

ZnO 壓電變換器의 주파수특성에 關한 研究

A Study on the frequency characteristic of ZnO Piezoelectric transducers

°정규원*, 이종덕**, 정광천*, 박상만**, 송준태*

* 성균관대학교 전기공학과 ** 서남대학교 전기공학과

°Kyu-Won Jeong*, Jong-Deok Lee**, Kwang-Cheon Jeong*,

Sang-Man Park**, Joon-Tae Song*

*Dept. of Elec. Eng. Sung Kyun Kwan Univ.

**Dept. of Elec. Eng. Seonam Univ.

Abstract

In this paper ZnO Piezoelectric transducers were fabricated as follows, counter electrode (pt 99.9%) was deposited on the sapphire substrates by DC sputter method, and then piezoelectric layer (ZnO 99.999%) was deposited on the counter electrode according to the sputtering parameters, and then top electrode (pt 99.9%) was deposited on the piezoelectric layer by Electron Beam Gun Evaporator.

Structural characteristic of deposited ZnO thin film was measured by XRD, SEM. Also, Frequency characteristic of ZnO transducer was analyzed theoretically and practically for input frequencies.

1. 서론

압전변환기(piezoelectric transducer)는 기계적인 응력을 가하면 전기적인 분극이 발생하고 전장을 가하면 기계적인 변형을 나타내는 압전현상을 이용한 것으로서, 전기적인 신호를 주고받는 전극층과 압전현상을 발생시키는 압전층, 음향출력을 전달하는 기관으로 구성된다. 또한, 압전변환기는 높은 음향효율과 광대역의 특성이 있어야 하며 [1], 설계하는데 있어서 결정되어야 할 요소는 압전층의 두께와 top전극의 면적, 전극의 두께, 음향임피던스 등이 있다. 특히, 최대의 변환기 효율을 얻

기 위해서는 변환기의 재료와 요구되는 변환손실, 대역폭을 적절히 선택하여야 한다.

압전층으로 사용되는 ZnO(zinc oxide)는 막막으로 제조시 압전성을 가지며 고주파 및 광대역의 변환기의 응용에 적합하다. 따라서 양호한 압전성,재현성 등을 고려한 ZnO의 증착은 RF 프레나 마그네트론 스퍼터법(RF Planar Magnetron Sputter)이 가장 널리 사용된다.[2]

스퍼터링시 c축 배향(c-axis orientation)은 가스압력, 기관온도, 고주파입력전력, Ar/O₂혼합비율, 타겟-기관 간격 등의 스퍼터 조건(sputter parameter)의 변화에 따라 많은 영향을 받으므로, sputter parameter의 상호관계를 고려하여 증착을 수행하였다.

본 연구에서는 사파이어 기관위에 ZnO를 RF Magnetron 스퍼터법으로 위의 sputter 조건에 따라 예비실험을 한 후 c축 배향성이 가장 양호한 sputter조건에서 증착하여 압전변환기를 제작하였다. 또한, 증착된 막막의 구조적인 특성을 고찰하였으며, 입력 주파수에 따른 압전변환기의 주파수특성을 이론으로 분석하였으며 실험치와의 결과를 비교, 검토하였다.

2. 관련 이론

2.1. 압전변환기의 등가모델

압전변환기는 전기적인 에너지를 음향적인 형태의 에너지로 변환하는 장치로서, 전기적인 신호를 주고 음향

신호를 받는 전극층과 압전현상을 발생시키는 압전층으로 구성되며, 전극과 접촉하는 backing 물질에 따라 각기 다른 용도로 사용한다. 압전변환기는 그림 1과 같이 three-port network으로 표현된다.^[1]

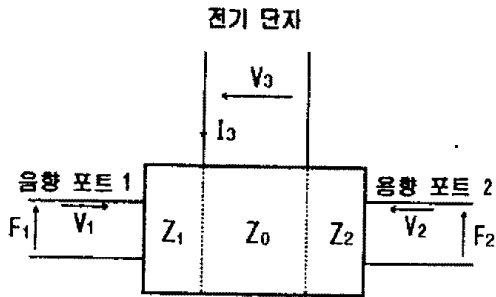


Fig.1 Three-port network of a piezoelectric transducer

그림 1에서 변환기의 표면에서 정의되는 힘(F)은 전기 회로에서 전압으로, 그리고 입자의 속도(v)는 전류로서 정의할 수 있으며, Mason의 등가회로로 해석하면 전기-음향특성은 식(2.1)과 같은 matrix로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_c \cot \beta_a l & Z_c \operatorname{cosec} \beta_a l & \frac{h}{w} \\ Z_c \operatorname{cosec} \beta_a l & Z_c \cot \beta_a l & \frac{h}{w} \\ \frac{h}{w} & \frac{h}{w} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서, F_1, F_2 는 변환기의 내,외부방향의 힘을 나타내고, v_1, v_2 는 변환기 내,외부방향으로 향하는 입자속도를 나타낸다. 식(2.1)을 사용하여 변환기의 전기입력 임피던스(electrical input impedance) Z_3 를 구하여 보면 식(2.2)와 같다.

$$Z_3 = \frac{V_3}{I_3} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 + k_T^2 \frac{j(Z_1 + Z_2)Z_c \sin \beta_a l - 2Z_c^2(1 - \cos \beta_a l)}{[(Z_c + Z_1 Z_2) \sin \beta_a l - j(Z_1 + Z_2)Z_c \cos \beta_a l] \beta_a l} \right] \quad (2.2)$$

여기서, k_T 는 압전결합계수(piezoelectric coupling coefficient)이다. 변환기의 전기입력임피던스는 변환기내의 고유정전용량과 음향여기의 결과로 나타나는 방사임피던스(radiation impedance)와의 직렬등가회로로 표현되며, 방사임피던스 Z_a 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.3)$$

$$R_a = \frac{k_T^2}{\omega C_0 \beta_a l} \frac{(Z_c / Z_2) \sin^2 \beta_a l - 2(Z_c / Z_2) \cos \beta_a l + 2(Z_c / Z_2) \cos^2 \beta_a l}{\sin^2 \beta_a l + (Z_c / Z_2)^2 \cos^2 \beta_a l} \quad (2.4)$$

$$X_a = \frac{k_T^2}{\omega C_0 \beta_a l} \frac{2 \sin \beta_a l + 1/2(Z_c / Z_2)^2 \sin 2\beta_a l - \sin^2 \beta_a l}{\sin^2 \beta_a l + (Z_c / Z_2)^2 \cos^2 \beta_a l} \quad (2.5)$$

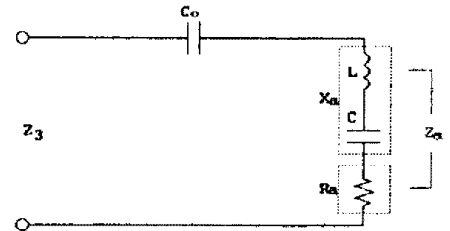


Fig.2 Electrical equivalent circuit for a piezo-electric transducers

3. 실험방법

3-1. 실험순서

본 실험에서는 ZnO박막을 증착하는데 박막표면의 평활도가 우수하고 2차전자에 의한 박막의 손상이 방지되는 반응성 R.F Magnetron sputtering법으로 증착하였다. 실험에 사용된 장비는 varian제품의 RF/DC magnetron sputter(VKS 35)이었으며 진공을 형성, 유지시키는 진공시스템, 스퍼터링 타겟과 RF 전원공급장치, substrate holder, 가스 주입 장치로 구성되며, RF sputtering구조는 [그림 3]과 같다.

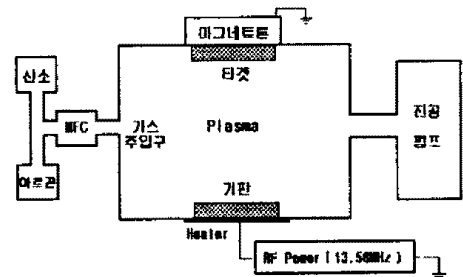


Fig.3 RF magnetron sputtering system

또한 기판은 사파이어를 이용하였으며 ZnO타겟은 순도가 5N을 사용하였다. 압전변환기의 제작은 그림4와 같이 증착전에 기판으로 사용된 사파이어를 아세톤, 알콜, 증류수를속에서 각각 20분간 초음파 세척을 한 후 질소를 이용해 송풍 건조하였으며, 챔버내 불순물을 최대한 제거하기 위해 챔버의 초기 진공도는 5×10^{-6} Torr로 형성시켰다. 음향기판인 사파이어는 직경 6mm의 원통형태로 가공하였으며, counter전극은 직경 2inch의 백금(Pt 99.9%) target을 기판과의 부착력이 우수한 DC sputter (RMC-Eiko corporation)로 10^{-2} [Torr]의 압력과 6[mA]의 ion current로 기판을 고정후, 1시간동안 sputter하였으며, 기판과의 부착력을 개선하기 위해 650[°C]로 30분간 열처리(annealing) 하였다. ZnO의 증착은 직경 5[mm]의 stainless mask를 기판위에 설치한 후 RF Magnetron Sputter (Varian VKS35)로 각 스퍼

터변수를 고려하여 예비 실험을 한 후 가장 c축 배향성이 우수한 스퍼터링 조건으로 ZnO박막을 증착하였으며 표1에 스퍼터링 증착조건을 나타내었다. Top전극은 직경 1.5[mm] stainless Mask를 사파이어 기판위에 설치한후, 전자빔 증착기(Electron Beam Evaporator : Anelva)를 사용하여 증착하였다.

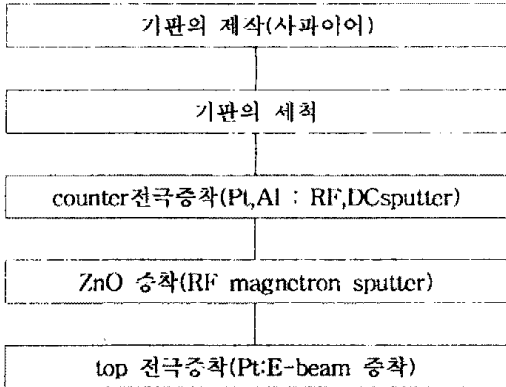


Fig.4 The experimental flow chart

3-2. ZnO박막 및 압전변환기의 주파수특성 분석

증착된 박막의 배향성을 분석하기 위해 XRD(RIGAKU: X-Ray Diffractometer)를 사용하였다. 이때 X-Ray는 Cu α line($\lambda=1.542\text{\AA}$)을 사용하였으며, 스텝폭과 주사 속도는 각각 0.02, 0.2(sec)이었다. 또한, 박막의 우선 배향성 정도를 알아보기 위하여 X선의 입사각도와 goniometer의 각도를 (0002)면의 회절각으로 고정시킨후 5°-35°범위에서 시편을 rocking시켜 주면서 X-Ray curve를 측정하였으며, ZnO 압전박막층의 표면 및 기판과 박막 계면과의 두께를 조사하기 위해 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하였고, 변환기의 주파수특성의 분석은 Network Analyzer(Wiltron Model 5400)로 입력 RF신호를 1[MHz]-2[GHz]범위의 sweep 신호를 압전변환기에 인가하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 ZnO 박막의 특성

그림 5는 표1의 스퍼터조건으로 증착한 ZnO박막의 X선회절 결과로서, 위 조건으로 증착된 ZnO박막의 두께는 4.65[μm]로서 X선회절의 2θ 값이 34.4°에서 강한 peak이 발생하였으며 이 각도의 면지수는 (0002)면으로서 높은 c축 배향을 가짐을 알 수 있었다. 또한, 이 시편의 rocking curve의 표준편차는 4.3°로서 높은 전기 기계결합계수가 기대되며 압전변환기로의 응용에 타당함을 알 수 있다.

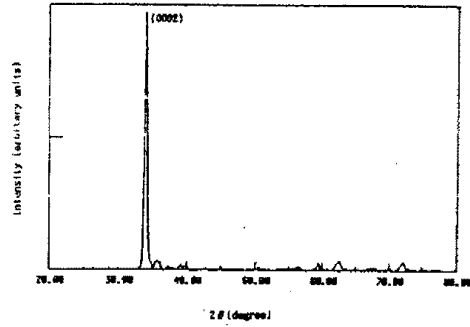


Fig.5 X-Ray diffraction of ZnO

스퍼터변수	실험 조건
target 형태	sintered ZnO
가스압력	4.5×10^{-3} [Torr]
Ar/O ₂ 혼합비	50:50
기판온도	350[°C]
타겟-기판거리	6 [cm]
고주파 입력	200 [W]

Table.1 The sputtering parameters of ZnO

[사진 1]은 ZnO박막의 표면과 계면을 전자현미경(SEM: scanning electron microscope)으로 측정된 것을 나타낸 것으로서, ZnO의 표면은 embosome 형태를 나타내고^[1] 막의 계면은 columnar 구조를 가짐으로서 일반적인 ZnO박막의 특성과 잘 일치함을 보인다.

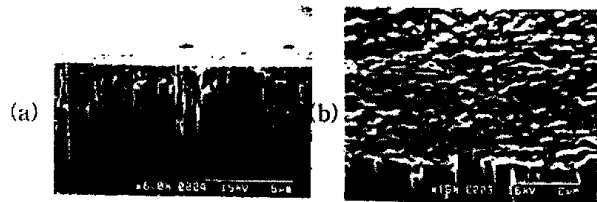


Photo 1. SEM Photograph of ZnO thin film on the Si(100) substrates (a)interface (b)surface

4.2 ZnO압전변환기의 주파수 특성

압전변환기의 설계시 전극은 대역폭에 큰 영향을 미치므로 공진주파수에서의 임피던스의 정합(matching)이 요구되며, 음향손실 없이 음향power를 전달할 수 있도록 오믹접촉(ohmic contact)이 되어야 한다. 그림 6은 counter전극의 두께에 따른 음향기판(acoustic substrate)의 입력음향임피던스의 변화를 나타내고 있다. counter 전극이 1000[\AA]미만일 경우 counter 전극층의 음향손실을 무시할 수 있다. 본 연구에서는 counter전극의 두께를 650[\AA]으로 증착하였다.

그림 7은 top전극의 두께에 따른 압전층의 입력음향임피던스의 변화를 나타낸 것으로 여기서, top전극이 1000 \AA 미만이면 top전극층의 음향손실을 무시할 수 있을 정도로 적으며, 본 연구에서는 top전극의 두께를 950 \AA 으로 증착하였다.

압전변환기의 주파수변화에 따른 전달특성은 입력전력 임피던스를 R_0 라고 하였을때 입력전력 P_i 와 방사 저항 R_s 에서 소모되는 전력 P_L 과의 비로 나타낼 수

있다. 여기서, 변환기의 층들은 전기적으로 손실이 없다고 가정했으므로 도전손실은 무시할 수 있지만, 직렬접촉임피던스와 전극도선 임피던스는 고주파에서 중요한 영향을 미치므로 무시할 수 없는 중요한 변수이다. 일반적으로 직렬임피던스 $Z_{se} = R_{se} + X_{se}$ 로 나타내며, 전형적인 고주파변환기에서 Z_{se} 는 0.1~1 [mH]의 인덕턴스 값을 갖는다. 또한 R_{se} 는 0.1~2 [ohm]의 값을 갖는다고 보고 되어 있다.^[4]

그림8은 압전변환기의 주파수특성을 측정하는 회로로서 입력임피던스 $R_0 = 50\Omega$, 직렬임피던스는 무시하여 주파수 전달특성을 이론적으로 산출하였고, 또한, 실험을 통하여 비교, 검토하였다.

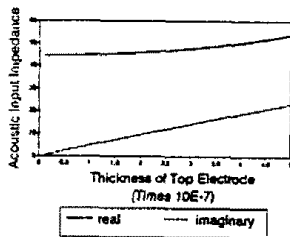


Fig.6 Variation of input acoustic impedance for counter electrode thickness

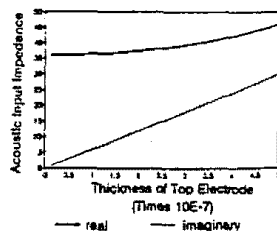


Fig.7 Variation of input acoustic impedance for top electrode thickness

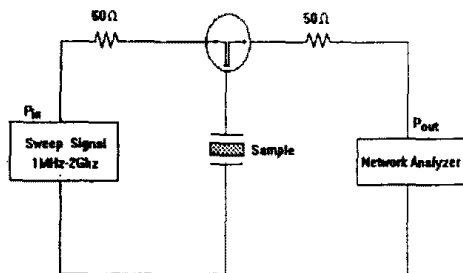


Fig.8 Equalvalent circuit of layer transducer for measurement of insertion loss

그림 9는 압전변환기의 주파수변화에 따른 전달특성의 이론치를 시뮬레이션하여 나타낸 것으로서 무손실 변환기로 가정하였을때 3[dB]의 대역폭이 약 422[MHz]~750[MHz]로 비교적 광대역의 주파수특성을 보이고 있다. 따라서, ZnO압전층이 4.65[μ m]일때 반파장주파수가 680[MHz]로서 대역폭은반파장주파수 부근의 영역으로 형성되지만 효율이 가장 높은 주파수는 1/2~1/4파장 주파수사이의 값을 가지고 있다. 이는 이론적으로 기판의 음향임피던스가 압전층의 음향임피던스보다 큰 경우는 위의 조건을 만족한다고 할 수 있다. 이에 반해 벌크(bulk)변환기는 일반적으로 반파장주파수에서 공진이 일어나며 협대역의 주파수특성을 나타내므로 이와 잘 비교된다고 할 수 있다. 그림 10은 제작된 압전변환기의 주파수특성을 그림8의 회로로 측정한 것으로서 약 540[MHz]~750[MHz]의 대역특성을 보이며 이론적으로 계산한 것과 잘 부합된다. 또한 이론치는 약 40[dB]를 가지는 반면 제작된 변환기는 약 54[dB]를 나타내어 약

14[dB]의 차이를 보이고 있다. 이는 국부적인 ZnO두께의 차이에 의한 영향과 고주파 유도에 의한 영향, 그리고 측정시 시편과 단자사이의 직렬접촉임피던스의 영향으로 사료된다.

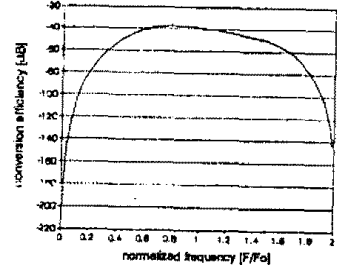


Fig.9 The theoretically analyzed frequency characteristics of transducer

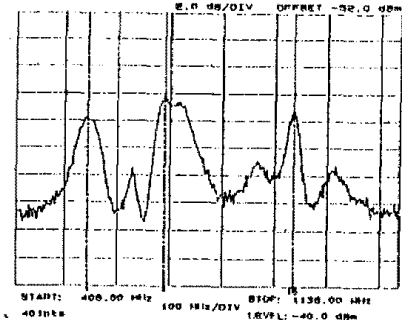


Fig.10 Measured frequency characteristic by the network analyser

5 결론

본 연구에서는 Pu/ZnO/Pt/Z-oriented Sapphire 압전변환기를 제작하였다. RF magnetron sputter법으로 ZnO 박막 증착시 가스압력 4.5×10^{-3} [Torr], Ar/O₂비 50/50, 기판온도 350℃, 타겟-기판거리 5.5cm, RF 입력 200W에서 표준편차가 4.3°인 강한 c축 배향을 가진 ZnO박막을 얻을 수 있었다. 이론적으로 고찰한 압전변환기는 광대역 특성을 보이고 있으며 위의 구조를 가진 압전변환기는 1/2~1/4파장 범위에서 높은 효율이 나타난다. 또한, 제작된 압전변환기의 주파수 특성은 약 540MHz~750MHz의 대역특성을 보이며 이론적으로 계산한 것과 일치하고 있으나 이론치에 비해 약 14[dB]의 낮은 상태를 나타내었다. 이는 국부적인 ZnO두께의 차이에 의한 영향과 고주파 유도에 의한 영향, 그리고 측정시 시편과 단자사이의 직렬접촉임피던스의 영향으로 생각되며 추후 문제점을 보완하고 임피던스 matching을 고려하면 보다 효율이 높은 변환특성을 나타낼 것으로 생각되며 앞으로의 과제로 남는다.

참고문헌

1. Thomas M.Reeder,"characteristic of Microwave Acoustic Transducers for Volume Wave Excitation",IEEE TRANS ON MTT,vol.17,pp.927,1969
2. S.B.Krupanidhi and M.Sayer,"Position and pressure effect in RF magnetron reactive sputter deposition of piezoelectric zinc oxide",J.APPL.PHYS,56(11),pp.3308,1984
3. F.C.M. Van De Pol F.R.Blom, "RF Planar Magnetron Sputtered ZnO Films(Structural Properties)",THIN SOLID FILM, 204,pp.349,1991
4. Osamu yamasaki, Tsuneo Mitsuyu,and Kiyotaka Wasa,"ZnO thin film saw devices",IEEE.TRANS ON SONIC ULTRASONIC VOL.SU 27,NO.6,pp.369,1980