

C-축 배향된 ZnO 박막을 이용하여 제작한 압전형 마이크로 스피커의 특성 평가

Characterization of Piezoelectric Microspeaker Fabricated with C-axis Oriented ZnO Thin Film

이승환^{1,4,a}, 서경원^{1,4}, 유금표², 권순용^{3,4}
(Seung-Hwan Yi^{1,4,a}, Kyong-Won Seo^{1,4}, Kum-Pyo Ryu², and Soon-Young Kweon^{3,4})

Abstract

A micromachined piezoelectric microspeaker was fabricated with a highly c-axis oriented ZnO thin film on a silicon-nitride film having compressive residual stress. When it was measured 3 mm away from the microspeaker in open field, the largest sound pressure level produced by the fabricated microspeaker was about 91 dB at around 2.9 kHz for the applied voltage of 6 V_{peak-to-peak}. The key technologies to these successful results were as follows: (1) the usage of a wrinkled diaphragm caused by the high compressive residual stress of silicon-nitride thin film, (2) the usage of the highly c-axis oriented ZnO thin film.

Key Words : Piezoelectric microspeaker, ZnO thin film, C-axis orientation, Silicon-nitride thin film, Compressive residual stress

1. 서 론

미세진자기계시스템 (MEMS: microelectromechanical systems) 기술은 실리콘 기판 상에 초소형 압력센서[1], 마이크로폰[2,3]과 마이크로스피커[4]의 제작을 위하여 사용되고 있다. 실리콘 웨이퍼 상에 음향 변환 소자 (acoustic transducers)를 제작하는 기술은 기존의 전동형 (electro-dynamic type) 스피커나 마이크로폰의 제작 방법과 비교하여 다음과 같은 큰 장점을 지니고 있다. 첫째 실리콘 반도체 기술을 접목하여 제작하기 때문에 대량 생산이 가능하며, 이에 따라 저가의 음향 소자

의 제공이 가능하고, 둘째 단일 칩 상에 스피커 (혹은 마이크로폰)와 구동신호 처리 회로의 집적화가 가능할 뿐만 아니라[5], 셋째 슬립화 추세에 있는 휴대용 전화기 (cellular phone)에 적용 시 기존 마이크로폰과 마이크로 스피커로서는 해결할 수 없었던 1.5 mm 이하 두께의 음향소자 제작이 가능하다는 큰 특징을 지니고 있다. 또한 기존의 콘덴서형 MEMS 음향소자와 비교할 때, 미세가공 기술로 제작한 압전형 음향소자는 제작이 간단하고, 분극을 위한 전압인가가 필요하지 않으며, 광대역의 응답특성을 갖는 특징을 지니고 있다[6,7].

비록 미세 가공기술을 이용한 압전형 음향 소자가 상술한 바와 같은 장점을 지니고 있으나, 현재까지의 결과로 마이크로폰의 경우 용량형 마이크로폰에 비하여 낮은 감도특성을 지니고 있으며[8], 마이크로 스피커의 경우 가청 주파수 범위에서 낮은 출력 음압 특성[9]을 갖고 있음이 보고되고 있다. 이러한 이유는 음향소자의 제작 시 사용된 다이어프램의 큰 잔류응력에 따른 결과이며, 압축성 잔류 응력을 지닌 다이어프램을 사용하면 이러한

1. 국립 충주대학교 기계공학과
(충북 충주시 이류면 김단리 123)
2. 고려대학교 제어계측공학과
3. 국립 충주대학교 신소재공학과
4. 친환경 에너지 변환·저장소재 및 부품개발 연구센터
a. Corresponding Author : isaac_yi@chungju.ac.kr
접수일자 : 2006. 4. 6
1차 심사 : 2006. 4. 28
심사완료 : 2006. 5. 9

문제를 해결할 수 있으나, 다이어프램이 주름(wrinkling)지는 결과를 유도할 수 있어 주위가 요구된다.

한편 ZnO 박막은 가시광 영역에서의 높은 투광성으로 인해 투명 전도막과 비교적 큰 전기기계결합 계수를 지니고 있음에 따른 각종 압전 소자 및 발광 소자로서의 응용을 위한 연구가 가속화되고 있다[10,11]. 특히 AlN 박막을 이용하여 FBAR (film bulk acoustic resonator)가 상용화된 이후, AlN 박막보다도 우수한 압전계수 및 전기기계결합 계수를 지닌 ZnO 박막의 특성을 이용한 FBAR의 제작을 위하여 ZnO 박막의 공정 조건 변화에 따른 특성 향상[12] 및 ZnO 박막을 이용한 FBAR 제작을 위한 연구는 더욱 가속화되고 있다[13].

본 논문에서는 기존 압전형 스피커의 단점인 낮은 음압특성을 보완하기 위하여 다이어프램 물질로 압축 잔류 응력을 지닌 실리콘 질화막과 고품질의 ZnO 박막을 이용하여 압전형 스피커를 제작하였으며, 그 출력 음압특성을 확인하였다. 또한 기존의 전동형 스피커와 음압특성을 비교 평가함으로써 차세대 음향소자로서의 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 마이크로 스피커 설계 개념 및 제작

2.1.1 마이크로 스피커 설계 개념

현재까지 발표된 압전형 마이크로 스피커의 단점은 다이어프램의 큰 잔류 응력으로 인한 스피커 다이어프램의 작은 진폭 (deflection) 이었다고 할 수 있다. 이러한 단점을 보완하고 새로운 개념의 MEMS 스피커의 제작을 위하여 상용화된 전동형의 스피커에 대한 기본적인 개념을 살펴보았다. 그림 1은 상용화된 전동형 스피커의 외형을 나타낸 것이다. 그림에서 스피커의 음압을 발생시키는 다이어프램은 돔 (dome) 형상 (혹은 평탄한 면) 구조 (그림 1의 (a) 면)로 되어 있으며, 외부에서 인가된 음원에 따른 큰 다이어프램의 진폭을 확보하기 위하여 그림 1의 (b)와 같이 스피커 다이어프램에 방사상으로 주름 (corrugation)을 인위적으로 형성한 것으로 볼 수 있다. 즉, 상용 스피커는 기능상으로 다음의 두 가지 영역으로 나눌 수 있다: 1) 주변의 공기를 진동시키기 위한 돔형 혹은 평탄한 다이어프램 영역과, 2) 다이어프램의 큰 진폭을 얻기 위한 주름 (corrugation)을 지닌 영역으로 분류할 수 있다.

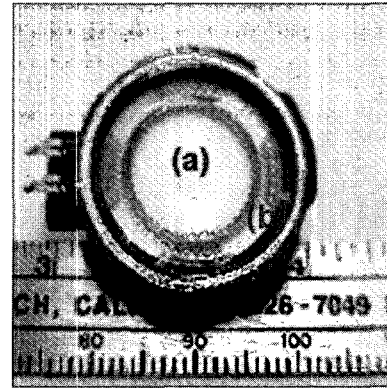


그림 1. 상용화된 전동형 (Electro-dynamic type) 스피커.

Fig. 1. Commercialized electro-dynamic type speaker.

그림 2는 실리콘 질화막 (Si_xN_y)의 잔류응력을 조절하여 제작한 마이크로 스피커의 사진을 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 인장응력을 지닌 다이어프램을 사용한 경우, 압전효과를 발생시키는 능동영역을 포함한 모든 영역이 평탄한 상태를 지니고 있음을 알 수 있다. 그러나 실리콘 질화막을 압축성 다이어프램으로 증착한 경우, 압전 특성을 나타내는 전극 상하부 영역 외부는 주름진 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 그림 1에서 제시한 바와 같은 전동형 스피커의 기능적 특징을 갖출 수 있도록 마이크로 스피커를 제작할 수 있었는데, 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 압축 응력을 지닌 실리콘 질화막을 증착시킴으로써 전체 다이어프램을 주름지게 형성하고, 압전 효과를 나타내는 능동 영역은 전극으로 사용되는 알루미늄 박막을 사용하면 잔류 응력이 약 50 ~ 70 MPa의 인장 응력을 갖게 된다. 즉, $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Al}/\text{ZnO}/\text{Al}$ 다층박막 다이어프램은 인장 응력 상태에 있게 함으로써 기존의 전동형 스피커의 기능적 특징을 확보하도록 하였다.

2.1.2 마이크로 스피커의 제작

본 연구를 통하여 제작한 마이크로 스피커는 4장의 마스크를 이용하였으며, 제작 공정도를 나타내면 그림 3과 같다. 첫 번째 공정으로 웨이퍼의 세척 후, 1 μm 의 실리콘 질화막을 LPCVD (low pressure chemical vapor deposition) 장치를 이용하여 830 $^{\circ}\text{C}$ 에서 증착하였다. 증착될 실

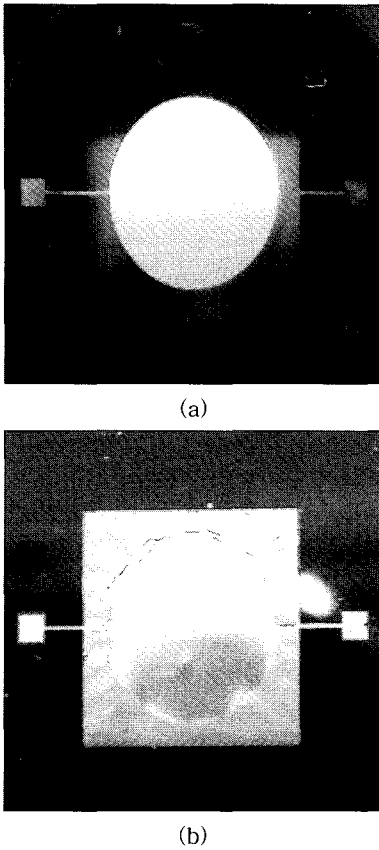


그림 2. 미세가공기술로 제작된 압전형 마이크로 스피커: (a) 인장 다이어프램 위에 제작, (b) 압축 다이어프램 위에 제작.
 Fig. 2. Micromachined piezoelectric microspeaker: (a) built on tensile diaphragm, (b) built on compressive diaphragm.

리콘 질화막의 응력을 압축 응력 (compressive stress)으로 확보하기 위하여, SiH_2Cl_2 대 NH_3 의 비율을 5.8/1로 하였다. 또한 하부 전극(lower electrode) 선과 외부 전원을 인가하기 위한 접촉부(contact pad)를 형성하기 위하여 열증착기(thermal evaporator)를 이용하여 알루미늄을 약 $0.5 \mu\text{m}$ 증착하였다. 첫 번째 마스크를 이용하여 알루미늄을 패터닝(patterning) 및 식각하여 하부 전극 부를 형성한 뒤 (그림 3(a)), RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 이용하여 압전체 ZnO 박막을 $0.5 \mu\text{m}$ 증착하였다. 증착한 ZnO 박막 하부의 전극과 상부 전극간의 절연을 위하여 약 $0.2 \mu\text{m}$ 의 페릴린(Parylene)을 웨이퍼의 전면에 증착시켰으며 두 번

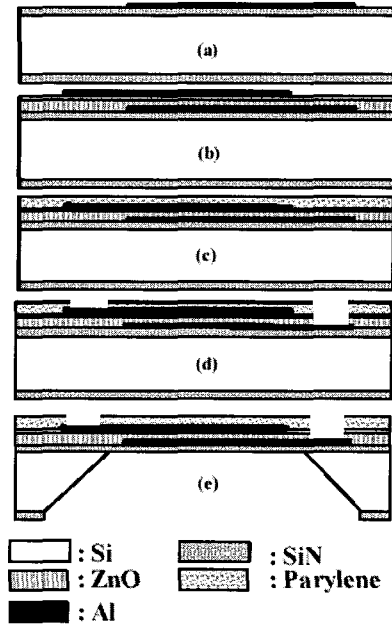


그림 3. 압전형 마이크로 스피커 제작 공정도.
 Fig. 3. Fabrication Processes of piezoelectric microspeaker.

째 마스크를 이용하여 패터닝 한 후, 하부 전극의 접촉부를 덮고 있는 페릴린을 RIE (reactive ion etcher) 장비를 이용하여 산소 플라즈마 내에서 제거하였다. 상부 전극 형성을 위하여 열증착기로 $0.5 \mu\text{m}$ 의 알루미늄을 증착시켰으며, 세 번째 마스크를 이용하여 패터닝 한 후, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 와 KOH 및 순수 (DI water)의 혼합용액 ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$: KOH : DI water = 10 g : 1 g : 100 ml)을 이용하여 알루미늄을 식각하였다(그림 3(b)). 스피커 제작 후, 각 칩의 분리 시 멤브레인(membrane)을 보호하기 위하여 웨이퍼의 전면에 $1 \mu\text{m}$ 의 페릴린을 증착한 다음(그림 3(c)) 두 번째 마스크를 이용하여 패터닝 한 후, 접촉부의 개봉을 위하여 RIE 장비 내에서 접촉부의 페릴린을 제거하였다. 이 과정을 통하여 노출된 하부 전극 접촉부 위의 ZnO 박막은 H_3PO_4 : CH_3COOH : DI water = 30 ml : 30 ml : 900 ml 혼합 용액 내에서 제거함으로써 하부 전극이 대기 중으로 노출될 수 있도록 하였다(그림 3(d)). 상기 웨이퍼 전면 공정을 완료한 다음, 웨이퍼 이면의 실리콘 질화막을 네 번째 마스크를 이용하여 패터닝 및 RIE 장치를 이용하여 식각 한 후, 식각하고자 하는 면만이 KOH 용액(40 wt%,

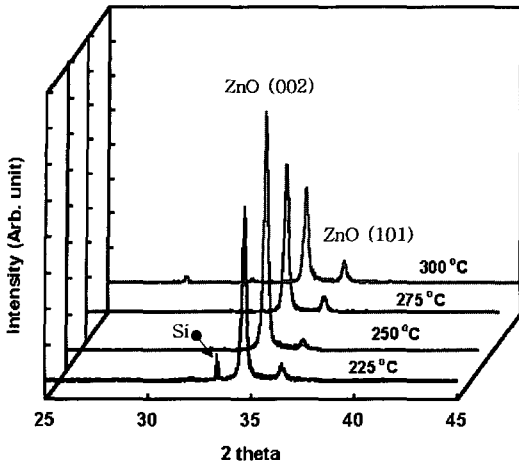


그림 4. 기판온도의 변화에 따른 XRD 스펙트럼.
Fig. 4. XRD spectrum as a function of substrate temperature.

표 1. XRD 자료와 측정된 합성 압전계수의 상관성.

Table 1. Correlation between XRD data and measured composite piezoelectric coefficient($B \cdot d_{31}$).

기판 온도 (°C)	225	250	275	300
$B \cdot d_{31}$ (Pa·m/V)	0.554	0.565	0.475	0.431
피크 비 [(002)/(101)]	10.1	15.5	8.31	5.14

80 °C)에 노출되는 구조로 제작된 기구를 사용하여 실리콘을 제거함으로써 다이어프램의 형성 과정을 완료하였다(그림 3(e))[14].

2.2 ZnO 박막의 특성

압전형 마이크로 스피커의 특성 향상을 위해서는 고품질의 압전 박막의 확보가 필수적이며, 이의 확보를 위해 기판온도와 인가 고주파 전력의 변화에 따른 ZnO 박막의 특성을 확인하였다.

그림 4는 기판온도의 변화에 따른 XRD 측정 결과이며, 표 1은 XRD 피크비와 측정하여 계산된 이축 탄성계수 (biaxial modulus)와 압전진하계수 (d_{31})의 곱을 비교한 것이다. 기판온도 250 °C에서 XRD 피크비와 $B \cdot d_{31}$ [15]는 가장 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있으며, $B \cdot d_{31}$ 이 클수록 XRD 피크 비

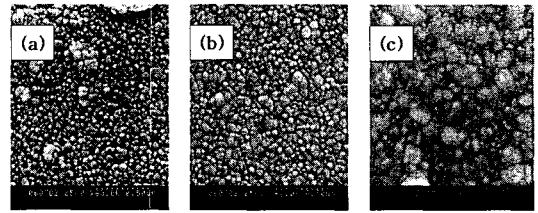


그림 5. 인가 고주파 전력의 변화에 따른 ZnO 박막의 표면 SEM 사진: (a) 250 W, (b) 350 W, (c) 400 W.

Fig. 5. Surface SEM photos as a function of RF power: (a) 250 W, (b) 350 W, (c) 400 W.

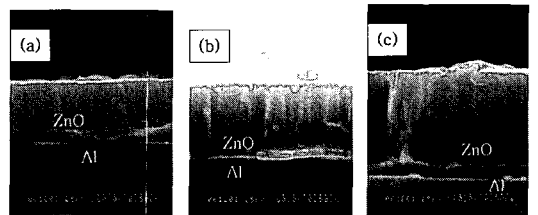


그림 6. 인가 고주파 전력의 변화에 따른 ZnO 박막의 단면 SEM 사진: (a) 250 W, (b) 350 W, (c) 400 W.

Fig. 6. Cross-sectional SEM photos as a function of RF power: (a) 250 W, (b) 350 W, (c) 400 W.

(peak ratio)의 크기가 큼을 보아 기판에 수직인 c-축 방향의 ZnO 박막의 확보가 우수한 품질의 압전 특성 확보의 지표로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

한편 그림 5는 기판온도를 250 °C 로 고정하고, 증착시의 챔버 압력을 10 mTorr, Ar/O₂ 비를 1:1 로 했을 때, 인가 고주파 전력의 변화에 따른 ZnO 박막의 표면 SEM 사진을 나타낸 것이다. 이때 고품질의 ZnO 박막을 확보하기 위하여 이단계 증착법 (two-step deposition method)을 사용하였으며 [16], 첫 번째 단계에서는 상기 제시한 공정 인자 중 인가 고주파 전력을 100 W로 한 상태에서 알루미늄 박막 위에 ZnO 박막의 종자층 (seed layer)을 확보하였다. 그림에서 알 수 있듯이 인가 고주파 전력이 350 W 이하에서는 아주 균일한 크기의 ZnO 다결정이 형성됨을 알 수 있다. 한편 그림 6 은 그림 5에서 제시한 각 ZnO 박막의 단면 SEM 사진을 나타낸 것이다. 모든 경우에 ZnO 박

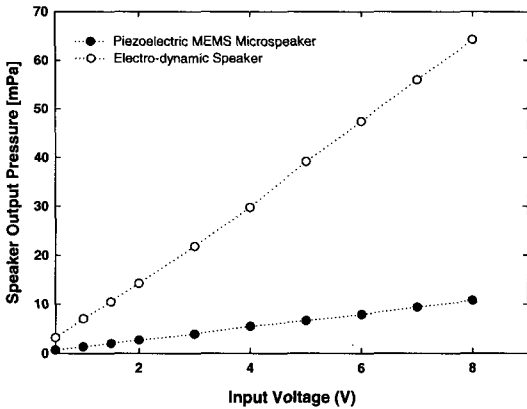


그림 7. 인가전압에 따른 스피커의 출력 음압 특성(@ 1 kHz).

Fig. 7. Speaker output pressure versus applied input voltage measured at 1 kHz.

막은 기판에 수직한 결정립 구조로 형성되어 있음을 알 수 있으나, 그 중에서 인가 고주파 전력이 350 W인 경우, 결정립 0.1 μm 이하의 주상 구조 결정이 기판에 수직하게 잘 형성되어 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 압전형 마이크로 스피커의 제작을 위한 압전 ZnO 박막의 증착 조건은 기판 온도 250 $^{\circ}\text{C}$, 증착시의 챔버 압력 10 mTorr, Ar/O₂ 비 1:1의 조건이었으며, 증착은 두 단계로 나누어 진행하였다. 첫 단계는 고주파 전력을 100 W로 하여 10 분간 증착하였고, 두 번째 단계에서는 인가 고주파 전력을 350 W로 증가시켜 증착시킴으로써 고품질의 ZnO 박막을 확보하였다.

2.3 스피커 특성 측정 방법

본 연구를 통하여 제작한 압전형 마이크로 스피커와 상용화된 휴대 전화기 (cellular phone)의 스피커의 특성을 비교 평가하였다. 스피커의 주파수에 따른 음압특성은 400 Hz에서 12 kHz 범위에서 측정하였으며, 음원으로는 임의파형 발생기 (Function Generator)를 사용하여 100 Hz 간격으로 주파수를 상승시키면서 측정하였다. 마이크로 스피커의 출력 음압 특성은 기준 마이크로폰으로 B&K 4135 (감도: 3.63 mV/Pa) 와 스펙트럼 분석기 (HP 4195)를 이용하였다.

측정된 마이크로 스피커들의 출력특성은 기준 마이크로폰의 감도 값으로 정규화 하여 그 특성을 평가하였으며, 측정 시 기준 마이크로폰은 측정 대상인 스피커로부터 약 3 mm 높이에 설치하였다. 또한 본 연구를 통하여 제작한 압전형 스피커의

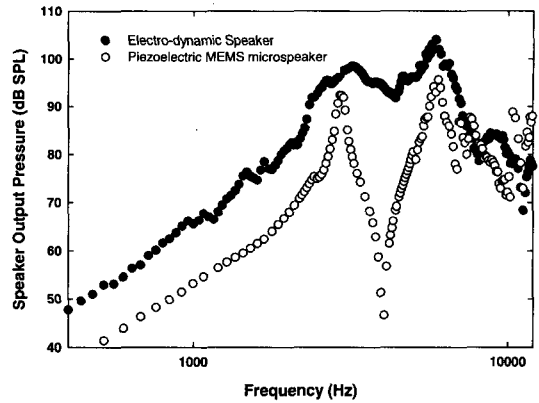


그림 8. 상용 전동형 스피커와 제작된 압전형 MEMS 마이크로 스피커의 주파수 응답 특성.

Fig. 8. Frequency response of a commercial electro-dynamic type speaker and the fabricated piezoelectric MEMS micro-speaker.

음압 특성과 주파수 응답특성을 상용 휴대 전화기에 사용된 스피커의 출력 특성과 비교하기 위하여 전동형 스피커의 다이어그램을 보호하고 있는 플라스틱 하우징은 제거한 다음 측정하였으며, 각 스피커에 인가된 전압은 6 V_{peak-to-peak} 로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 7은 주파수 1 kHz에서 인가전압에 따른 스피커의 출력 음압 특성을 나타낸 것이다. 상용화된 전동형 마이크로 스피커와 압전형 마이크로 스피커는 인가전압이 증가함에 따라 출력 음압 특성 또한 선형적으로 증가하는 특성을 나타내어 인가 전압이 6 V_{peak-to-peak} 인 경우 각각 47 mPa과 7.8 mPa을 나타내었다. 즉, 현용되고 있는 마이크로 스피커의 음압 특성은 본 연구를 통하여 제작된 압전형 마이크로 스피커의 약 7 배에 상응하는 음압 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 인가전압 특성 차이는 주로 ZnO 압전체와 상부 전극용 Al 박막 사이에 전기적 절연의 목적으로 삽입된 페릴린 층에서의 전압 강하에 의한 것으로 예측된다. 따라서 ZnO 박막 위에 증착하는 페릴린 층을 생략한 경우의 실험이 추가로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

한편 그림 8은 주파수 범위 400 Hz에서 12 kHz에서 측정된 상용 스피커와 압전형 스피커의 주파

수 응답 특성을 나타낸 것이다. 상용 스피커와 본 연구에서 제작한 압전형 마이크로 스피커는 1 kHz 주파수에서 각각 약 65 dB SPL (sound pressure level)과 53 dB SPL을 나타내었으며, 압전형 스피커의 경우 약 2.9 kHz에서 91 dB SPL를 나타내었다. 한편 상용 제품은 2.3 kHz부터 7 kHz까지 90 dB SPL 이상의 균일한 음압 특성을 나타내었다.

본 연구를 통하여 제작한 압전형 마이크로 스피커는 기존 스피커에 비하여 약 6 배 이상의 전압 인가를 요구하는 특성을 나타내었고, 주파수 응답 특성 또한 상용 스피커에 비하여 약 10 dB SPL 이상 낮음을 알 수 있다. 그러나 비교 평가에 사용한 상용 스피커의 다이어프램의 면적이 약 0.25 mm² 이고, 압전형 마이크로 스피커는 0.025 mm² 인 점을 감안할 경우 (상용 스피커의 다이어프램의 면적이 압전형 마이크로 스피커의 약 10 배), 상용 스피커와 대등한 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 상용 스피커는 내부 저항이 작기 때문에 스피커 구동 시, 압전형 마이크로 스피커 (압전 마이크로 스피커는 약 10⁸ ohm 이상) 에 비해 소비 전력이 큰 단점을 지니고 있으므로, 주파수 응답 특성이 균일한 마이크로 스피커의 고안 및 개선을 확보하는 경우 소비 전력이 작고, 초박형 (두께 1.2 mm 이하) 차세대 음향 소자로서의 응용 가능성은 충분하다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 이단계 (two-step) 증착법을 이용한 고품질의 압전 ZnO 박막과 압축 응력을 지닌 실리콘 질화막을 다이어프램으로 한 압전형 마이크로 스피커를 제작하였다. 이단계 증착법을 사용하여 증착한 ZnO 박막은 균일한 입계를 지니고, c-축 방향이 기판에 수직한 고품질의 ZnO 박막을 확보할 수 있었다. 또한 압축 응력을 지닌 다이어프램을 사용함으로써 압전형 마이크로 스피커의 능동 영역은 다이어프램 물질, 압전박막 및 전극물질의 잔류응력의 조합에 의하여 평탄하게 유지시키면서도, 능동 영역 외부는 압축응력으로 인해 주름진 구조를 형성하게 함으로써 전체 다이어프램의 진폭을 크게 유도할 수 있는 구조를 제안할 수 있었다. 한편 상용 스피커와의 비교 평가에서도 알 수 있듯이 제작한 스피커의 출력 음압 특성은 낮았으나, 차세대 휴대폰에서 요구하고 있는 초박형 스피커의 구현 가능성을 본 연구를 통하여 제시할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-D00082).

참고 문헌

- [1] R. Melamud, A. A. Davenport, G. C. Hill, I. H. Chan, F. Declercq, P. G. Hartwell, and B. L. Pruitt, "Development of an SU-8 Fabry-Perot blood pressure sensor", The 18th IEEE International Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, p. 810, 2005.
- [2] E. S. Kim and R. S. Muller, "IC-processed piezoelectric microphone", IEEE Electron Device Letters, Vol. 8, No. 10, p. 467, 1987.
- [3] W. Kuhnel and G. Hess, "Micromachined subminiature condenser microphones in silicon", Sensors and Actuators, Vol. A32, p. 560, 1992.
- [4] Brett M. Diamond, J. J. Neumann, and K. J. Gabriel, "Digital sound reconstruction using arrays of CMOS-MEMS microspeakers", The 15th IEEE International Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, p. 292, 2002.
- [5] E. S. Kim, R. S. Muller, and P. R. Gray, "Integrated microphone with CMOS circuits on a single chip", IEEE International Electron Meeting, p. 880, 1989.
- [6] R. P. Ried, E. S. Kim, D. M. Hong, and R. S. Muller, "Piezoelectric microphone with on-chip CMOS circuits", IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, p. 111, 1993.
- [7] S. S. Lee, R. P. Ried, and R. M. White, "Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 5, No. 4, p. 238, 1996.
- [8] G. M. Sessler, "Silicon microphones", J. Audio Eng. Soc., Vol. 44, No. 1/2, p. 16, 1996.
- [9] M. A. Harradine, T. S. Birch, J. C. Stevens, and C. Shearwood, "A micromachined loudspeaker for the hearing impaired", Transducers '97, International conference on Solid-state sensors and actuators, Technical

- Digest, Vol. 1, p. 429, 1997.
- [10] 홍광준, "펄스 레이저 증착 (PLD) 법에 의한 ZnO 박막 성장과 열처리 효과", 전기전자재료학회논문지, 17권, 5호, p. 467, 2004.
- [11] 공보현, 박태은, 조형균, "합성절차에 따른 1차원 ZnO 나노구조의 형태조절과 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 19권, 1호, p. 13, 2006.
- [12] S. H. Choi and J. S. Kim, "A study on the deposition characteristics of ZnO piezoelectric thin film bulk acoustic resonator", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 16, No. 8, p. 716, 2003.
- [13] Y. H. Shin, S. J. Kwon, and H. J. Kim, "Characteristics of ZnO thin film for SMR-typed FBAR fabrication", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 18, No. 2, p. 159, 2005.
- [14] J. Brugger, G. Beljakovic, M. Despont, H. Biebuyck, N. F. de Rooji, and P. Vettiger, "High-yield wafer chuck for single-sided wet etching MEMS structures", Transducers '97, International conference on Solid-state sensors and actuators, Technical Digest, Vol. 1, p. 711, 1997.
- [15] F. J. von Preissig, H. Zeng, and E. S. Kim, "Measurement of piezoelectric strength of ZnO thin films for MEMS applications", J. Smart Mater. Struct., Vol. 7, p. 396, 1998.
- [16] S. H. Park, B. C. Seo, G. W. Yoon, and H. D. Park, "Two-step deposition process of piezoelectric ZnO film and its application for film acoustic resonators", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 18, p. 2432, 2000.