

SiN_x/Si 기판에 제조된 후막 PZT의 횡 압전 계수 ($e_{31,f}$) 측정

전창성, 박준식[†], 이상렬[‡], 강성균[§], 이낙규^{||}, 나경환[¶]
전자부품연구원, 연세대학교[‡], 한양대학교[§], 생산기술연구원^{||}

Measurement of Effective Transverse Piezoelectric Coefficients ($e_{31,f}$) of Fabricated Thick PZT Films on SiN_x/Si Substrates

Chang-Seong Jeon, Joon-Shik Park[†], Sang-Yeol Lee[‡], Sung-Goon Kang[§],
Nak-Kyu Lee^{||}, and Kyoang-Hwan Na[¶]
KETI, Yonsei Uni.[‡], Hanyang Uni.[§], KITECH^{||}

Abstract

Effective transverse piezoelectric coefficients ($e_{31,f}$) of thick PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$) films on SiN_x/Si substrates were measured with PZT thicknesses and top electrode dimensions. $e_{31,f}$ is one of important parameters characterizing piezoelectricity of PZT films. Thick PZT films have been used as various sensors and actuators because of their high driving force and high breakdown voltage. Thick PZT films were fabricated on Pt/Ta/SiN_x/Si substrates using sol-gel method. Thicknesses of PZT films were 1 μm and 1.8 μm . $|e_{31,f}|$ values of 1.8 μm -thick-PZT films were higher than those of 1 μm -thick-PZT films. Maximum $|e_{31,f}|$ of 1.8 μm -thick-PZT films was about 50 C/m².

Key Words : Transverse piezoelectric coefficient (횡 압전 계수), Thick PZT Film (후막 PZT), Sol-Gel method (졸-겔 증착법), MEMS (Microelectromechanical system)

1. 서 론

MEMS (Microelectromechanical System) 기술이 급속히 보급되면서 각종 센서와 마이크로 구동기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. MEMS 소자의 구동 방식에는 정전기력을 이용한 방법, 열적, 자기적 특성, 또는 압전 특성을 이용한 방법 등이 있는데 그중에서도 특히 압전 특성을 이용한 디바이스는 소비전력이 작고 큰 구동을 얻을 수 있는 장점이 있어서 최근 많이 응용되고 있다. 현재까지 알려진 물질 중에서 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT)가 가장 높은 압전 특성을 보이고 가장 많이 응용되고 있다. 소자의 크기가 점차 소형화되면서 박막 또는 후막을 성장시키면서도 가능하면 벌크

세라믹 PZT의 특성을 유지하려는 연구가 계속되고 있으며 magnetron sputter[1], PLD (pulsed laser deposition)[2], Sol-Gel법[3], CSD (chemical solution deposition)[4] 등의 방법을 이용하여 PZT 막을 성장시키는 연구가 다양하게 수행되고 있다.

압전 재료의 특성을 표현하고 성능을 나타내는 방법으로 여러 계수들이 사용되고 있는데 전기기계 결합 계수 (k_p), 종 압전 계수 (d_{33} , e_{33}), 횡 압전 계수 (d_{31} , e_{31}) 등이 가장 많이 사용되는 계수들이다. 벌크 세라믹 압전 재료의 경우에는 d-factor (단위: C/N)로써 압전 특성을 정의하지만 박막 또는 후막의 경우에는 e-factor (단위: C/m²)를 이용하여 특성을 나타낸다. e_{31} 의 측정은 다양한 방법으로 진행되고 있다[5][6][7]. 박막으로 진행하기 위해서는 중요한 과제 중의 하나는 압전 물질을 지지

[†] Corresponding author: jspark@keti.re.kr

해주는 supporting layer인데 SiN_x의 경우 높은 경도 (1300 ~ 2000kg/mm²), 높은 파괴 강도 (1000 ~ 1400 MPa) 등의 특성으로 미세 소자의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 SiN_x를 기지 재료로 사용하여 e_{31,f} 측정용 시편이 PZT 두께 1 μm 및 1.8 μm의 두 종류로 제조되고 측정되었다.

2. 실험 및 이론

2.1 시편 제작 및 분석

2 μm 두께의 low-stress SiN_x 층이 입혀진 500 μm 두께의 단결정 (100) 실리콘 웨이퍼를 이용하여 제조되었다. 하부 전극으로는 Pt/Ta (200/20 nm)가 사용되었고, 그 위에 Zr/Ti 비율이 52/48 조성을 가지는 PZT가 1 μm 및 1.8 μm 두께로 sol-gel 법으로 제작되었다. 상부 전극으로는 Pt가 200 nm 두께로 증착되었다. 그림 1에 시편 제조 공정과 시편의 형상을 나타내었다. 상부 전극과 PZT 막의 에칭에는 ICP RIE (inductively coupled plasma reactive ion etch)가 이용되었다.

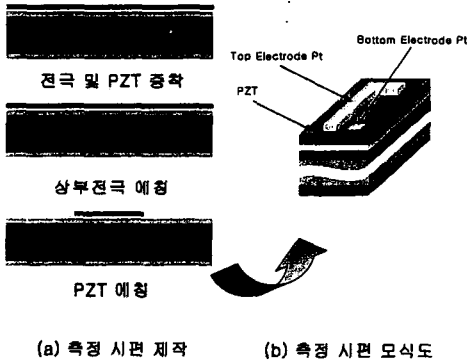


그림 1. e_{31,f} 측정용 시편 제작 공정 및 모식도

2.1 e_{31,f} 측정 장치 및 이론

측정에 사용된 장치를 그림 2에 나타내었다. 압전 구동기에 의해 시편에 응력을 인가하고 상부와 하부 전극에 연결되어 있는 charge amplifier에서 증폭된 신호가 오실로스코프에 전압 값으로 나타내게 된다. 이 측정된 값과 시편의 형상으로부터 주어진 값을 이용하여 횡 압전 계수가 계산되었다. 실험으로부터 얻어진 전하량과 e_{31,f}와의 관계는

M. A. Dubois 등이 제시한 cantilever형 시편의 변형에 대한 방정식으로부터 유도되었다[5].

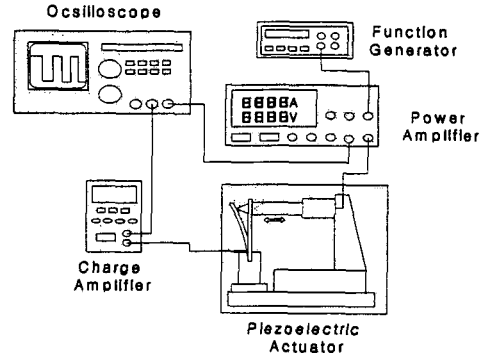


그림 2. e_{31,f} 측정 장치의 개략도

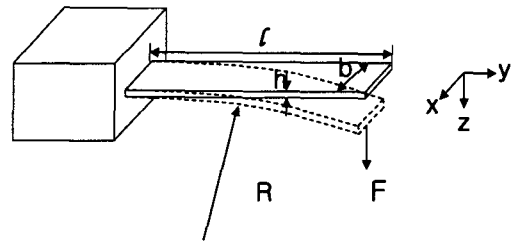


그림 3 e_{31,f} 측정용 cantilever의 구조

그림 3에서와 같은 시편의 변형에서 PZT 막의 두께가 균일하고, 전기장이 z축 방향으로 인가된다고 가정하고 인가된 전기장 (E₃)과 변형 요소 (T_i)의 함수로 나타내면 다음과 같은 연속 방정식을 얻을 수 있다.

$$D_3 = \epsilon_0 \epsilon_{33} E_3 + d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33} T_3 \quad (1)$$

$$\xi_1 = s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (2)$$

$$\xi_2 = s_{12}^E T_1 + s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (3)$$

여기서 D₃는 전기적 변위, ε₃₃은 상대 유전율, s_{ij}^E는 탄성 계수를 의미하고 ξ_i는 응력 성분이다. 시편은 구조상 z 축으로의 변형만 발생하고 따라서 z 축 방향의 응력 성분은 항상 0이 된다. 또 측정 시에는 전계가 0인 상태에서 측정되므로 E₃도 0으로 둘 수 있다. 식(1)에서의 응력 성분은 (2), (3)의 응력 성분의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$T_1 + T_2 = (\xi_1 + \xi_2) / (s_{11}^E + s_{12}^E) \quad (4)$$

(1)과 (4)식으로부터 e_{31,f}을 유도할 수 있다.

$$D_3 = \frac{d_{31}}{(s_{11}^E + s_{12}^E)} (\xi_1 + \xi_2) = e_{31,f} (\xi_1 + \xi_2) \quad (5)$$

압전 막이 얇아짐에 따라 응력 성분 ξ_1 과 ξ_2 는 전체 두께에서 표면의 성분과 같다고 할 수 있고 이것은 기지 재료의 Poisson's coefficient ν_c 로 연결될 수 있다. 즉,

$$D_3 = e_{31,f} (1 - \nu_c) \xi_1 \quad (6)$$

Cantilever의 z 축으로의 변형은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$z = \frac{F}{6YI} (3lx^2 - x^3), \quad I = b \frac{h^3}{12} \quad (7)$$

여기서 F는 cantilever에 인가되는 힘이고, l, b, h는 각각 cantilever의 길이, 폭, 두께를 의미한다. 또 Y는 Young's modulus를 나타낸다. 최대 변위 z_l 은 $x=l$ 인 경우에 나타난다.

$$z_l = \frac{Fl^3}{3YI} \quad (8)$$

식 (7), (8)을 고려하여 cantilever의 곡률 반경을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2z}{dx^2} = \frac{3z_l l(l-x)}{l^3} \quad (9)$$

상부 전극 바로 아래에서 x 축 방향으로의 변형 ξ_1 은 아래와 같다.

$$\xi_1 = \frac{h}{2R} \quad (10)$$

직사각형 모양의 상부 전극을 고려하여 단위 길이 당 전기적 변위 $D_3 = \{Q(x)/w\}/dx$ 로 나타낼 수 있고 이것을 Q에 대한 식으로 풀면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{3e_{31,f} \mu h z_l (1 - \nu_c)}{2l^3} \int_{x_0}^{x_1} (l-x) dx \quad (11)$$

여기서 x_0, x_1 는 전극의 끝단을 의미한다. 이 식으로부터 전하량과 cantilever 끝의 변위, 횡 압전 계수의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$e_{31,f} = \frac{2l^3 Q}{3whz_l (1 - \nu_c) (l(x_1 - x_0) - (x_1^2 - x_0^2)/2)} \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

그림 4에 $e_{31,f}$ 측정용 시편의 실제 사진을 나타내었다. n은 상부 전극의 폭이 좁은 시편, w는 폭이 넓은 시편을 의미한다.

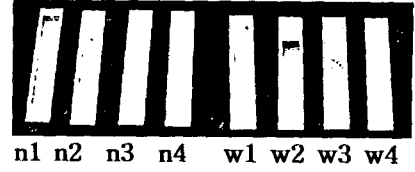
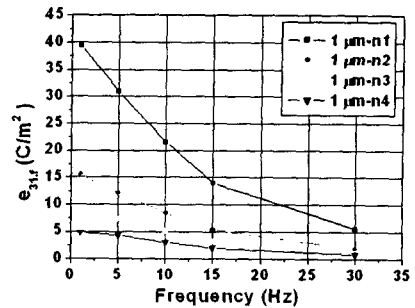
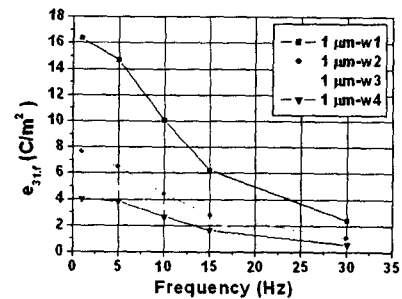


그림 4. $e_{31,f}$ 측정 시편

그림 5와 6에 PZT 두께 1 μm 와 1.8 μm 를 갖는 시편의 주파수에 따른 $|e_{31,f}|$ 측정값을 나타내었다. 계산된 결과 값들은 상대적 비교에 중점을 두었다. 상부 전극의 폭에 대한 $|e_{31,f}|$ 측정 결과는 좁은 시편의 경우 넓은 시편에 비해 큰 값을 나타내었는데 이는 계산식 (12)에서 나타난 결과와 일치한다. PZT 두께에 따른 측정 결과는 1 μm 시편에 비해 1.8 μm 시편의 경우 대체로 더 큰 값을 나타내었다. 이것은 박막의 두께가 두꺼울수록 결정 구조의 배향성 등이 변화하고, 이에 따라 유전 특성 등 전기적 특성이 변화하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 이에 대한 상관관계 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

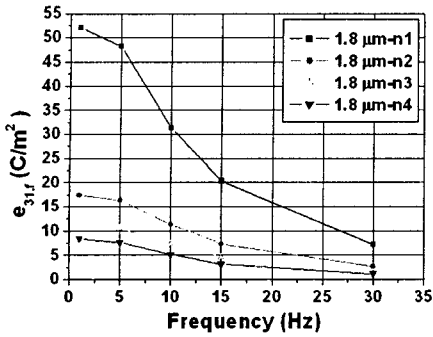


(a)

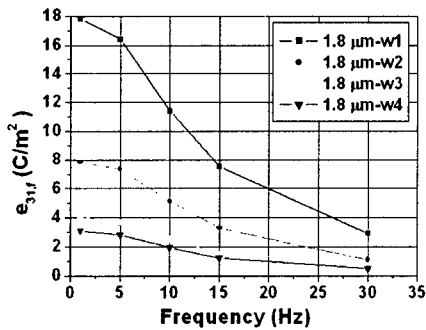


(b)

그림 5. PZT 두께 1 μm 시편의 $e_{31,f}$ 측정 결과



(a)



(b)

그림 6. PZT 두께 1.8 μm 시편의 $e_{31,f}$ 측정 결과

4. 결론

후막 PZT의 횡 압전 계수 ($e_{31,f}$) 측정을 위한 시편이 2 μm low stress SiN_x가 증착된 실리콘 웨이퍼 상에 제조되었다. 하부 전극으로는 200/20 nm 두께의 Pt/Ta 층이 사용되었고 상부 전극으로는 Pt 200 nm가 사용되었다. $|e_{31,f}|$ 측정 결과는 PZT 막이 두꺼운 경우가 높게 나왔다. 이것은 박막의 두께가 두꺼울수록 결정구조의 배향성 등이 변화하고, 이에 따라 유전 특성과 같은 전기적 특성이 변화하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 이에 대한 연구가 따라야 할 것으로 생각되었다. 한편, 상부 전극의 폭이 좁은 시편이 높은 $|e_{31,f}|$ 값을 나타내었다. 이것은 계산식에 의한 예측과 일치하는 결과를 보여주는 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대

신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] E. Cattan, G. Velu, B. Jaber, D. Remiens, and B. Thierry, "Structure control of Pb(Zr,Ti)O₃ films using PbTiO₃ buffer layers produced by magnetron sputtering", *Appl. Phys. Lett.* 70, 1718-1720, 1997.
- [2] C. S. Kim, S. K. Kim and S. Y. Lee, "Fabrication and characterization of PZT-PMWSN thin film using by pulsed laser deposition", *Materials Science In Semiconductor Processing* 5, 93-96, 2003.
- [3] Q. Q. Zhang, S. J. Gross, S. Tadigadapa, T. N. Jackson, F. T. Djuth and S. Trolier-McKinstry, "Lead zirconate titanate films for d₃₃ mode cantilever actuators", *Sens. Actuators*, A105, pp. 91-97, 2003.
- [4] H. Kueppers, T. Leuerer, U. Schnakenberg, W. Mokwa, M. Hoffmann, T. Schneller, U. Boettger and R. Waser, "PZT thin films for piezoelectric microactuator applications", *Sens. Actuators*, A97-98, pp. 680-684, 2003.
- [5] M. A. Dubois and P. Mural, "Measurement of the effective transverse piezoelectric coefficient $e_{31,f}$ of AlN and Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ thin films", *Sens. Actuators*, A77, pp. 106-112, 1999.
- [6] E. Cattan, T. Haccart, G. Vélú, D. Rémien, C. Bergaud and L. Nicu, "Piezoelectric properties of PZT films for microcantilever", *Sens. Actuators*, A74, pp. 60-64, 1999.
- [7] I. Kanno, H. Kotera and K. Wasa, "Measurement of transverse piezoelectric properties of PZT thin films", *Sens. Actuators*, A107, pp. 68-74, 2003.