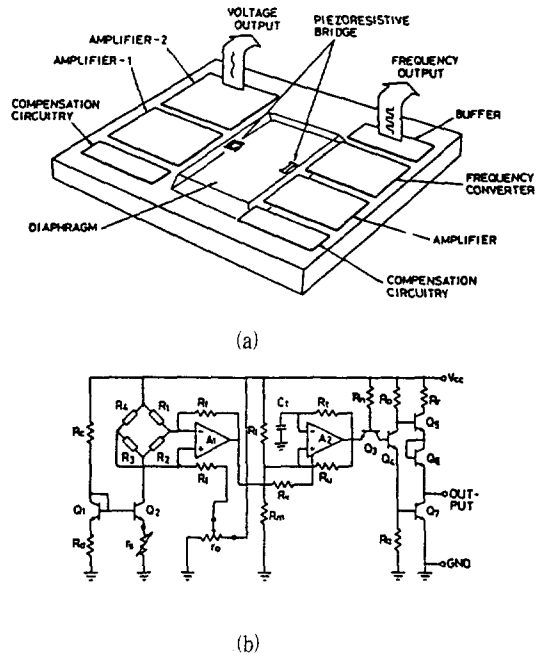


그림 3. 전압과 주파수 출력이 가능한 바이폴라 집적화 압력센서의 (a) 도식적 다이어그램 및 (b) 주파수 출력용 신호처리 회로도

Fig. 3. (a) Schematic diagram and (b) frequency output signal processing circuit diagram of integrated pressure sensor with both voltage and frequency output.

신호처리 회로의 블록 다이어그램과 단면도 이다. 한편 압력센서를 고도로 집적화 하는데 있어서 가장 커다란 문제는 압력센서의 감지부인 다이아프램이 점유하는 면적을 가능한 줄이는 것이다. 즉 종래의 반도체 압력센서는 기판의 뒷면으로부터 이방성 습식 식각으로 박막 다이아프램을 형성하므로 이방성 식각 특유의 (111)면에 따른 경사면이 존재하기 때문에 센서 크기의 소형화에 제약을 받는다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로, 일반적인 반도체 압력센서의 다이아프램 크기가 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 인데 비해서 표면 마이크로머신 기술로 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 이하의 마이크로 다이아프램 압력센서가 또한 개발되었다.¹²⁾ 이것은 다이아프램을 실리콘 기판면상에서 형성하기 때문에 종래의 압력센서 제작시 필연적인 마스크 비정합에서 초래되는 특성 약화를 비약적으로 개선시킬 수 있는 또 하나의 특징을 갖고 있다. 마이크로 다이아프램

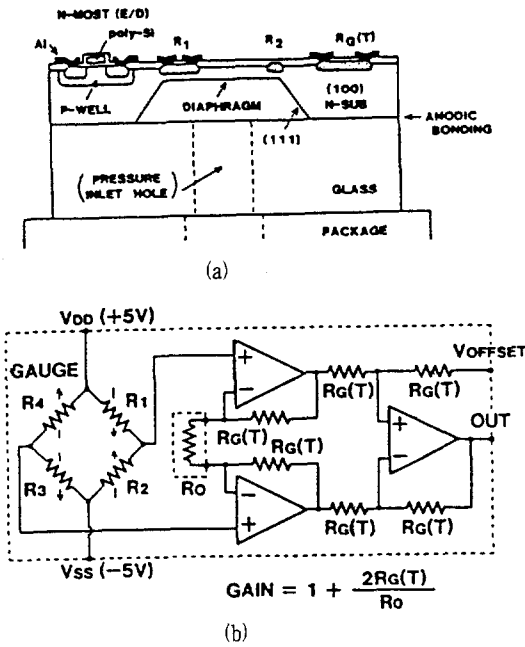


그림 4. NMOS 집적화 압력센서의 (a) 단면도 및 (b) 신호처리의 회로도
 Fig. 4. (a) Cross section and (b) signal processing circuit diagram of NMOS integrated pressure sensor.

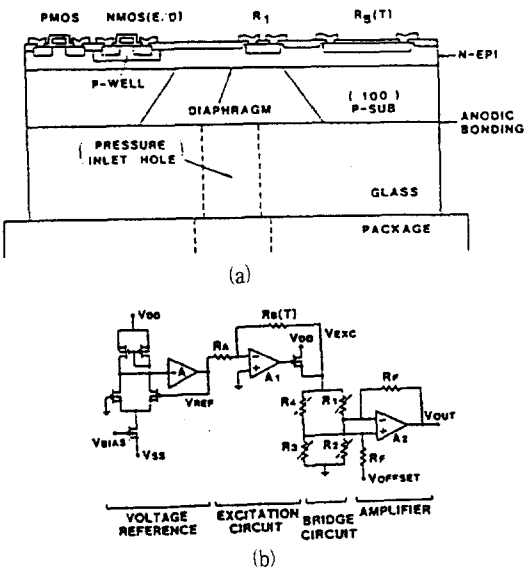


그림 5. CMOS 집적화 압력센서의 (a) 단면도 및 (b) 신호처리 회로도
 Fig. 5. (a) Cross section and (b) signal processing circuit diagram of CMOS integrated pressure sensor.

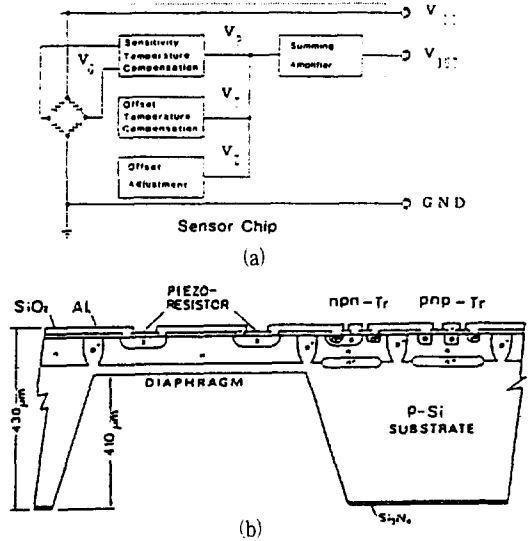


그림 6. 완전 집적화한 바이폴라 압력센서의 (a) 블록 다이어그램 및 (b) 단면도
 Fig. 6. (a) Block diagram and (b) cross section of fully integrated bipolar pressure sensor.

집적화 압력센서의 단면도를 그림 7(a)에 나타냈다. $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 정도의 마이크로 다이아프램 압력센서와 COMS 회로가 동일 기판상에 집적화되어 있다. 마이크로 다이아프램 압력센서의 기준 압력실은 표면 마이크로머신기술로 질화막 다이아프램과 실리콘 기판사이에 희생층을 형성해서 이 희생층을 식각으로 제거하므로써 형성한다. 이 기준 압력실의 간극 즉 cavity를 200nm로 작게하므로써, 또한 과부하 압력에 의한 다이아프램의 과도한 휨 발생을 억제하므로써 파괴를 방지할 수 있다.

다이아프램상에 4개의 다결정 실리콘 압저항이 브리지로 구성하여 감지부를 형성하고 있다. 마이크로 다이아프램 압력센서는 실리콘 기판상에 집적화 공정으로 제작되기 때문에 소형화 및 고집적화가 용이

하다. 또한 다이아프램으로 사용하는 질화막 그리고 압저항소자로서 이용하는 다결정질 실리콘은 반도체 제조공정에 있어서 일반적으로 널리 사용되고 있는 박막이기 때문에 기본적으로 집적화에 적당한 압력센서이다. 그림 7(b)은 마이크로 다이아프램 집적화 압력센서를 어레이시켜 압력분포를 측정할 목적으로 개발한 압력센서 어레이의 블록 다이어그램이다. 어레이부는 Timing 회로, 10 Bit counter, S/R-Selector, X-Decoder, Y-Decoder 등

의 부속회로에 의해서 제어되고 있다. 그러나 이 압력센서를 실용화하기 위해서는 박막 다층증착 및 식각시 응력변화에 따른 트랜지스터 특성 악화를 정확히 파악해야 한다. 또한 센서부의 감도 향상, 오프셋 감소, 칩표면에 가압 및 보호방법 등에 대해서도 검토할 필요가 있다. 이러한 문제들을 해결할 수 있다면, 압력센서의 어레이화에 의해 고분해능력을 갖는 촉각 센서의 실현으로 압력 및 하중 분포의 정밀 측정으로 정밀 로봇 및 FA 분야에 상당히 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

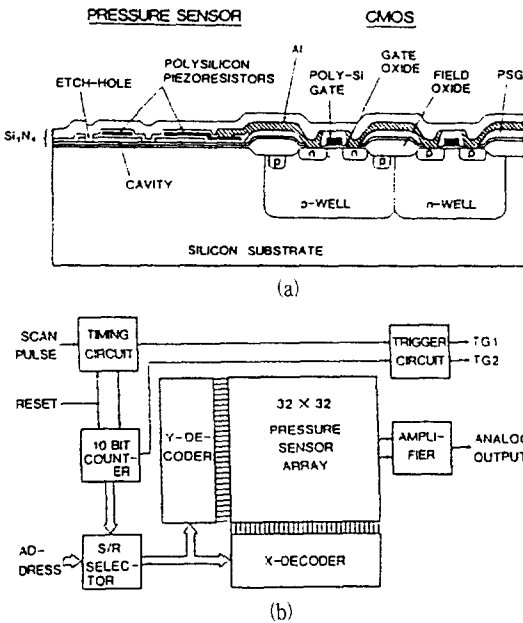


그림 7. 마이크로 다이어프램 집적화 압력센서의 (a) 단면도 및 (b) 셀 어레이 블록 다이어그램

Fig. 7. (a) Cross section and (b) cell array block diagram of microdiaphragm integrated pressure sensor.

현재까지도 일본, 미국 및 유럽 등에서 집적화 압력센서의 연구가 활발히 진행되고 있고, 수많은 압력센서가 개발되었지만 아직 실용화된 압력센서는 소수에 지나지 않는다. 실용화가 되지 못하는 근본적인 문제점은 대량 생산시 수율 문제이며 센서 자체의 나쁜 온도 특성이다. 결과적으로 실용성 있는 압력센서를 개발하기 위해서는 신호처리 회로 연구보다도 우수한 특성을 갖는 감지부 자체의 개발이 더욱 절실하다. 따라서 최근에는 다결정질 실리콘 및 질화막 박막의 희생층 식각기술 즉 표면 마이크로머시닝을 이용해서 각종 마이크로 센

서 및 마이크로 액추에이터 등을 개발하고 있다. 하지만, 아직 박막의 기계적 특성이 확실하지 않아서 재현성 등의 많은 문제점이 있다. 이러한 박막을 이용하는 표면 마이크로머시닝 기술 대신에, 단결정 실리콘의 우수한 탄성성질을 이용할 수 있는 SOI(Si-on-insulator)구조가 유용한 기술로서 최근에 주목을 받고 있다. Toyohashi 기술과학대학의 G. S. Chung 등은 SOI구조를 이용한 고온용 및 고성능 마이크로 압력센서를 개발하였다. 이러한 SOI 구조는 압력센서 뿐만 아니라 촉각, 가속도, 유량/유속 및 자기센서 등과 3차원 구조의 미세구조물 제작 등에 용이하게 사용될 것이며 고기능 마이크로 센서 및 마이크로 액추에이터 등의 개발에 유용한 공정기술이 될 것이다.

압력센서의 감도는 다이어프램 두께 의존성이 대단히 크다. 압저항형 경우는 다이어프램 두께의 제곱에 반비례하고, 용량형 압력센서의 경우는 3승에 반비례한다. 따라서 압력센서의 대량 생산시, 다이어프램 두께의 정확한 제어가 절대적으로 필요하다. 이방성 습식 식각에 의한 박막 다이어프램 제작시, 두께 제어 방법으로는 etching-time, P⁺층 etching-stop 및 electrochemical etching-stop 방법 등이 있지만, 아직껏 확실한 방법이 없다. 열산화막은 이방성 식각액에 거의 식각이 되지 않기 때문에 가장 좋은 etching-stop 물질일 것이다. 따라서 SOI 구조의 절연막을 이방성 식각액에 의한 박막 다이어프램 제작시 식각 중지막으로 이용하므로서, SOI 두께가 박막 다이어프램에 해당하기 때문에 정확한 두께 제어가 가능하다. 따라서 압력센서 셀의 어레이를 이용한 촉각센서 개발에도 상당히 유용할 것이다.

다. 그림 8은 이러한 목적으로 개발한 SOI 구조의 절연막을 박막 다이어프램 형성시 식각 중지막으로

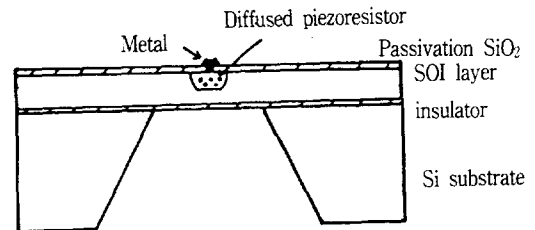


그림 8. SOI 구조의 절연막을 식각 중지막으로 이용한 고분해 압력센서의 단면도

Fig. 8. Cross section of high-resolution pressure sensor using the insulator of a SOI structures as an etch-stop layer.

로 이용한 압저항형 압력센서의 단면도이다.¹³⁻¹⁴⁾ 현재, 가장 정확히 다이아프램 두께를 조절할 수 있다는 electrochemical etching-stop 방법¹⁵⁾보다 훨씬 쉽고 정확하게 조절할 수 있으므로 대량 생산시 특히 유용한 기술이다.

한편, 실리콘의 확산저항을 이용하는 압력센서의 또 하나의 문제점은 큰 온도 의존성이다. 온도 의존성의 원인으로서는, pn접합의 누설전류, 실리콘과 산화막 계면에서의 열응력, 압저항계수의 온도 의존성, 압저항소자의 부정합 그리고 패킷징 효과 등이 있다. 120°C 이상의 고온 분위기에서 압저항형 압력센서를 사용할 경우, pn접합의 누설전류에 의한 온도 의존성이 가장 심각하다. SOI 구조의 절연막을 압저항의 유전체 분리막으로 이용하므로 이러한 문제점을 개선할 수 있다. 더구나, 다결정 실리콘을 압저항으로 이용하는 표면 마이크로머신 기술보다 단결정 실리콘을 압저항으로 사용하기 때문에 고감도를 얻을 수 있다. 그림 9는 SOI 구조의 절연막을 압저항의 유전체 분리막으로 이용한 압저항형 압력센서의 단면도이다.¹⁶⁻¹⁷⁾

또한, double SOI 구조를 이용하므로써 압저항형 압력센서의 큰 문제점인 박막 다이아프램 두께 제어와 온도 의존성을 동시에 해결할 수 있다. 그림 10은 double SOI 구조를 이용한 압력센서의 단

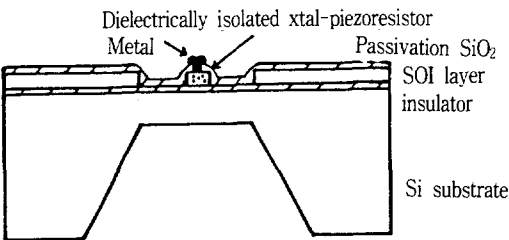


그림 9. SOI 구조의 절연막을 압저항의 유전체 절연막으로 이용한 고온용 압력센서의 단면도

Fig. 9. Cross section of high-temperature pressure sensor using the insulator of a SOI structure as the dielectrical isolation layer of piezoresistors.

면도이다.¹⁸⁾ SOI 구조의 첫번째 절연막은 박막 다이아프램 형성시 두께 제어용으로, 두번째 절연막은 압저항의 유전체 분리막으로 각각 이용하므로써 압저항형 압력센서의 근본적인 문제점들을 완벽히 해결할 수 있다.

한편, 용량형 압력센서의 연구는 압저항형보다

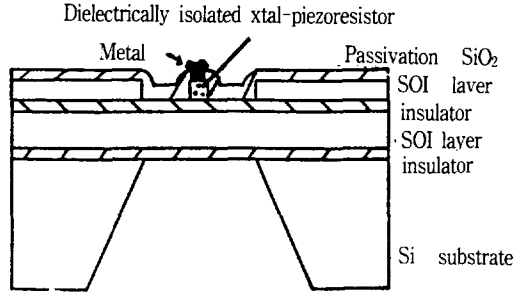


그림 10. Double SOI 구조를 이용한 고성능 압력센서의 단면도

Fig. 10. Cross section of high-performance pressure sensor using double SOI structures.

비교적 늦게 시작했지만, 현재 실용화를 위해서 활발히 개발이 진행중에 있다. 1982년에 Michigan 대학의 K. D. Wise¹⁹⁾ 및 Western Reserve 대학의 W. H. Ko²⁰⁾ 등에 의해서 실리콘 용량형 압력센서의 기본적인 특성이 동시에 발표되었다.

이미 언급한 것처럼 용량형 압력센서는 압저항형보다도 원리적으로 고감도이고, 최적설계를 한다면 온도 특성이 훨씬 우수하다. 따라서 제작 후에 특별한 조정없이 고성능 압력센서로서 사용이 가능하다.

그러나 용량형 압력센서는 감지부로 부터 리더선을 끌어내는 것과 리더선의 기생용량 때문에 감도가 떨어지는 문제점을 갖고 있다. 그러므로 고성능화를 위해서는, 감지부 용량과 검출회로를 동일 기판상에 집적화해서 리더선에 의해 야기되는 기생용량을 가능한 줄일 필요가 있다. 이러한 고성능 집적화 용량형 압력센서를 제작하기 위해서는 실리콘 기판상에 검출회로와 감지부를 집적화하는 기술, 평행전극을 형성해서 센서 용량부를 만들어 검출회로에 접속시키는 기술, 그리고 밀봉된 회로로부터 리더선을 빼내는 기술이 개발되어야 한다. 또한 소형, 고성능으로 대량생산에 적당한 압력센서를 제작하기 위해서는 용량형 압력센서의 구조, 용량 검출회로 및 센서의 패킷징기술 등이 개발되어야 한다. 이러한 문제점들을 고려한 고성능 집적화 용량형 압력센서가 개발되었다.²¹⁾ 그림 11(a)은 Schmitt trigger형 CMOS 용량-주파수(C-F)변환기를 이용한 용량형 검출회로도이다. 용량 검출회로에서는 주파수 출력을 위해서 외부 잡음의 영향을 받기 어렵고, 회로동작이 안정적인 Schmitt trigger형을 이용한 C-F변환기에서 센서 용량 C_x 는 기생용량 C_s 와 병렬이고, 누설전류 I_L 를

고려하면, 회로의 발진주기 T는 (11)식으로 주어진다.

$$T = [(C_x - C_s)V_h] / (I_0' + I_0) + [(C_x + C_s)V_h] / (I_0' - I_0) \quad (11)$$

여기서 V_h 는 Schmitt trigger의 hysteresis 전압, I_0' 는 충전전류 그리고 I_0 는 방전전류이다. 누설전류 I_L 은 센서 전극간의 표면 누설전류와 회로부에 빛이 입사될 경우에 발생하는 광 여기전류이다. 이러한 누설전류는 잡음과 aging effect을 발생시키는 원인이 되기 때문에 가능한 줄이는 것이 바람직하며 I_L 보다도 충전전류 I_0 를 충분히 크게 해서 누설전류의 영향을 줄일 수 있다. 그림 11(b)은 이러한 검출회로와 감지부를 동일 기판상에 one-chip화한 집적화 용량형 압력센서의 단면이다.

대단히 낮은 압력 범위에서 감도가 높으며 디지털 출력까지도 가능한 고분해 능력을 갖는 압력센서는 공정 제어 및 에어컨 시스템 등에서 많이 필요하다. 이러한 용도의 압력센서로서는 두 전극사이의 cavity 길이를 이용해서 일정 이상의 과부하가 인가될 경우에 박막 다이아프램이 휘어서 반대전극에 맞추어진다. 따라서 이러한 과부하를 보호할 수 있는 압력센서의 구조로서 용량형 압력센서가 적당하며 또한 센터 보서 구조를 이용하므로써 용량형 압력센서의 큰 문제점의 하나인 비직선성을 상당히 개선할 수 있다. 고농도 boron 확산층 실리콘 식각 중지법에 의한 박막 다이아프램 두께 제어와 실리콘 기판과 유리기판을 양극접합으로 접합하고, 또한 비직선성 특성을 개선하기 위해 센터 보서 구조를 갖는 용량형 압력센서가 개발되었다.²²⁾ 그림 12는 센터 보서 구조를 갖는 용량형 압력센서의 제조 공정 단면도이다. 평탄한 다이아프램 보다도 센터 보서 구조를 갖는 압력센서가 직선성이 훨씬 우수함을 알 수 있다.

용량형 압력센서를 이용한 고성능 가속도 센서가 또한 개발되고 있다.²³⁾ 이러한 차동 용량형 가속도 센서의 원리도를 그림 13(a)에 나타냈다. 중앙에 질량이 m인 seismic mass가 스프링 정수 k의 발로 지지하고 있다. 이때 가속도 a가 가해졌을 때 mass는 $\Delta d = ma/k$ 만큼 변위한다. 이 변위 Δd 을 상하 전극과 mass 전극간의 정전용량 C_1 , C_2 의 차로써 검출한다. 이때 정전용량 C_1 과 C_2 는 (12)와 (13)식으로 각각 주어진다.

$$C_1 = \epsilon A / (d_0 + \Delta d) \quad (12)$$

$$C_2 = \epsilon A / (d_0 - \Delta d) \quad (13)$$

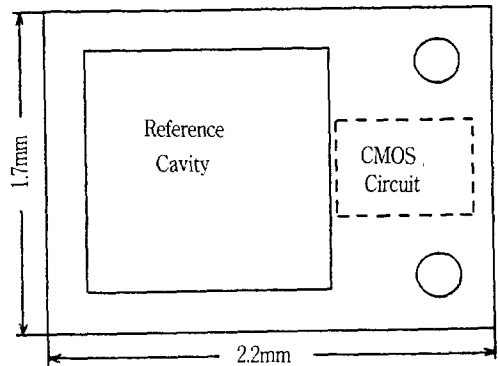
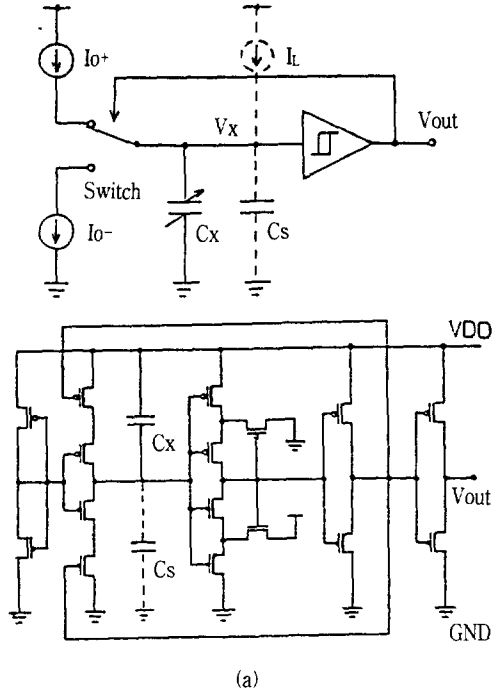


그림 11. 집적화 용량형 압력센서의 (a) 신호처리 회로도 및 (b) 단면도

Fig. 11. (a) Signal processing circuit diagram and (b) cross section of integrated capacitive pressure sensor.

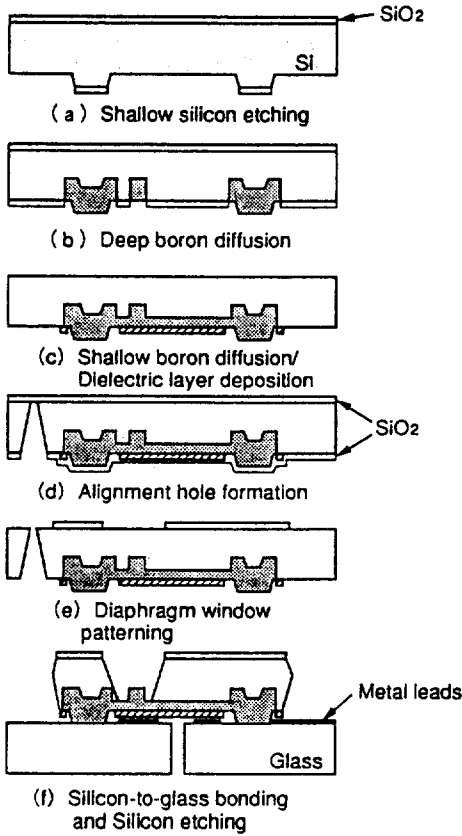


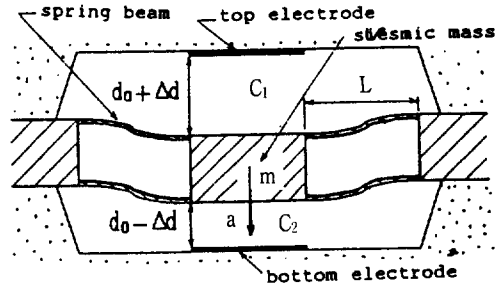
그림 12. 센터 보서 다이아프램을 갖는 용량형 압력센서의 제조 공정도

Fig. 12. Fabrication process sequence of capacitive pressure sensor with center bossed diaphragm.

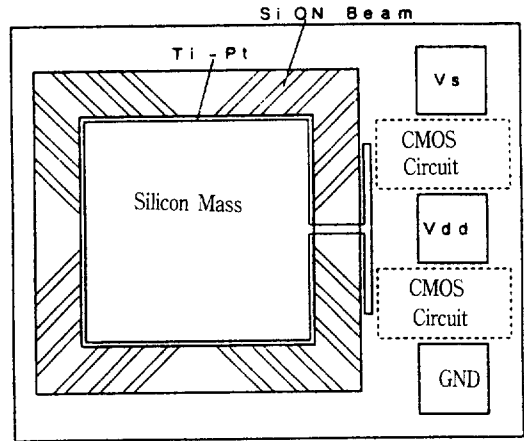
여기서, ϵ 은 유전율이며 A 는 전극의 면적이다. 따라서 가속도 a 는 (14)식을 주어진다.

$$a = Kd_0/mx(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2) \quad (14)$$

그림 13(b)는 이러한 가속도 센서의 단면도이다. 가속도 센서의 중요한 출력특성은 센서용량 C_1 과 C_2 가 각각 12 및 15pF이고, 차동 용량감도는 0.6pF/G였다. 또한 용량 검출회로를 하이브리드로 내장한 가속도 센서는 -31에서 19 G까지 측정 가능하며 최대 60G의 가속도에서 파괴되었다. 감도는 30°C에서 46mV/G였다. 주파수 특성은 -0.2KHz/°C이고, 가속도 -1에서 1G까지 변화시킬 때 주파수는 0.2KHz로 변화하였다. 앞으로 검출회로까지 내장한 집적화 가속도 센서의 연구·개발이 요구된다.



(a)



(b)

그림 13. 용량형 압력센서를 이용한 가속도 센서의 (a) 원리도 및 (b) 단면도

Fig. 13. (a) Principle and (b) cross section of the acceleration sensor using capacitive pressure sensor.

4. 향후 전망

고기능 및 고성능 마이크로 압력센서를 개발하기 위해서는 각종 기반 선행 공정 기술, 예를 들면 미세구조물의 모델링, 식각기술에 의한 3차원 미세 가공기술, 현 반도체 제조공정에 사용 가능한 이방성 습식 식각액 개발, 고농도 boron 단결정 및 다

결정 실리콘 그리고 질화막 박막의 기계적 특성 규명, 유리의 미세가공기술, 양극접합기술, feedthrough hole 전극형성기술, 패키징기술 등이 확립되어야 한다. 그 중에도 내환경성, 고기능성 및 패키징 등은 특히 중요하게 고려해야 할 것이다. 최근 재료 및 구조의 변화로 고온도에서 사용 가능한 마이크로 압력센서들이 개발되고 있지만, 아직 극저온, 부식성 기체 및 액체 그리고 방사선 분위기 등 악조건하에서의 응용 범위가 점점 확대될 것이다. 이러한 요구 조건들을 만족시킬 수 있는 감지소자는, 최근에 급속히 발전하고 있는 마이크로머시닝으로 개발될 것이다. 하지만, 감지소자를 구동시키는 데 필연적인 신호처리 회로 및 패키징 등의 주변기술 또한 병행해서 발달되어야 한다.

최근까지, 반도체 제조공정기술과 마이크로머시닝의 마이크로 압력센서는, 센서 출력의 증폭, 비직선성 그리고 온도특성까지 보상하여 마이크로프로세서에 직접 연결하여 사용할 수 있는 신호처리까지 내장된 집적화 압력센서의 개발이 주류를 이루고 있다. 그러나, 향후 여러가지 재료 및 제조공정기술의 연구·개발로 극한 환경속에서도 사용 가능한 감지소자가 개발되어야 할 것이다. 또한 여러가지 신기능을 가진 센서를 하나의 칩상에 복합화시켜서 다기능 센서의 개발과 더불어 디지털 신호처리가 가능하여 마이크로프로세서에 직접 연결할 수 있는 복합 센서도 개발될 것이다.

5. 결 론

지금까지 압력센서의 종류 및 원리, 연구·개발 현황, 문제점 및 향후 전망 등에 관하여 기술했다. 여러가지 센서중에서도 가장 폭넓게 많이 사용되고 있는 것이 압력센서로 전체 센서 시장의 40%나 차지하고 있으며, 그 중에서도 반도체 압력센서는 소형, 저가격, 고신뢰성 그리고 고감도이기 때문에 수요가 점점 증가할 것이다. 또한 마이크로프로세서에 직접 연결할 수 있는 집적화 압력센서가 개발되고 있다. 더구나 극한 환경에서도 사용 가능한 마이크로 압력센서가 개발된다면 자동차 및 비행기 엔진 제어 시스템, 공업계측 그리고 의료용 분야에 아주 유효하게 사용될 것이다. 이러한 마이크로 압력센서 제작기술은 거의 모든 마이크로센서 및 액츄에이터 개발의 중심기술이기 때문에, 향후 각종 고기능, 고성능 마이크로 트랜스듀서 개발의 중추적인 기술이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. C. S. Smith : Phys. Rev., 94, 42(1954).
2. C. Herring et al. : Phys. Rev., 101, 944(1956).
3. W. P. Mason et al. : J. Acoust. Soc. Amer., 29, 1096 (1957).
4. T. Maruyama et al. : J. Appl. Phys., 68, 5687 (1990).
5. Y. Kanda : IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, 64 (1982).
6. W. G. Pfann et al. : J. Appl. Phys., 32, 2008 (1961)
7. S. K. Clark et al. : IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, 1887 (1979).
8. S. Sugiyama et al. : Sensors & Actuators, 4, 113 (1983).
9. H. Tanigawa et al. : IEEE Trans. Electron Devices, ED-32, 1191 (1985).
10. T. Ishihara et al. : IEEE J. Solid-State Circuits, SC-22, 151 (1987).
11. S. Yamashita et al. : Tech. Dig. of the 8th Sensor Sympo., 13 (1989).
12. S. Sugiyama et al. : Tech. Dig. of the Transducers'91, 188 (1991).
13. G. S. Chung et al. : Electron. Lett., 27, 1089 (1991).
14. G. S. Chung, et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 30, 1378 (1991).
15. B. Kloek et al. : IEEE Trans. Electron Devices 36, 663 (1989).
16. G. S. Chung et al. : Sensors & Materials, 3, 61 (1991).
17. G. S. Chung et al. : Sensors & Actuators A, 29, 107 (1991).
18. G. S. Chung et al. : Rev. Sci. Instrum., 62, 1341 (1991).
19. Y. S. Lee et al. : IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, 48 (1982).
20. W. H. Ko et al. : Sensors & Actuators, 4, 403 (1983).
21. Y. Matsumoto et al. : Tech. Dig. of the 9th Sensor Sympo., 43 (1990).
22. M. Sato et al. : Tech. Dig. of the 11th Sensor Sympo., 23 (1991).
23. N. Ura et al. : Tech. Dig. of the 10th Sensor Sympo., 41 (1991).