

RF magnetron sputtering으로 제작한 ZnO/Sapphire
압전 변환기의 전기적인 특성에 관한 연구

이 종덕* 정 규원 고 상춘 송 준태
성균관대학교 공과대학 전기공학과

Electrical properties of ZnO/Sapphire piezo-
electric transducer by RF magnetron sputtering

Jong Duk Lee*, Kyu Won Jung, Sang Choon Ko, Joon Tae Song
Dept. of Elec. Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

Abstract

In this paper, the physical characteristics of piezoelectric transducer which generates acoustic wave at microwave frequency were theoretically analyzed. We found that increasing electrode thickness is showed large distortion on bandwidth.

ZnO thin film were desoposited by RF magnetron sputtering method, considering the sputtering parameters. Thickness of the desoposited ZnO was 3.9 μm . In this experiment, we get that resistivity is $12.196 \times 10^9 [\Omega\text{cm}]$, that resonance frequency is 827.47MHz. Measuring insertion loss, we ascertained to possibility of transducer application for microwave frequency.

1. 서론

압전 변환기는 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 또는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환시키는데 이용될 수 있다. 압전층으로 사용되는 ZnO는 높은 압전결합계수를 가져서 압전재료로 많이 이용된다.

또한, 압전변환기로 응용시 높은 음향효율과 광대역의 특성^[1]이 있어야 하며, 특히 최대의 변환기 효율을 얻기 위해서는 변환기의 재료와 각 전극의 두께, 요구되는 변환손실, 대역폭을 적절히 선택하여야 한다.

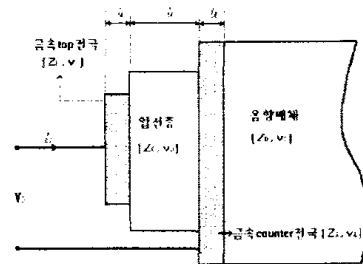
본 연구에서는 ZnO/Sapphire 압전변환기의 전기 및 음향 특성인 대역폭 및 삽입손실을 이론적으로 분석, 정리하였으며, top 및 counter전극의 두께가 압전변환기의 음향특성에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다. 또한 RF magnetron 스퍼터법으로 ZnO의 최대 압전성을 고려하여

각 sputter parameter의 제조조건에 따라 압전변환기를 제작하였고, 압전변환기의 공진주파수 및 삽입손실을 측정하여 압전변환기로서의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 압전변환기의 이론적 고찰

2.1. 압전변환기의 등가모델

압전변환기는 전기적인 신호를 주고 받는 전극층과 압전 현상을 발생시키는 압전층, 그리고 음향출력을 전달하는 음향기판(acoustic substrate)으로 구성되며 [그림 1]에 압전변환기의 구조를 나타내었다.



[그림 1] 압전변환기의 구조

압전변환기의 이론적인 분석을 간략화^[2]하기 위해서는 압전변환기의 측면의 크기는 음향파장에 비해 매우 커야 하고, 전극층은 모드전환없이 음향전력을 전달한다고 가정하였다. 여기서, 압전변환기가 순수 일차원모드로 진동할때 Mason의 등가회로로 표현되어지며, 압전층의 전기-음향특성은 다음과 같은 matrix로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_1 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0 \cot \beta d_0 & Z_0 \operatorname{cosec} \beta d_0 & \frac{h}{w} \\ Z_0 \operatorname{cosec} \beta d_0 & Z_0 \cot \beta d_0 & \frac{h}{w} \\ \frac{h}{w} & \frac{h}{w} & \frac{1}{wC_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

그리고 압전변환기의 전기입력임피던스 Z_3 를 구하기 위해 f_0, f_1, f_2 를 각각 압전층, top 및 counter전극의 공진주파수라 하면 $f_0 = v_0/2l_0, f_1 = v_1/2l_1, f_2 = v_2/2l_2$ 로 나타낼 수 있고, 전기적인 접촉이 완전 자유표면으로 된 top전극으로 만들어졌다고 가정했을때의 압전층의 왼쪽면에서 본 임피던스 z_1 과 오른쪽에서 본 임피던스 z_2 를 구하면 식(2.2)와 같다.

$$z_1 = -jZ_1 \tan(\pi f/f_1)$$

$$z_2 = Z_2 \frac{Z_D \cos(\pi f/f_2) + jZ_2 \sin(\pi f/f_2)}{Z_2 \cos(\pi f/f_2) + jZ_D \sin(\pi f/f_2)} \quad (2.2)$$

또한, 압전변환기의 전기입력임피던스 z_3 는 식(2.1)과 식(2.2)로부터 식(2.3)과 같이 구하여진다.

$$z_3 = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 + \frac{k_7^2 \{j(z_1 + z_2)Z_0 \sin \beta_{d_0} - 2Z_0^2(1 - \cos \beta_{d_0})\}}{[(Z_0^2 + z_1 z_2) \sin \beta_{d_0} - j(z_1 + z_2)Z_0 \cos \beta_{d_0}] \beta_{d_0}} \right] \quad (2.3)$$

여기서, k_7 는 압전결합계수이며, 압전변환기의 전기입력임피던스는 변환기내의 고유정전용량(C_0)과 음향여기의 결과로 나타나는 방사임피던스($Z_a = R_a + jX_a$)와의 직렬등가회로로 표현된다. 그리고 전극층의 두께가 음향적으로 얇은 경우, 즉 $l_1=0, l_2=0$ 일 경우 전극층의 음향손실은 무시할 수 있으므로 식(2.2), (2.3)을 이용하여 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$R_a = \frac{k_7^2}{\omega C_0 \beta_{d_0}} \frac{(Z_D/Z_0)^2 \sin^2 \beta_{d_0} - 2(Z_D/Z_0) \cos \beta_{d_0} + 2(Z_D/Z_0) \cos^2 \beta_{d_0}}{\sin^2 \beta_{d_0} + (Z_D/Z_0)^2 \cos^2 \beta_{d_0}}$$

$$X_a = \frac{k_7^2}{\omega C_0 \beta_{d_0}} \frac{2 \sin \beta_{d_0} + 1/2(Z_D/Z_0)^2 \sin 2\beta_{d_0} - \sin^3 \beta_{d_0}}{\sin^2 \beta_{d_0} + (Z_D/Z_0)^2 \cos^2 \beta_{d_0}} \quad (2.4)$$

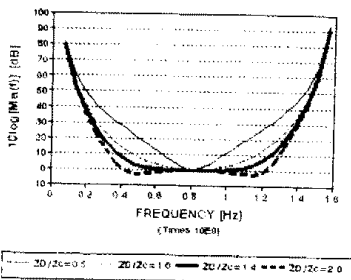
식(2.4)에서 압전층이 공진시 즉, $X_a=0, f_0=f, \beta_{d_0}=\pi$ 이므로 이 때의 전기방사저항을 R_{ω} 라 하면

$$R_{\omega} = 4k_7^2 \frac{Z_0}{Z_D \pi \omega C_0} \quad (2.5)$$

이다. 또한 음향 방사 임피던스를 변환기의 중심주파수 f_0 에 대해 규준화시키면 Z_0 는 중심주파수 f_0 와 대칭인 형태가 되고 Z_a 의 주파수에 따른 응답함수를 $M_r(f)$ 라고 나타내면 식(2.6)과 같다.

$$M_r(f) = \frac{R_{\omega}}{R_a} \quad (2.6)$$

따라서, 전극층이 음향적으로 얇은 경우 음향대역은 [그림 2]과 같이 Z_D/Z_0 의 밀접한 함수임을 보여주고 있으며 $Z_D/Z_0 = \sqrt{2}$ 일때 가장 넓은 대역폭이 나타난다. 그러므로 본 연구에서는 변환기의 광대역특성을 얻기 위해서 압



[그림 2] $l_1=0, l_2=0$ 일때의 압전변환기의 음향대역응답

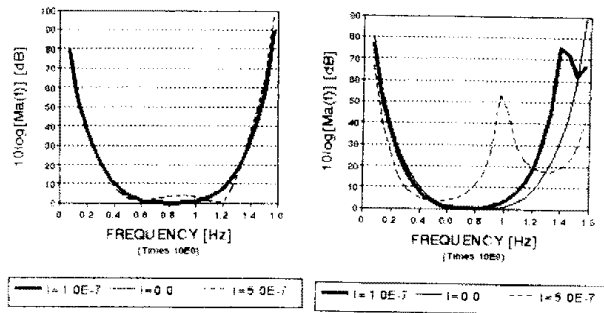
전층인 ZnO와 Z_D/Z_0 의 비가 약 $\sqrt{2}$ 인 사파이어 (Al_2O_3)를 선택하였다.

2.2. 전극층의 두께에 의한 영향

[그림 3]은 전극의 두께를 Counter전극은 0.0, 1000Å, 5000Å, Top전극은 0.0, 800Å, 5000Å로 선정하여 전극의 두께가 대역폭에 미치는 영향을 검토하였다. 이때 ZnO박막의 두께는 3.9 μm , 압전결합계수 k_7 는 0.28이며 [표 1]에 각 재료의 정수들을 나타내었다.

[표 1] 압전변환기 재료의 제정수

음향변수	재료	ZnO	Pt	Sapphire
음향임피던스($kg/m^2 \cdot s \cdot 10^6$)		36	69.8	44.3
음향속도 (km/s)		6.33	3.26	11.1



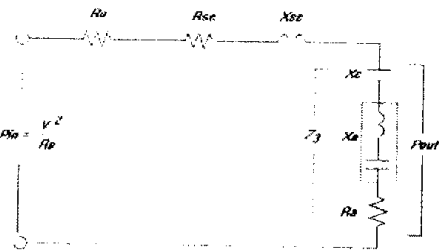
(a) counter전극 (b) top전극

[그림 3] 전극을 고려한 음향대역응답

[그림 3]에서 counter 및 top전극의 두께가 두꺼워질수록 심한 왜형이 나타남을 알 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 전극층의 영향을 무시할 수 있도록 위의 음향대역응답을 고려하여 top 및 counter전극을 800Å, 1000Å으로 증착하였다.

2.3. 압전변환기의 삽입손실

압전변환기의 삽입손실은 입력전력 임피던스를 R_0 라고 하였을때 입력전력 P_i 와 Z_3 에서 소모되는 전력 P_c 와의 비를 삽입손실 η 로 나타내었다. [그림 4]에 직렬임피던스 $Z_{se} = R_{se} + jX_{se}$ 를 고려한 압전변환기의 등가회로를 나타내었다. 여기서, 전형적인 고주파변환기에서 Z_{se} 는 0.1~1mH의 인덕턴스 값과 0.1~2[ohm]의 값을 갖는다고 보고 되어 있다.^[1]



[그림 4] Z_{se} 를 고려한 압전변환기의 등가회로

[그림 4]의 등가회로에서 η 를 구하여 보면

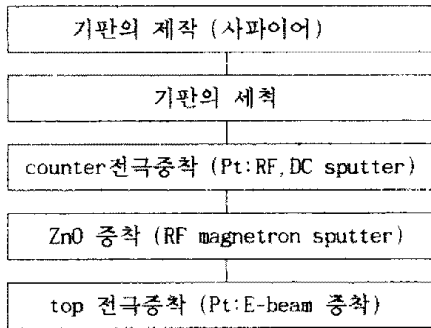
$$\eta = \frac{P_c}{P_i} = \frac{R_0 Z_3}{(R_0 + R_a + R_{se})^2 + (X_a + X_{se} - 1/\omega C_0)^2} \quad (2.7)$$

이고 여기서, $R_0 = 50\Omega$, $R_{ee} = 2\Omega$, $\lambda_{ee} = 1\text{mH}$ 로 선정하여 삽입손실을 이론적으로 산출하였고, 또한 실험을 통하여 비교, 검토하였다.

3. 실험

3.1. 압전변환기의 제작

본 실험에서는 증착률이 개선되고 2차전자에 의한 박막의 손상이 방지되는 R.F magnetron sputtering법으로 ZnO 박막을 증착하였다. 스퍼터시 박막의 특성은 기판 온도, 가스압력, RF입력전력, 증착률, 타겟-기판거리, Ar/O₂의 혼합비등과 같은 스퍼터조건의 미세한 변화에 따라 박막의 특성이 변화하므로 각 Parameter간의 조건을 고려하여 실험을 하여야 하며, 전체적인 변환기의 제작순서는 [그림 5]와 같다.



[그림 5] 압전변환기 제작순서

음향기판인 사파이어는 직경 6mm의 원통형태로 가공하였으며, RF magnetron sputter (Varian VKS35)로 ZnO를 증착하였고 Top전극은 E-Beam(Anelva)으로 증착하였다. [표 2]에 압전변환기 제작의 스퍼터 조건을 나타내었으며 이 조건으로 제작한 ZnO박막의 두께는 3.9 μm 이었다.

[표 2] ZnO 박막의 제작조건

스퍼터 변수	실험 조건
target 크기	4 inch
가스 압력	4.5×10^{-3} [Torr]
Ar/O ₂ 혼합비	50 : 50
기판 온도	350 [°C]
타겟 기판거리	6 [cm]
고주파 입력	200 [W]

3.2. ZnO박막의 특성측정

3.2.1. 미세조직 관찰

ZnO 압전박막층의 표면 및 기판과 박막계면과의 두께를 조사하기 위해 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하였다. 측정용으로 사용한 기판으로는 계면검사에 용이한 실리콘 웨이퍼를 사용하였다.

3.2.2. X-선 회절분석

X-선은 CuK α line($\lambda=1.542\text{\AA}$)을 사용하였으며 스텝폭과 주사속도는 각각 0.02, 0.2(sec)이었다. X-ray generator를 사용하여 회절각 20° - 70°의 범위에서 나타나는 Peak의 Miller Index(h, k, l)를 조사하여 증착된 박막의 C축배향성을 평가하였다.

3.2.3. 비저항의 측정

변환기로 사용하기 위해서는 $1.5 \times 10^6 [\Omega\text{cm}]$ 이상의 높은 비저항 값을 가져야 하므로 [4] 617 programmable electrometer를 사용하여 저항을 측정하였다.

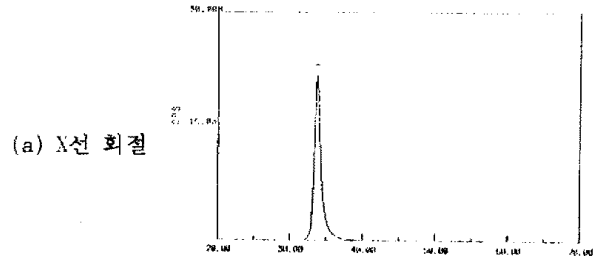
3.2.4. 변환기의 공진주파수 및 삽입손실의 측정

변환기의 공진주파수 및 삽입손실을 Network Analyzer (Wiltron Model 5400)로 입력 RF신호를 1[MHz]-1.5[GHz] 범위의 sweep 신호를 압전변환기에 인가하여 Network Analyzer의 mode를 변환함으로써 공진주파수 및 삽입손실을 측정하였다.

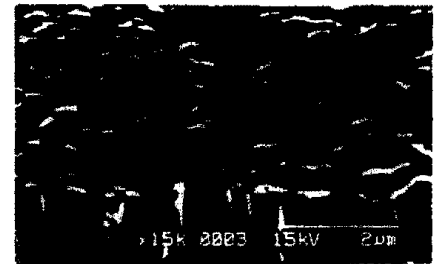
4. 결과 및 고찰

4.1. 박막의 특성 고찰

[그림 6]에 XRD 및 SEM의 회절무늬 및 미세구조를 나타내었다. [그림 6]에서 XRD의 2 θ 값이 34.4°에서 강한 peak을 보이며 이 각도의 면지수는 (0002)면으로 강한 c축 배향을 가짐을 알 수 있다. 또한, SEM 사진 결과 ZnO의 표면은 embosome의 형태를 나타내고 있으며 압전막의 계면은 columnar구조를 가짐을 알 수 있다. 이로써 XRD와 SEM으로 관찰한 증착된 ZnO압전층의 구조적특성은 변환기의 응용에 적합함을 알 수 있다.



(a) X선 회절



(b) SEM사진

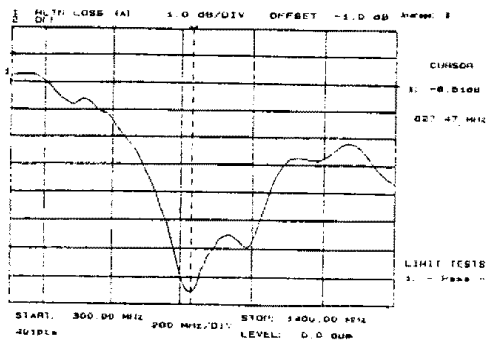
[그림 6] 증착된 ZnO박막의 XRD 및 SEM 분석

그리고 증착된 ZnO박막의 비저항은 617 programmable electrometer로 5회 측정하여 평균한 결과 비저항값은 $12.196 \times 10^9 [\Omega\text{cm}]$ 이므로 압전변환기의 응용에 적합함을 알 수 있다.

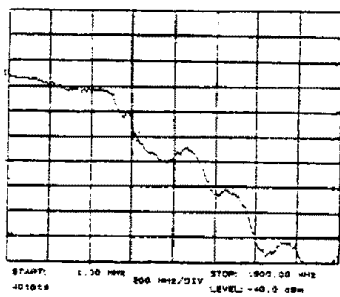
4.2. 압전변환기의 전기음향 특성

제작된 압전변환기의 전기음향특성 측정시 고주파 잡음을 최소화 할 수 있도록 측정장치를 제작하였으며 Network analyzer이용하여 측정주파수에서 입력임피던스를 50 Ω 으로 보정을 한 후 공진주파수 및 삽입손실을 측정하였다. [그림 7]은 시편의 공진주파수를 보이고 있으며, 823.5[MHz]에서 공진이 됨을 알 수 있다. 이론적으로 압전박막의 두께가 3.9 μm 일때의 공진주파수는 811.5[MHz]이므로 측정한 값과 거의 일치함을 보이고 있다. 여기서 실험치와 이론치의 약간의 차이는 박막형성의 불균일 및 두께의 오차로 사료된다. [그림8] Network

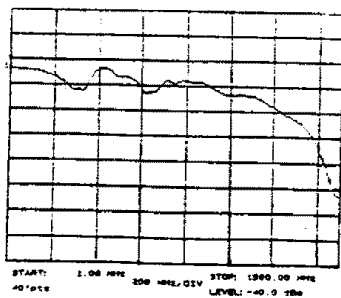
Analyzer로 측정된 삽입손실을 나타내었다. 그리고, [그림 9]는 측정된 삽입손실과 이론적으로 시뮬레이션한 삽입손실을 비교하였다. [그림 9]의 이론적인 음향특성곡선은 제작된 압전변환기의 각 제정수를 대입하여 시뮬레이션한 값을 데시벨(decibel)로 표시하여 그래프로 나타내었다. 또한, 변환기의 음향특성의 변화를 확인하고자 10[pF]를 측정회로에 직렬로 연결하여 삽입손실의 변화를 비교함으로써 변환기의 삽입손실의 타당성을 재확인하였다. 여기서, 각 제정수의 값은 압전결합계수(K_t)를 0.2로 하고 C_0 는 100[MHz]에서 측정된 값을 대입하였고, 정전용량의 각 값은 고주파에서 상당한 값의 변화가 있으므로 주파수의 변화에 대한 유전율변화의 일정한 함수를 대입하여 시뮬레이션하였다. [그림 9]에서 전반적인 삽입손실의 변화는 커패시터의 성분으로 나타나고 있으며 측정치는 이론치에 비해서 3~5[dB]의 감소를 보이며, 이는 측정장비의 고주파 장애와 접촉임피던스의 영향, 그리고 주파수에 따른 정전용량의 변화가 오차의 원인으로 생각된다. 그러나, 공진주파수 부근 즉, 600MHz~1GHz사이의 변화는 이론치와 거의 일정한 변화를 보이며 실제로 이 주파수 부근에서의 변환기의 응용이 가능하리라고 사료된다.



[그림 7] 변환기의 공진주파수



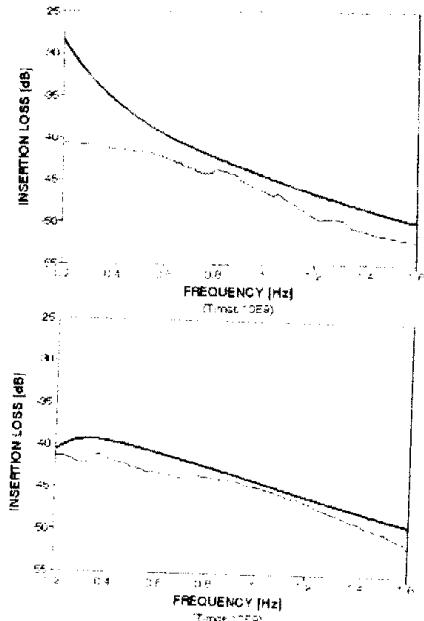
(a) C=0



(b) C=10 μF

[그림 8] 측정된 삽입손실

(a) C=0



(b) C=10 μF

[그림 9] 삽입손실의 이론치와 측정치 비교

5. 결론

본 연구에서는 ZnO/Sapphire 압전변환기의 전기 및 음향 특성인 대역폭 및 삽입손실을 이론적으로 분석, 정리하였다. 또한, RF magnetron sputter로 각 스퍼터조건의 상호관계를 고려하여 압전변환기를 제작하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ZnO/Sapphire 압전변환기의 대역폭은 전극의 두께가 두께워짐에 따라 상당한 왜형을 야기시킴을 확인하였으며, 특히 top전극이 counter전극보다 상대적으로 얇아야 한다.
2. [표 2]에 제시한 스퍼터링 조건에 따라 압전층이 3.9 μm 인 변환기를 제작하였으며, 증착한 ZnO 박막은 XRD 와 SEM분석결과 강한 c축배향성을 가짐을 알 수 있었고, 비저항 값은 $12.196 \times 10^9 [\Omega cm]$ 으로 양호한 압전변환기를 제작할 수 있었다.
3. 제작한 변환기의 공진주파수는 827.47MHz로 이론적인 공진주파수 811.5MHz와 거의 일치함을 보였다.
4. 제작한 변환기의 삽입손실은 이론치에 비해 4~5[dB]의 감소를 보이고 있으나 이론치와 측정치의 대역폭이 감소하는것은 거의 일치하고 있으므로 실제적인 압전변환기의 사용주파수 대역은 600MHz~1GHz의 대역에서 응용 가능하리라고 사료된다.

참고문헌

- [1] Thomas M.Reeder, "characteristic of Microwave Acoustic Transducers for Volume Wave Excitation", IEEE TRANS ON MTT, vol.17, pp927, 1969
- [2] G.S.Kino, Acoustic waves devices, Imaging, and analog signal processing, Prentice- Hall, Inc, 1987, Chapi
- [3] W.Crofut, "Broadband microwave acoustic delay lines," Microwave J., pp.65-72, Jan. 1967.
- [4] H.W.Lehmann and R.Widmer, "RF sputtering of ZnO shear-wave ransducer", J, APPL, PHYS, VOL, 44, NO, 9, pp3868, 1973