

논문 95-4-2-02

## 압전박막을 이용한 감압전장효과 트랜지스터(PSFET)의 동작 특성

\*양 규 석, \*조 병 옥, \*\*권 대 혁, \*\*남 기 홍, \*손 병 기

The Operational Characteristics of a Pressure Sensitive FET Sensor  
using Piezoelectric Thin Films\*Gyu-Suk Yang, \*Byung-Woog Cho, \*\*Dae-Hyuk Kwon,  
\*\*Ki-Hong Nam and \*Byung-Ki Sohn

## 요 약

MOSFET의 전장효과와 압전물질의 압전효과를 결합한 새로운 FET형 반도체압력소자(PSFET : pressure sensitive field effect transistor)를 제조하고 그 동작 특성을 조사하였다. PSFET의 압전박막은 RF 마그네트론 스퍼터링으로 ZnO박막을 약 5000Å 게이트 위에 성막하였다. ZnO 압전박막의 최적 c-축 배향분극 구조를 얻기 위한 막 제조조건은 기판온도가 300°C, RF 전력이 140W, 작업 분위기압은 5mtorr였으며, 플라즈마가스는 아르곤이었다. 제조된 PSFET는 적용된 압력범위( $1 \times 10^5$  Pa~ $4 \times 10^5$  Pa)에서 비록 감도는 낮으나 비교적 안정한 동작특성을 나타내었다.

## Abstract

A new FET type semiconductor pressure sensor (PSFET : pressure sensitive field effect transistor) was fabricated and its operational characteristics were investigated. A ZnO thin film as a piezoelectric layer, 5000Å thick, was deposited on a gate oxide of FET by RF magnetron sputtering. The deposition conditions to obtain a c-axis poling structure were substrate temperature of 300°C, RF power of 140watt, and working pressure of 5mtorr in Ar ambience. The fabricated PSFET device showed good linearity and stability in the applied pressure range( $1 \times 10^5$  Pa~ $4 \times 10^5$  Pa).

## I. 서 론

피측정물의 역학적 응력을 전기적 신호로 변환시키는 압력센서는 산업용 로봇, 자동차, 항공, 해양분야, 생의학 및 공정제어 분야에 널리 이용되고 있다.

현재 압력을 측정하기 위한 방법으로는 그 측정원리에 따라 압전효과<sup>[1]</sup>, piezo - junction효과<sup>[2]</sup>, optical deflection<sup>[3]</sup>, 압저항효과<sup>[4]</sup>, 그리고 실리콘 캐패시터형<sup>[5]</sup> 등을 이용한 것이 있으며, 그 중에서도 압저항효과를 이용한 압력센서와 실리콘 캐패시터형 압력센서가 가장 많이 연구 개발되고 있다. 이들 압력센서들은 소형이며, 높은 감도 및 좋은 안정성 등 많은 장점을 가지고 현재 실용화되고 있으나, 실리콘식각, 유리와 실리콘과의 양극접속 등 제조공정상 양산화 및 기타 측정회로들과의 집적화에 어려움이 있다.

PSFET는 MOSFET의 전장효과와 유전체의 압전효과를 이용한 FET형 압력센서로서 외부응력에 의해

\* 경북대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng. Kyungpook National Univ.)

\*\* 경북산업대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng. Kyungpook Sanup Univ.)

<접수일자 : 1995년 1월 12일>

게이트에 형성된 압전박막의 자발전기분극에 의해 압전위가 발생되며 이 압전위는 PSFET의 문턱전압의 변화로 나타나는 것을 이용하는 소자이며, 이 PSFET는 전제조공정이 플레나기법(plana technology)으로 제조되므로 제조공정이 비교적 간단하다.

본 연구에서는 전기기계적 결합계수가 크고, 복귀성이 우수하며, 막 형성이 용이하다고 알려진 ZnO<sup>[6]</sup> 물질을 PSFET의 게이트 압전박막으로 이용하기 위해 ZnO박막을 RF 마그네트론 스퍼터로 증착하고, 증착된 막의 최적 제조조건을 추출하기 위한 전기적, 물리적 특성을 조사하였다. 이를 바탕으로 압전효과를 이용한 새로운 감압전장효과 트랜지스터(PSFET)를 제조하고, 가해진 외부 압력변화에 따른 출력특성을 조사하였다.

## II. 이 론

압전물질로 사용된 ZnO의 결정구조는 우르쯔광(wurzte)형구조<sup>[6]</sup>로서 유리와 같은 비정질 기판을 사용하여 박막을 제조해도, c-축 방향의 성장이 우수하게 일어난다. 또한, 외부에서의 응력변화가 Zn와 O간의 격자간격에 변화를 주어 분극을 초래하고 압전위를 발생시킨다.

PSFET 센서의 구조는 그림 1에서와 같이 산화막 사이에 ZnO 압전박막이 성막된 형태이다. PSFET 센서에 외부압력이 가해지면 압전체내부에서 압전위가 발생하게 되고, 이 압전위에 의해 PSFET의 문턱전압이 변하게 된다. 따라서 센서가 압력변화를 감지하게 된다. PSFET의 동작원리<sup>[7]</sup>는 다중 산화막을 가진 MOSFET 원리와 유전체의 압전원리로 설명이 가능하다.

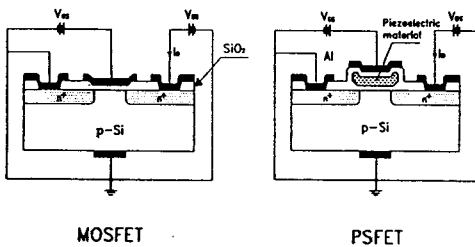


그림 1. MOSFET와 PSFET의 비교.  
Fig. 1. Comparison of MOSFET and PSFET.

변형력, 즉 응력 텐서의 성분을  $\vec{X}_k(k=1, \dots, 6)$ 이라 하고, 전기분극벡터( $\vec{P}$ )의 성분을  $\vec{P}_i(i=1, 2, 3)$ 이라 할

때 전기분극도  $\vec{P}_i$ 와 변형력 텐서와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{P}_i = \sum_k d_{ik} \vec{X}_k \quad (1)$$

여기서  $d_{ik}$ 는 압전율 또는 압전상수이다.

만일 외부전장( $\vec{E}_e$ )이 가해지면 전기분극도 P는

$$\vec{P} = d_{ik} \vec{X}_k + \epsilon_o \chi_e \vec{E}_e \quad (2)$$

로 표시된다. 여기서 P나 X는 압전박막의 수직방향이고, d도 같은 방향의 ±부호를 갖는다. 그리고,  $\epsilon_o$  및  $\chi_e$ 는 각각 진공의 유전율 및 압전층의 전기감수율이다. 실제 박막인 경우에는 응력이 주로 두께방향으로 걸리므로 1차 근사로 단순화할 수 있으며, 분극도  $\vec{P}$ 는 응력  $\vec{X}$ 에 1차 근사로 선형적관계로 표현될 수 있다.

또한, 전기분극도  $\vec{P}$ 는

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_o E = \frac{\epsilon_o(\epsilon_r - 1)}{t} V \quad (3)$$

이다. 여기서 D는 전속밀도이고,  $\epsilon_r$ 는 압전층의 비유전상수인데 압력의 함수이다. 또한 t와 V는 각각 압전체의 두께 및 압전체에 걸리는 전압이다.

따라서, 식 (2)와 식 (3)에서 전압 V는

$$V = \left( \frac{\epsilon_{r0} - 1}{\epsilon_r - 1} \right) \left( \frac{t}{t_0} \right) V_0 + \left\{ \frac{dt}{\epsilon_o(\epsilon_r - 1)} \right\} X \quad (4)$$

이다. 이때  $V_0$ ,  $\epsilon_{r0}$  와  $t_0$ 는 외부전장만 주어졌을 때의 압전박막에 걸리는 전압과 비유전율 및 두께이다. 또한 응력에 대한 두께의 변화는 작다고 하면 두께  $t \approx t_0$ 로 된다.

여기서 유전체내에서 응력에 대한 유전율의 응력계수  $\delta$ 를 가정하여 정의하면 다음과 같다. 유전율의 응력계수  $\delta$ 는

$$\delta \equiv \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial X} \quad (5)$$

이다. 만약  $\delta$ 가 매우 작으면, 유전율  $\epsilon_r$ 은

$$\epsilon_r \approx \epsilon_{r0}(1 + \delta X) \quad (6)$$

로 표현된다.

식 (4)에 식 (6)의 결과를 대입하고,  $1 \gg \delta X + 1/\epsilon_{i0}, (\epsilon_{i0} + 1)/\epsilon_{i0} \cong 1$ 라 가정하면, 전압  $V$ 는

$$V \cong (1 - \delta X) V_0 + (1 - \delta X) \frac{dX}{C_{i0}} \quad (7)$$

로 단순화 된다.

MOSFET의 문턱전압  $V_{T0}$ 는

$$V_{T0} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox} + Q_{BM}}{C_{i0}} + 2\phi_F \quad (8)$$

이다. 여기서  $\phi_{ms}$ 는 금속과 반도체간의 일함수이고,  $2\phi_F$ 는 강반전시의 표면전위이다. 또한  $Q_{ss}$ 는 반도체와 산화막사이의 계면전하이고,  $Q_{ox}$ 는 산화막내의 전하이며,  $Q_{BM}$ 은 채널에서의 결핍영역 전하이다.

PSFET의 문턱전압  $V_T$ 는

$$\begin{aligned} V_T &= V_{T0}' + V_p \\ &= \phi_{ms} - \frac{Q_t}{C_i} + 2\phi_F + V - V_0 \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서  $V_p$ 는 압력에 의한 압전위이다. 식 (9)에서  $C_i$ 성분은 산화막과 ZnO의 합이므로 문턱전압  $V_T$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_T &= V_{T0} + V_0 \delta X + V - V_0 \\ &\cong V_{T0} + \frac{dX}{C_{i0}} (1 - \delta X) \\ &= V_{T0} + \gamma X \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 PSFET의 포화영역 드레인 전류식에 대입하면

$$I_D = \frac{\beta}{2} \{V_G - V_T\}^2 = \frac{\beta}{2} \{V_G - V_{T0} - \gamma X\}^2 \quad (11)$$

이다. 식 (11)의 양변에 제곱근을 취하면

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} (V_G - V_{T0} - \gamma X) = a - bX \quad (12)$$

이다. 여기서

$$a = \sqrt{\frac{\beta}{2}} (V_G - V_{T0}), \quad b = \gamma \sqrt{\frac{\beta}{2}} \quad (13)$$

이다.

식 (12)에서와 같은  $\sqrt{I_D} - X$ 의 선형관계는 1차 근사가 성립되는 응력의 제한된 범위에서만 만족되며 그 감도는

$$\left\{ \frac{\partial \sqrt{I_D}}{\partial X} \right\}_V = -\gamma \sqrt{\frac{\beta}{2}} \quad (14)$$

이다.

### III. 실험

제조된 FET소자에 ZnO 박막을 성막하기위해 RF 마그네트론 스퍼터장치(APEX CO.,Korea)를 사용하였으며, 기판으로는 약 600Å의 열산화막이 성장되어 있고 비저항이 2-5Ωcm인 P형 Si기판을 사용하여 예비실험을 하였다. ZnO 타겟은 순도가 5N(Cerac Co.,USA)이고, 직경이 3인치였으며, 반응가스는 아르곤을 사용하였다. 압전박막의 최적 증착조건을 찾기위해 작업 분위기는 5mtorr, 분위기가스인 Ar은 3.4sccm으로 고정시키고, RF전력은 80~140watt, 기판온도를 60°C ~ 300°C까지 변환시키면서 ZnO박막을 성막하였다. 증착된 막의 열처리온도는 상온에서 700°C까지 산소분위기에서 1시간 동안 행하였다.

증착된 ZnO박막의 두께 및 굴절율을 Ellisometry (Gaertner Co, L116B, USA)로 조사하였고, 기판온도와 열처리온도에 따른 ZnO박막의 결정구조변화를 분석하기 위해 XRD(RADIII, Rigaku, Japan)와 막의 조성비를 조사하기 위해 AES(Perkin- Elmer Co. ϕ-660, USA)분석을 하였다. 압력변화에 따른 용량성분의 변화와 flat- band 전압의 변화를 1MHz C meter(Hewelt Packard Co., HP4280A,USA)와 소자에서의 문턱전압의 이동을 HP4145B로 측정하였다.

PSFET의 제조공정은 다음과 같다. 바탕소자의 금속전극을 예칭한 후 RF 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하여 게이트 산화막위에 약 0.5 μm의 박막을 성막하였으며, 산소분위기에서 1시간동안 400°C에서 열처리하였다. 다시 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 실리콘 산화막을 약 1000 Å 증착하였다. 이 산화막은 금속과 압전박막사이의 누설전류를 방지하고, Al 식각시 압

전박막을 보호하기 위한 것이다. 마지막으로 열진공증착에 의해 약  $0.6\mu\text{m}$ 의 Al을 증착한 후 이를 질소 분위기에서 1시간동안  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 열처리를 했다.

#### IV. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 압전박막 형성장치의 증착률은 RF power 140watt, 기판온도  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 약  $125\text{ \AA}/\text{min}$ 로 나타났다.

기판 온도에 따른 ZnO 박막의 결정상을 X선 회절 (Jeol Co. JDX8030, Japan)분석장치로 조사한 결과는 그림 2에서와 같다. 기판온도가  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 에서는 거의 비정질상이었고, 온도가 증가함에 따라 (002) 피이크가 증가했다. 박막은  $300\text{ }^\circ\text{C}$  일때 가장 큰 (002) 피이크가 나타났다.

일반적으로 박막증착시에는 박막내에 응력이 생기며, 이를 제거하기 위해서는 열처리가 필요하다. 그러나 열처리온도에 따라 증착된 박막의 결정상은 전이가 일어날 수 있다. 열처리온도를  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $700\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 변화함에 따라 증착된 ZnO 박막의 결정상의 변화는 그림 3에서와 같다. 열처리 온도가  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 가장 큰 (002)피이크를 나타내었으며,  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 이상에서는 열처리 온도가 증가함에 따라 (002)피이크가 감소하였다. 이 현상은 막의 두께나 제조방법에도 의존성을 가지며 그림 3에서는 ZnO막의 두께가 약  $1000\text{ \AA}$  정도로 박막

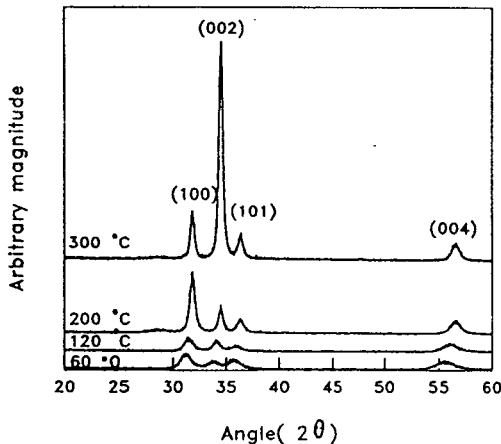


그림 2. 기판온도에 따른 ZnO 박막의 XRD 상.  
Fig. 2. XRD patterns of the ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering at different substrate temperature.

화되어 있어 비교적 낮은 온도에서 C-축 배향성을 나타내는 (002)피이크의 상변화가 나타났다.

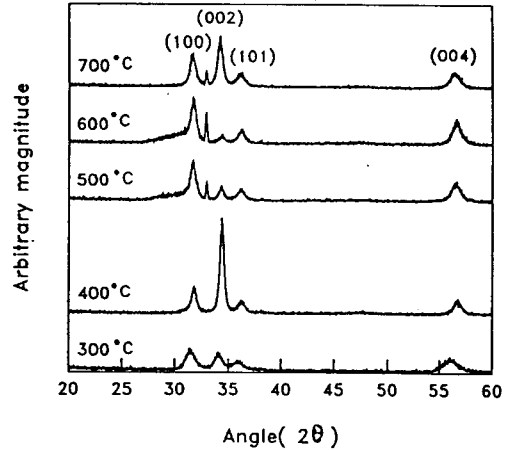


그림 3. 열처리온도에 따른 ZnO 박막의 XRD 상  
Fig. 3. XRD patterns of the ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering at annealing temperature.

증착된 ZnO박막의 AES 분석결과는 그림 4에서와 같다. 이때의 박막 증착조건은 RF 전력이 140 W, 기판온도는  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , Ar 양은 3.4 sccm, 작업 분위기는 5 mtorr이었다.

표면에서부터 벌크까지의 조성상태는 비교적 일정하였고, Zn와 O의 조성비를 원자농도로 환산한 결과 Zn가 약 57%, O는 약 30%로 산소가 결핍된 조성비를 나타내어 후속 열처리공정은 산소분위기에서 수행하였다. ZnO의 4-point probe 측정 결과(약  $3.3 \times 10^7 \sim 4.4 \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ) 높은 저항률이 나온 것으로 보아 비록 조성비는 정확히 맞지 않았으나 높은 압전성을 가질것으로 생각된다.

이상의 결과에서 RF 전력을 140 W, 분위기압을 5

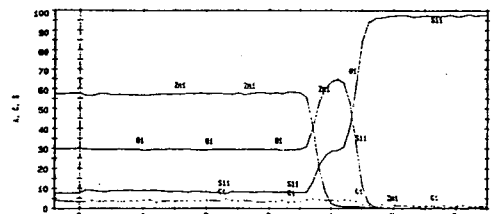


그림 4. ZnO 박막의 AES 깊이 방향 분석.  
Fig. 4. AES depth profile of ZnO thin films.

mtorr, 기판온도가 300 °C 일때, Ar분위기에서 증착한 ZnO박막을 400 °C에서 열처리를 행한 막 제조조건이 균질을, 두께의 균일성, C-축 배향성, 누설전류 등의 전기적, 물리적 특성조사 결과<sup>[8]</sup> 가장 좋은 특성을 나타내었다.

압전박막의 전기적 특성을 조사하기 위해 지름이 0.8 mm인 링 형태의 MIS 캐패시터를 제조하고 그림 5에서와 같이 C-V특성을 측정하였다. 또한 대기압 ( $1.013 \times 10^5$ Pa)에서  $9 \times 10^5$  Pa 까지 압력을 변화시키면서 C-V 특성의 변화를 측정하였다. 압전박막을 증착한 캐패시터의 고주파특성은 양호하게 나타났으며, 압력이 증가함에 따라 캐패시턴스도 증가하였다. 0 V근처에서의 비정상적인 캐패시턴스값은 SiO<sub>2</sub>/ZnO /SiO<sub>2</sub>/Si 구조의 캐패시터 시료에서의 계면상태가 좋지 않아 발생된 누설전류의 영향으로 생각되며, 이에 대한 이론적 접근연구를 현재 진행 중에 있다.

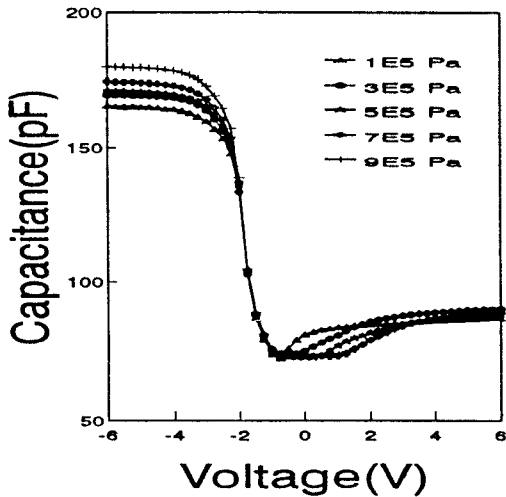


그림 5. 압력변화에 따른 ZnO MIS 캐패시터의 고주파특성.

Fig. 5. High frequency characteristics of ZnO MIS capacitor with pressure variation.

그림 6은 ZnO 박막을 약 0.5 $\mu$ m 증착한 PSFET의 압력에 따른 입·출력 특성이다. 그림 6(a)에서 압력에 따른 문턱전압의 이동은 ZnO박막의 분극에 의한 압전 위 발생에 의한 것이다. 그리고 그림 6(b)는 게이트전압을 0.5V에서 2.5V까지 0.5V씩 증가시키면서 측정된 출력특성이다. PSFET에 대기압( $1.013 \times 10^5$ Pa)에서  $4 \times 10^5$ Pa까지 압력을 변화시켰을때 압력의 변화에 따라 드레인전류가 변함을 볼 수 있다.

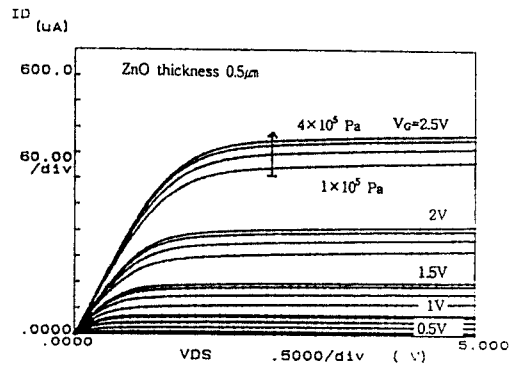
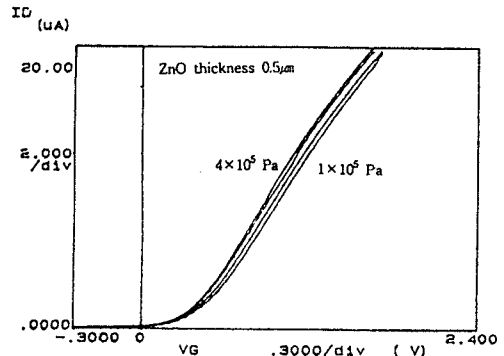


그림 6. 압력에 따른 PSFET의 입·출력특성.  
(a)  $I_D$ - $V_D$ , (b)  $I_D$ - $V_G$ .

Fig. 6. Input and output characteristics of PSFET with pressure dependence  
(a)  $I_D$ - $V_D$ , (b)  $I_D$ - $V_G$ .

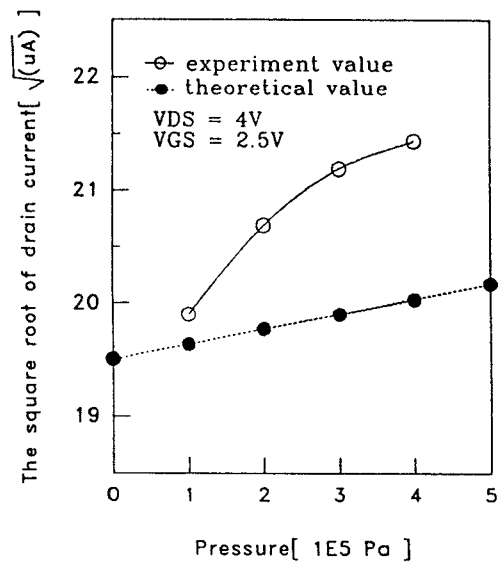


그림 7. PSFET의  $\sqrt{I_D}$ -압력 특성곡선.

Fig. 7.  $\sqrt{I_D}$ -Pressure characteristics of PSFET.

PSFET의 출력특성곡선에서 압력에 대한 드레인 전류의 제곱근의 변화는 그림 7에서와 같다. 이때 게이트 전압은 2.5 V였으며, 드레인과 소오스의 전압차는 4 V이다. 기울기는 거의  $4.6 \times 10^{-9} \sqrt{A/Pa}$  이다. 이 결과는 ZnO두께가 0.55  $\mu\text{m}$ , SiO<sub>2</sub>가 각각 500Å과 0.12  $\mu\text{m}$  이고, ZnO의 비유전율을 8, 소자채널의 길이와 폭을 400  $\mu\text{m}$ 과 20  $\mu\text{m}$ 하고, 압전상수를 벌크에서의 값인 12.4pC/N으로 하였을 경우와 비교하면 거의 비슷한 값을 가짐을 알 수 있었다. 그리고 실험치가 이론치 보다 감도가 떨어지는 이유는 PSFET의 게이트막 구조가 다층화됨에 따라 SiO<sub>2</sub>/ZnO의 계면상태의 열화 및 ZnO박막의 c-축 배향성이 충분하지 못함으로 생각된다.

## V. 결 론

MOSFET의 게이트 산화막내에 압전체인 ZnO 막을 형성하고, ZnO 박막의 압전효과와 MOSFET의 전장효과를 결합한 새로운 형태의 PSFET 압력센서를 제조하고, 그 동작 특성을 조사하였다.

두께가 0.5 $\mu\text{m}$ 인 ZnO 박막의 형성조건은 RF전력이 140 W, 분위기압이 5 mtorr, Ar흐름량은 3.4 sccm, 기판온도는 300 °C일때 가장 좋은 c-축 배향성을 갖고 증착되었다.

제조된 압력센서는 게이트 전압이 2.5 V이고, 드레인과 소오스간 전압이 4 V일때 대기압인  $1.013 \times 10^5$  Pa 에서  $4 \times 10^5$  Pa 까지 압력 변화에 따른 드레인 전류값 변화를 조사하였다. 드레인 전류의 제곱근과 압력과의 관계에서 그 기울기는 약  $4.6 \times 10^{-9} \sqrt{A/Pa}$ 로 나타났으며, 이론치에 비해 감도가 다소 낮게 나타났다. 이의 보완을 위해 막 형성조건을 제고 및 제조된 막에 추가적인 분극처리를 행하여 다결정상을 단결정상으로 전이시키면 높은 압전상수 및 압전위를 얻을 수 있을 것으로 본다. 또한 이와 병행하여 타 강유전체 압전박막의 이용에 관한 지속적 연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 전공정이 플레나기법으로 제조될 수 있는 새로운 형태의 반도체 FET형 압력센서를 제조하고 그 동작특성을 조사한 결과 그 가능성을 확인하였으며 제기된 문제점들에 대한 지속적인 연구가 수행된다면 주변회로와의 집적화 및 복합센서화 등의 응용성이 매우 클 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. S. Muller and J. Conragan, "A Metal-Insulator-Piezoelectric Semiconductor Electromechanical Transducer," IEEE Trans. on E. D., Vol.ED-12, No.11, pp. 590-595, 1965.
- [2] S. Middelhock and S. A. Audet, Silicon sensors, Academic Press, pp.125-149, 1989.
- [3] C. J. Van Mullem and M. Elwenspoek, "Piezoelectrically Driven Silicon Beam Force Sensor," Sensors and Actuators, Part A, No. 25, pp. 379-383, 1991.
- [4] V. Mosser, J. Suski and Goss, "Piezoresistive Pressure Sensors based on Polycrystalline Silicon," Sensors and Actuators, Vol. A, No. 28, pp. 113-132, 1991.
- [5] H. Kuisma, A. Lehto and J. Lahdenper, "A New Family of Silicon Capacitive Pressure Sensor," in Proc. Sensor'88, Nuremberg, Germany, pp. 479-494, 1988.
- [6] 박창엽, 압전세라믹스, 김영출판사, 1987.
- [7] T. Masuhara and R. S. Muller, "Analytical Technique for the Design of DMOS Transistors," in Proc. Solid State Devices, The 8th Conference, Tokyo, Part A-3, pp. 173-178, 1976.
- [8] 양규석, "ZnO 압전박막을 이용한 감압전장효과 트랜지스터(PSFET)의 제조 및 그 특성," 석사학위논문, 경북대학교, pp. 21-27, 1995.

著 者 紹 介



**梁 奎 錫**

1967년생. 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 경북대학교 전자공학과 석사과정 졸업(공학석사). 현재 (주)현대전자 연구원. 주관심분야 : 반도체 압전센서, 압전물질.

**趙 炳 郁**

「센서학회지 제1권 제1호」 논문 92-12, p. 106 참조.  
현재 경북대학교 전자공학과 박사과정.

**權 大 赫**

「센서학회지 제2권 제2호」 논문 93-2-2-04, p. 29 참조.  
현재 경북산업대학교 전자공학과 조교수.



**南 基 泓**

1951년생. 1975년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982년 경북대학교 대학원 석사과정 졸업(공학석사). 1989년 경북대학교 박사과정 졸업(공학박사). 1979년 ~ 현재 경북산업대학교 교수. 주

관심분야 : 박막공학(광도전막), 센서공학(CO가스센서, 알콜센서)

**孫 炳 基**

「센서학회지 제1권 제1호」 논문 92-10, p. 92 참조.  
현재 경북대학교 전자공학과 교수, 센서기술연구소장.