

Piezoelectric Microspeakers Fabricated with High Quality AlN Thin Film

李承煥[†] · 鄭暉湜^{*} · 金東其^{**} · 愼廣緯^{***}

(Seung-Hwan Yi · Kyung-Sick Jung · Dong-Kee Kim · Gwang-Jae Shin)

Abstract - This paper reports the piezoelectric microspeakers that are audible in open air with high quality piezoelectric AlN thin film deposited onto Mo/Ti electrode. This successful achievement, compared to the previous results, is followed by manipulating two material properties: the one is to use a compressively stressed silicon nitride film as a supporting diaphragm (even tensile stressed, around +20 MPa) and the another is to use high quality AlN thin film with compressive residual stress (less than -100 MPa). With these materials, the Sound Pressure Level (SPL) of the fabricated microspeakers shows more than 60 dB from 100 Hz to 15 kHz and the highest SPL is about 100 dB at 9.3 kHz with 20 V_{peak-to-peak} sinusoidal input and with 10 mm distances from the fabricated microspeakers to the reference microphone (B&K Type 2669 & 4192L).

Key Words : Piezoelectric Microspeaker, AlN Film, Sound Pressure Level, Residual Stress

1. 서 론

스피커는 전기에너지를 음성에너지로 변환시키는 전기 기계적 (electromechanical) 변환기 (transducers)로 가전제품뿐만 아니라 자동차, 방송 및 통신과 특히 휴대전화기 등에 광범위하게 사용되고 있어, 스피커의 시장은 정확한 산출이 어려운 정도로 방대하게 형성되고 있다. 비록 기존의 오디오 시장에서의 스피커의 시장성은 한계점에 다다랐으나, 이동통신 단말기 (cellular phone)와 PDA 등의 모바일 기기에 사용되는 스피커의 수요는 날로 급증하고 있는 추세이다. 또한 현재 각종 전자제품은 경박단소화를 추구하고 있으며, 이에 따라 국내외 스피커 생산 업체들은 소형 경량화의 기술 개발에 초점을 맞추고 있다. 기존 전동형 스피커 (electrodynamic speaker)의 경우, 2 V 미만의 저전압에서 큰 음압을 발생하고, 음향 특성의 우수성을 보유하고 있으나, 스피커의 구동을 위한 영구자석의 두께를 2mm 이하로 줄이면 자기장의 크기도 함께 줄어들어 축소의 한계가 있으며, 그 구조 또한 복잡하다는 단점을 보유하고 있어 새로운 기술에 의한 스피커의 개발과 상용화를 위한 노력이 요구되고 있다.

최근 MEMS (MicroElectroMechanical Systems) 기술을 이용

한 음향소자의 연구개발이 가속화되어 마이크로폰의 경우, 실리콘 용량형 (silicon capacitive) 구조가 이동통신 단말기에 적용되고 있으며, MEMS 기술에 의한 마이크로스피커는 연구 단계에 있다. MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커 중, CMOS 기술을 응용하여 디지털 음향의 재현을 위해 제시된 마이크로스피커는 그 구동전압이 높아 (약 100 V_{peak-to-peak}) 실용성 면에서 뒤떨어지는 큰 단점[1]이 있는 반면, 압전형 MEMS 마이크로스피커는 구조가 간단할 뿐만 아니라[2], 구동전압이 CMOS 기술을 이용한 스피커보다 낮고 (약 20 V_{peak-to-peak} 이하), 스피커 구동을 위한 압전 박막 (ZnO, AlN, PZT 등)에 대한 그 물성이 비교적 잘 알려져 있어, 차세대 박막형 스피커로서의 관심이 증가되고 있다.

한편 MEMS 기술을 이용한 압전 음향소자 (piezoelectric acoustic devices)는 대부분 ZnO 박막을 사용하였으나[2, 3], 최근에 PZT를 이용한 연구도 진행되고 있고[4], AlN 박막을 이용한 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)가 제일 먼저 상용화되어 이동통신 단말기에 적용됨으로 인해 압전소자를 위한 AlN 박막 물성[5,6]과 이의 MEMS 소자로서의 응용[7]에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 전동형 스피커가 갖고 있는 단점을 보완하고, 시대적 조류인 박막형 스피커의 제작 및 특성해석을 위하여 Mo/Ti 전극 위에 증착된 고품질의 압전형 AlN 박막을 이용한 압전 마이크로 스피커를 제작하고, 그 특성을 살펴봄으로써 차세대 음향소자로서의 응용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 구조분석

그림 1은 Mo/Ti 전극에 증착된 AlN 박막의 구조적 특성

[†] 교신저자, 正 會 員 : 忠州大學校 工大 機械工學科 助敎授 · 工博

E-mail : isaac_yi@cjnu.ac.kr

^{*} 學生會員 : 忠州大學校 工大 機械工學科 碩士課程

^{**} 正 會 員 : 大進電子(株) 研究所 課長

^{***} 非 會 員 : (株)엠에스솔루션 研究所 次長

接受日字 : 2007年 6月 11日

最終完了 : 2007年 7月 11日

분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 1의 (a)는 Mo/Ti 이중막 위에 증착된 압전 박막의 단면 SEM 사진을 나타낸 것으로, 증착된 AlN 박막은 기판에 수직인 주상 구조 (columnar structure)를 갖고 있음을 볼 수 있으며, 결정립의 크기는 직경 100 nm 이하의 미세구조를 나타내고 있다. 그림 1 (b)는 Mo/Ti 이중막 위에 증착된 AlN 박막의 XRD 스펙트럼이다. 증착된 AlN 박막은 2 theta가 약 36도에서 기판에 수직인 AlN(002) 방향[5]을 갖는 박막이 증착되어 있음을 볼 수 있고, 측정된 XRD 스펙트럼의 피크 강도 (intensity)가 큰 것으로 보아 압전 특성이 우수[8]할 것으로 판단된다.

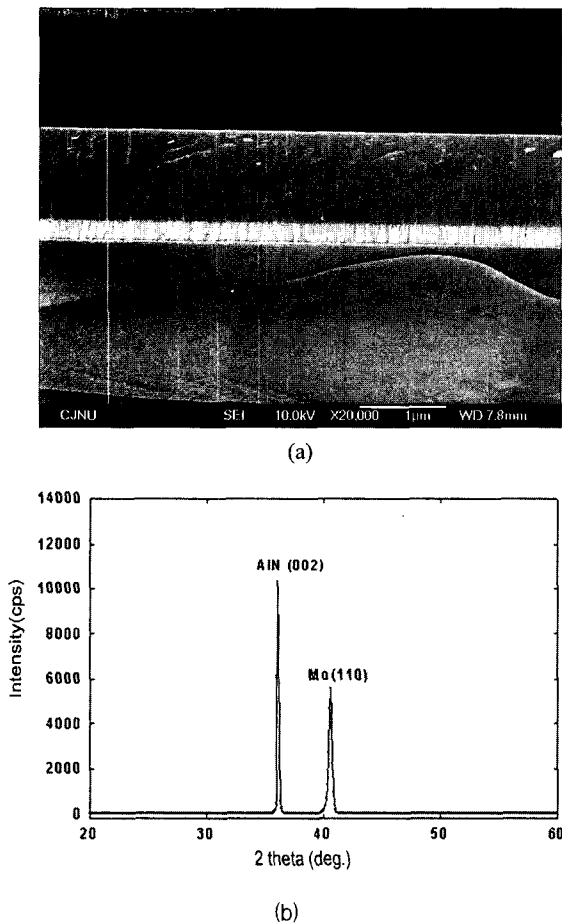


그림 1 질화알루미늄 박막의 구조분석: (a) SEM 단면사진, (b) XRD 스펙트럼.

Fig. 1 Structural analysis of AlN thin film: (a) Cross-sectional SEM photo, (b) XRD spectrum.

2.2 압전 마이크로스피커 제작 공정

그림 2는 압전 마이크로스피커의 공정 순서도를 나타낸 것이다. 양면 폴리싱 된 4 인치 (100) 실리콘 웨이퍼 세척 후, 온도 830 °C, 압력 20 torr에서 Si₂H₆과 NH₃를 사용하여 저응력의 실리콘 질화막 (Low-stressed SiN)을 1 μm 증착하였으며, 마이크로스피커의 제작 과정에서 증착되는 각 박막의 잔류응력을 측정하기 위하여 웨이퍼 가장자리에 다이아몬드 연필을 사용하여 번호를 매겼다.

하부 및 상부의 전극물질로 Mo/Ti를 각각 2000 Å/200 Å 증착 후 첫 번째 마스크를 사용하여 포토레지스트 패터닝을 실시하였으며, RIE (Reactive Ion Etching) 장비를 사용하여 전극부 이외의 Mo/Ti 이중층을 식각 하였다. 압전 박막으로 사용하게 된 AlN는 R.F. Magnetron sputtering 장비를 사용하여 Ar-N₂ 혼합가스 (가스비=1:4)와 R.F. 전력 70 W, 척 높이가 3.1인치에서 AlN를 0.5 μm 증착하였고, 두번째 마스크를 사용하여 패터닝 후 하부 전극의 접촉부를 노출시키기 위하여 RIE 장비를 이용하여 AlN 박막을 식각하였다. 한편 상부 전극은 하부전극의 형성과 동일한 공정을 수행한 후, 세번째 마스크를 사용하여 패터닝 및 식각과정을 통해 상부 전극을 완성하였다. 실리콘 식각 후 형성되는 다이어프램의 기계적 특성을 보완하기 위하여 Parylene 증착 장비를 사용하여 웨이퍼의 전면에 약 1 μm의 Parylene-C 증착 하였다. Parylene-C의 패터닝을 통한 상부와 하부전극 접촉부를 확보하기 위한 과정으로 Al 박막을 E-Beam Evaporator 장비를 이용하여 1시간 동안 약 2,000 Å 증착한 뒤, 포토레지스트 패터닝 및 Al 습식 식각 과정을 통하여 접촉부 위의 Parylene-C를 노출시킨 다음, 산소 플라즈마내에서 Ashing을 통하여 노출된 Parylene-C를 제거함으로써 전극부를 형성을 완료하였다. 이때 패터링 Ashing을 위해 사용된 Al 박막은 KOH: K₃Fe(CN)₆: H₂O (1g: 10g: 100ml) 용액을 이용하여 제거하였다.

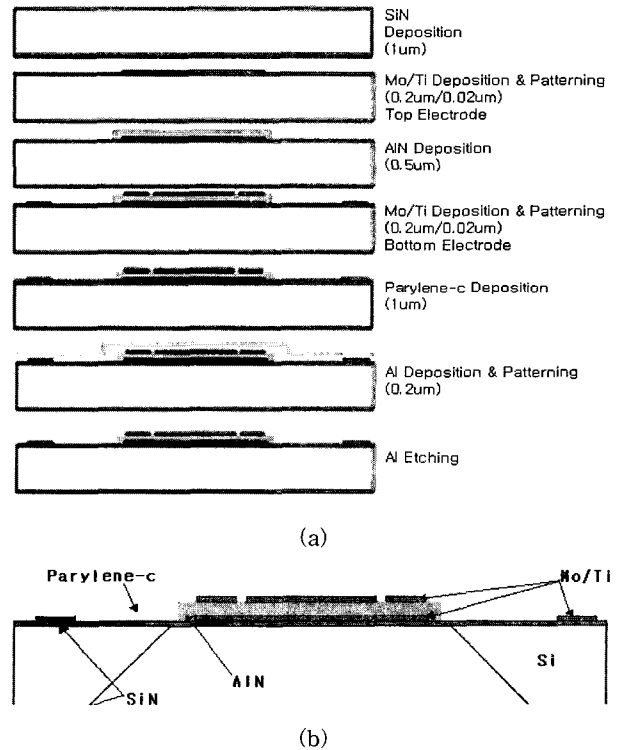


그림 2 압전 마이크로스피커의 공정도: (a) 마이크로스피커의 공정단계도, (b) 제작된 마이크로스피커의 단면도.

Fig. 2 Process flows of piezoelectric microspeakers: (a) Fabrication processes of microspeakers, (b) cross sectional view of fabricated microspeaker.

Backside 마스크를 이용한 노광공정을 통하여 웨이퍼 이면의 실리콘 질화막 패터닝 및 RIE 식각을 통해 실리콘 제거 영역을 확보하였다. 80 °C, 45 wt% KOH 용액 내에서 실리콘을 식각하는 과정에서 웨이퍼 전면을 보호하기 위한 일환으로 포토레지스트의 코팅과 보호막 처리를 통해 웨이퍼를 보호한 다음 실리콘을 식각하고, 최종적으로 웨이퍼의 세척단계를 거침으로써 압전형 마이크로스피커의 제작 공정을 완료하였다.

2.3 실험 장치 및 방법

그림 3은 제작된 압전형 마이크로스피커 특성을 평가하기 위한 장치의 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

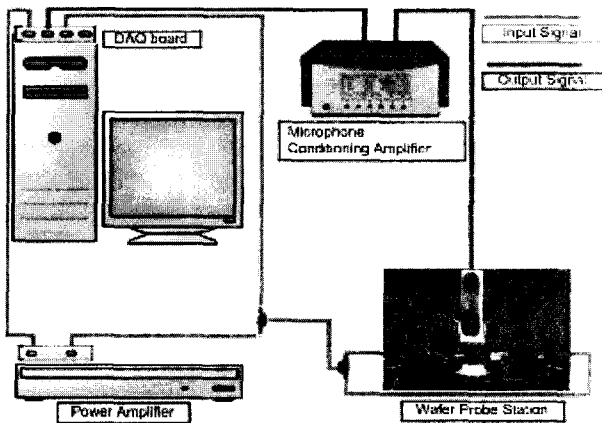


그림 3 마이크로스피커 측정시스템의 블록다이어그램.
Fig. 3 Block diagram of microspeaker testing system.

그림 3에 제시된 바와 같이 NI DAQ Board에서 사인파형의 출력 전압 (5 V_{Peak-to-Peak})을 Power Amplifier를 통하여 20 V_{Peak-to-Peak}로 증폭한 다음, Wafer probe station위에 있는 압전 마이크로스피커에 인가하였다. 이때 인가되는 전압의 피크치와 주파수는 실시간으로 측정되어 NI DAQ 보드에 귀환시킴으로써 입력전압과 주파수를 확인하였다. 또한 압전 마이크로스피커와 기준 마이크로폰 (B&K Type2669 & 4192L)은 약 10 mm 간격으로 위치시켜, 입력주파수 100 Hz에서 15 kHz까지의 인가 주파수에 따른 음압 변화를 측정하여 컴퓨터에 입력 저장하게 함으로써 측정 완료 후 특성평가 자료로 활용하였다. 본 측정에 사용된 마이크로폰의 감도는 1 V/Pa (음압대비 증폭된 전압)을 갖고 있었으며, 측정 변환된 음압신호는 실효값으로 환산한 다음, 아래의 식 (1)을 이용하여 음압으로 변환하였다.

$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{cal}}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

단, P_{cal} 는 측정 계산된 마이크로스피커의 토출 음압 (Pa), P_{ref} 는 기준 음압 (2×10^{-5} Pa)

한편 측정에 사용된 각 샘플은 10 번 이상 측정한 다음, 측정값의 평균을 결과 자료로 활용하였다.

2.4 실험결과 및 검토

압전형 마이크로스피커의 음압특성은 다이어프램의 물질이 보유한 잔류응력에 큰 영향을 받고 있음이 보고된 바 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 마이크로스피커에 제작된 각종 박막의 잔류 응력을 Stoney 방정식[9]으로 알려진 식 (2)에 의하여 추정·계산하였다.

$$\sigma = \frac{E_s \cdot t_s^2}{6(1-\nu)t_f} \left\{ \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_f} \right\} \quad (2)$$

$$E_{silicon} = 1.301 \times 10^5 (MPa), \nu = 0.279 (silicon)$$

- 단, t_s ; 웨이퍼의 두께(μm), t_f 기판과 증착막 두께(μm)
- R_s ; 하부 기판의 곡률반경(m),
- R_f ; 박막을 포함한 기판의 곡률반경(m)

압전 마이크로스피커의 제작에 사용된 각종 박막의 잔류 응력의 측정 결과 (다이어프램의 전체 영역에 균일하게 존재하는 박막들의 잔류응력 측정결과), 실리콘 질화막은 LPCVD 장비 내부의 웨이퍼 위치에 따라 약 +20 MPa에서 -20 MPa의 잔류응력을 나타내었으며, 본 연구 과정에서 사용한 압전 박막인 AIN는 약 -100 MPa, 패럴린 (Parylene)은 +20 MPa의 값을 갖고 있었다.

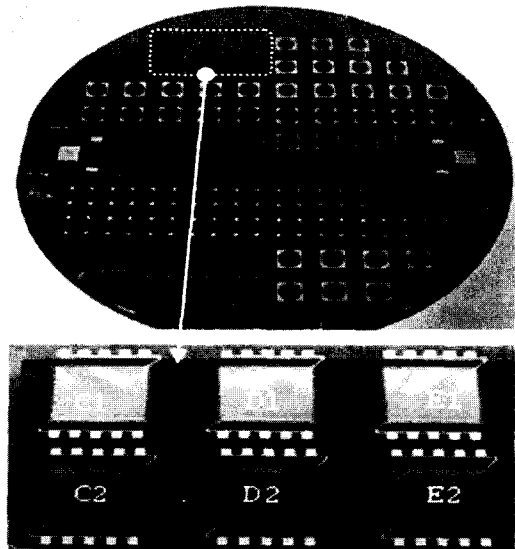


그림 4 4 인치 실리콘 웨이퍼에 제작된 압전 마이크로스피커와 측정에 사용된 시편들.
Fig. 4 Fabricated piezoelectric microspeakers onto 4 inches Si wafer and tested samples.

한편 4 인치 웨이퍼에 제작된 다양한 압전 마이크로스피커 중, 본 연구에서는 그림 4에 제시된 정사각형 모양의 C1, D1, E1 샘플과 C2, D2, E2 샘플에 대하여 성능평가 실험을 실시하였는데, 두 부류의 특징적인 사항은 다음과 같다. 첫째 C1, D1, E1의 소자에서 고품질 압전 박막인 AIN의 면적은 다이어프램 영역 ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) 보다 넓은 $5660 \times 5660 \mu m^2$ 이고, C2, D2, E2 소자에서 압전 박막 한 번의 길이는

4700 μm 로 최종적으로 형성된 다이어프램의 한 변의 길이보다 약간 짧게 하였는데, 이는 마이크로스피커의 능동영역인 AIN 압전 박막의 면적변화에 따른 토출음압에의 영향을 살펴보기 위함이다. 둘째 압전 박막의 구동을 위한 상부와 하부의 전극은 모든 마이크로스피커에서 4500 μm 로 동일하게 형성하였다.

그림 5 는 #8 웨이퍼의 C1, D1, E1과 C2, D2, E2에 대해 100 Hz에서 15 kHz까지 측정된 SPL (Sound Pressure Level) 을 비교한 것이다. 웨이퍼 중앙 쪽에 위치한 E1 보다 웨이퍼 바깥쪽 영역의 C1이 더 우수한 SPL을 보여주고 있음을 알 수 있으며, 그림 5 a)와 b)에서 볼 수 있듯이 AIN 박막의 한 변의 길이가 4700 μm 영역의 샘플들보다 5600 μm 의 샘플들이 월등한 음압특성을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

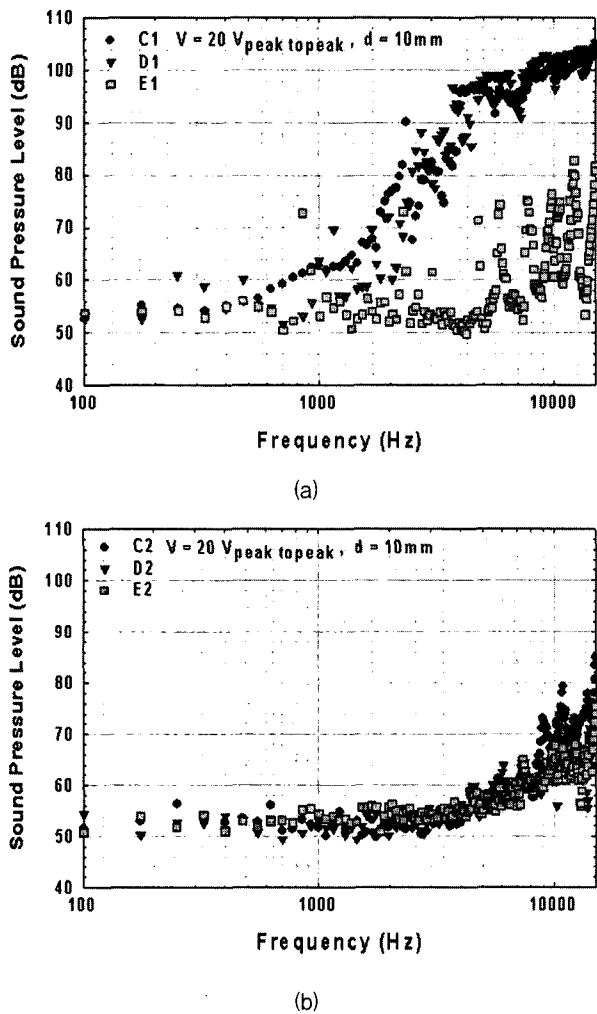


그림 5 #8 웨이퍼에 제작된 마이크로스피커의 음압수준: (a) C1, D1과 E1 시편, (b) C2, D2와 E2 시편.
 Fig. 5 Sound Pressure Level of fabricated microspeakers in wafer #8: (a) Samples named C1, D1, and E1, (b) samples named C2, D2, and E2.

한편 그림 6은 +20 MPa (#8 웨이퍼)에서 -20 MPa (#13 웨이퍼) 사이의 잔류응력을 지닌 실리콘 질화막상에 제작된

마이크로스피커의 음압특성 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 5에 제시한 동일한 구조의 샘플과 비교할 때 잔류응력이 압축상태인 #13 웨이퍼 경우, 인장상태에 있는 #8 웨이퍼 보다 월등이 우수한 음압특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이때 C1 샘플의 경우 100 Hz에서 약 66 dB, 1 kHz에서 72 dB, 9.3 kHz에서 100 dB의 높은 SPL을 갖고 있음을 알 수 있다.

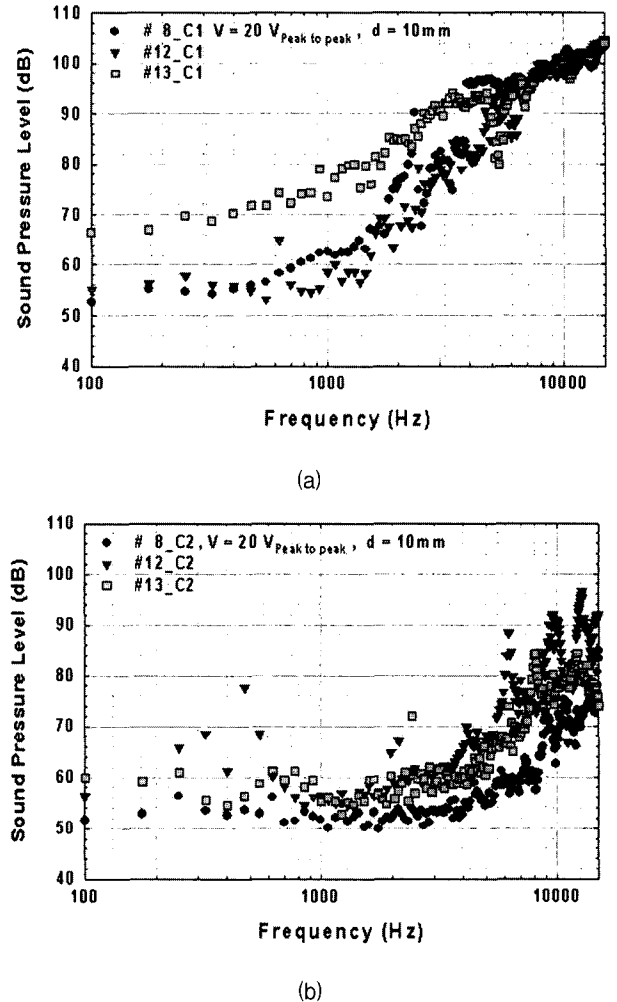


그림 6 상이한 잔류응력을 지닌 다이어프램에 제작된 마이크로스피커 (C1과 C2)의 음압수준: (a) C1 #8 (+20 MPa), #12 (+10 MPa), #13 (-20 MPa), (b) C2 #8, #12 and #13.

Fig. 6 Sound Pressure Level of microspeakers (C1 and C2) fabricated onto the diaphragms that have different residual stresses: (a) C1 in #8 (+20 MPa), #12 (+10 MPa) and #13 (-20 MPa), (b) C2 in #8, #12 and #13.

그러나 그림-5 b)와 그림-6 b)에서 볼 수 있듯이 AIN 한 변의 길이가 다이어프램보다 작은 AIN 박막을 사용한 마이크로스피커 특성의 연관성을 제시하기 위해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

한편 박막의 증착 후, 측정 및 계산과정을 통하여 확보한

각 박막의 잔류응력으로부터, 마이크로스피커의 다이어프램을 구성하는 복합 다이어프램 (composite diaphragm)의 잔류응력을 아래의 식 (3)을 통하여 계산한 결과[9], #8번 웨이퍼는 약 -4 MPa, #12번 웨이퍼는 -8 MPa, #13 웨이퍼는 약 -20 MPa를 나타내었다.

$$\sigma_c = \frac{(\sigma_{SiN} \cdot t_{SiN} + \sigma_{AlN} \cdot t_{AlN} + \sigma_{Parylene} \cdot t_{Parylene})}{(t_{SiN} + t_{AlN} + t_{Parylene})} \quad (3)$$

단, σ_{SiN} : SiN의 잔류응력(MPa), σ_{AlN} : AlN의 잔류응력(MPa), $\sigma_{Parylene}$: Parylene의 잔류응력(MPa)
 t_{SiN} : SiN의 두께(μm), t_{AlN} : AlN의 두께(μm),
 $t_{Parylene}$: Parylene의 두께(μm)

그림 5와 6에서 제시된 결과와 복합 다이어프램의 잔류응력을 종합적으로 고려하면, 복합 다이어프램의 잔류응력이 압축상태에서 더 커짐에 따라 동일한 조건에서 측정된 음압 특성이 향상됨을 볼 수 있다. 이는 복합 다이어프램의 압축성이 커짐에 따라 다이어프램의 주름 (wrinkle)이 증가하고, 이에 따라 동일한 인가전압에서 다이어프램의 변위 (displacement)가 증대되기 때문에 큰 음압 특성을 나타내는 것으로 사료된다.

또한 MP3에서 출력되는 음성신호 (약 2 V_{Peak-to-Peak})를 약 10 배 증폭하여, 본 연구 과정을 통하여 제작된 압전형 마이크로스피커에 인가 시 대중음악을 실제로 청음 할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 고품질의 압축응력을 지닌 AlN 박막과 실리콘 질화막을 사용한 압전형 마이크로스피커의 특성을 살펴 보았다. 제작된 압전 마이크로스피커의 음압 수준 (Sound Pressure Level)은 복합 다이어프램의 잔류응력이 압축성을 나타낼 때 우수한 특성을 나타내고, 그 크기가 증가함에 따라 향상되는 특징을 나타내었다. 따라서 압전 마이크로스피커의 음압향상을 위해서는 복합 다이어프램의 잔류응력을 압축성으로 확보해야 할 것으로 사료되며, 본 연구를 통하여 제작된 마이크로스피커와 MP3를 통하여 입력된 음향 신호를 사용하여 대기 중에서 청음 할 수 있는 압전형 마이크로스피커를 확보할 수 있었다. 또한 본 연구를 통하여 제작된 마이크로스피커의 보호와 음압 향상을 위한 하우징 구조를 설계 채택한다면 더욱 향상된 음압 특성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 협동연구지원사업 (과제 번호 KRF-2004-042-D00082)과 산업자원부가 지원하는 충주대학교 지역혁신센터 (Regional Innovation Center)의 지원에 의해서 수행되었습니다. 또한 GE Sensing Korea와 대진전자 (주) 및 (주) 엠에스솔루션 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B.M. Diamond, J.J. Neumann Jr., and K.J. Gabriel, "Digital sound reconstruction using array of CMOS-MEMS microspeakers", in Tech. Digest of IEEE 15th International MEMS conference, pp.296, 2002.
- [2] S.S. Lee, R.P. Ried and R.M. White, "Piezoelectric Cantilever Microphone and Microspeaker", J. MEMS, vol. 5, no.4, pp. 238, 1996.
- [3] C.H. Han and E.S. Kim, "Parylene-Diaphragm Piezoelectric Acoustic Transducers", in Tech. Digest of IEEE .13th International MEMS conference, pp. 148, 2000.
- [4] Li-Tian, L. Zhi-Jian, L. Tian-Ling, and R. Lin-Tao, "Design of a New PZT Based Microphone and Microspeaker" Ferroelectrics, vol. 259-264, pp. 55, 2001.
- [5] C.H. Chou, Y.C. Lin, J.H. Huang, N.H. Tai, and I.N. Lin, "Growth of high quality AlN thin films on diamond using TiN/Ti buffer layer", J. Diamond and Related Materials, vol. 15, pp.404, 2006.
- [6] M.Benetti, D.C. Cannata, F. Di Pietrantonio, and E. Verona, A. Generosi, B.Paci and V.Rossi Albertini, "Growth and Characterization of piezoelectric AlN thin films for diamond-based surface acoustic wave devices", Thin Solid Films, vol. 497, pp.304, 2006.
- [7] J. Olivares, E. Iborra, M.Clement, L. Vergara, J. Sanrador and A. Sanz-Hervas, "Piezoelectric actuation of microbridges using AlN", Sensors and Actuators A, vol.123-124, pp. 590, 2005.
- [8] S.H. Yi and E.S. Kim, "Micromachined Piezoelectric Microspeaker", Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, no. 6A, pp.3536, 2005.
- [9] A. K. Sinha and T. T. Sheng, "The temperature dependence of stresses in aluminum film on oxidized silicon substrates", Thin Solid Films, vol.48, pp.118, 1978.
- [10] O. Tabata, K. Kawahata, S. Sugiyama and I. Igarashi, "Mechanical Property Measurements of Thin Film Using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes", Sensors and Actuators, vol.20, pp.135, 1989.

저 자 소 개



이 승 환 (李 承 煥)
1965년 10월 24일생. 1998년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1998년9월~2002년3월 하와이 주립대학교 전기공학과 박사 후 연수과정, 2002년4월~2004년3월 GE Sensing Korea 책임연구원, 2004년4월~현재 충주대학교 기계공학과 조교수/친환경 에너지 부품소재센터
Tel : 043-841-5129, Fax :043-841-5120
E-mail : isaac_yi@cjnu.ac.kr



김 동 기 (金 東 其)
1974년 7월 24일생. 1995년 주성대학교 전자통신과 졸업. 2002년 충주대학교 제어계측공학과 학사 편입 2004년 충주대학교 제어계측공학과 졸업 1999년~현재 대진전자 (주)
Tel : 043-855-8141
Fax : 043-855-8145
E-mail : rannd@idaejin.com



정 경 식 (鄭 暲 湜)
1982년 3월 24일생. 2007년 2월 충주대학교 기계공학과 졸업(학사). 2007년 3월~현재 충주대학교 기계공학과 대학원 석사과정
Tel : 043-841-5121
Fax : 043-841-5121
E-mail : dkmalo@gmail.com



신 광 재 (愼 廣 綽)
1971년 3월 26일생. 1994년 연세대학교 금속공학과 졸업. 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1997년~2002년 (주) 대우전자 2003년~현재 (주) 엠에스솔루션
Tel : 031-330-7799
E-mail : keyshin@mems-solution.com