

공진주파수 스펙트럼법을 이용한 압전박막의 특성 평가

최준영, 장동훈, *강성준, 윤영섭

인하대학교 전자·전기공학부, *여수대학교 반도체학과

전화 : 032-873-1345 / 핸드폰 : 016-249-9947

Evaluating Piezoelectric Thin Film Characteristics Using Resonance Spectrum Method

Joon Young Choi, Dong Hoon Chang, Seong Jun Kang, Yung Sup Yoon
 Dept. of Electric & Electrical Engineering, Inha University
 Dept. of Semiconductor Materials & Devices, Yosu National University
 E-mail : brainpowerbr@hotmail.com

요약

We studied the characteristics of impedance and electromechanical coupling coefficient in ZnO and AlN thin films by using resonance frequency spectrum method. The response peak of impedance decreased with the decrease of thickness of piezoelectrics, the number of mode of response peak increased with the increase of substrate thickness. An error of k_t^2 estimated from input k_t^2 increased as the thickness of piezoelectrics decreased and the thickness of substrate increased. Also, the error was increased in case of a large acoustic impedance of substrate. It was found that the composite resonator operating in optimized condition could be designed through the resonance frequency spectrum analysis of composited resonator consisted of piezoelectric thin film and substrate.

1. 서론

최근 압전 박막을 이용한 filter, resonator, actuator, sensor 등과 같은 소자에 대한 관심이 높아지면서, 이러한 소자들의 동작향상을 위해 압전특성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 압전특성을 나타낼 때는 압전상수 (d_{33}) 와 두께방향 전기기계 결합계수 (k_t^2) 등이 사용된다. 압전체 소자의 동작 향상을 위해서는 기계(또는 전기)적에서 전기(또는 기계)적 에너지로의 변환 효율을 나타내는 전기-기계 결합계수가 중요하며, 소자의 크기가 소형화됨에 따라 압전박막을 이용하기 때문에 전극에 의한 영향도 고려한 평가 방법이 필요

하다. 그 결과 압전체와 기판 그리고 상·하부 전극으로 이루어진 형태를 가진 composite 공진기의 전기-기계 결합계수 특성이 필요하게 되었으며, 공진주파수 스펙트럼법을 이용한 composite 공진기의 특성에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.[1,2]

본 논문에서는 공진주파수 스펙트럼법의 이론적 분석을 통해 4층으로 구성된 composite 공진기에서 ZnO 와 AlN 박막에 대해 임피던스 및 전기기계 결합계수 특성에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 이론적 배경

압전박막과 상·하부전극 그리고 기판으로 구성된 composite 공진기 4층의 전기적인 입력 임피던스는 Sittig 의 모델[3]로부터 이끌어 낼 수 있으며, 전극의 효과가 없는 경우 composite 공진기의 전기적 입력 임피던스는 식(1) 과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - \frac{k_t^2}{\gamma} \frac{(2 \cdot \tan(\gamma/2) + z_b \cdot \tan \gamma_b)}{(1 + z_b \cdot \tan \gamma_b / \tan \gamma)} \right] \quad (1)$$

여기서, $k_t^2 = (h_{33}^2 \cdot \epsilon_{33}^S) / c_{33}^D$, $\gamma = (2\pi f / V_p) \cdot l$, $\gamma_b = (2\pi f / V_b) \cdot l$ 이고, $C_0 = (\epsilon_{33}^S \cdot A) / l$ 는 공진기의 고정 캐패시턴스이다. stiffness 는 $c_{33}^D = \rho_p \cdot V_p^2$ 으로 표현되며, ρ_p , V_p 는 각각 압전박막의 종방향으로 밀도와 속도이다. 또한, $z_b = Z_b / Z_p$ 로 Z_b 와 Z_p 는 각각 기판과 압전층의 acoustic 임피던스로 $Z_b = \rho_b \cdot V_b \cdot A$ 이고, $Z_p = \rho_p \cdot V_p \cdot A$ 이다. 여기서, A는 공진기의 표면적이다. 이러한 전기적 입력 임피던스는 여러 모양의 피크로 나타나고, 각 피크는 공진 모드에 대한 응답특

성을 나타내며, 임피던스의 응답은 공진기 각 층의 두께와 재료의 acoustic 성질에 의해 결정된다. 각 피크는 직렬·병렬 공진주파수 한 개의 쌍을 나타내며, IEEE의 표준[4]에 의한 식(2)를 이용해 각 모드(m)의 k_{eff}^2 을 계산할 수 있다.

$$k_{eff}^2(m) \approx \left(\frac{\pi^2}{4}\right) \cdot \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \left(1 - \frac{f_s(m)}{f_p(m)}\right) \quad (2)$$

여기서, m은 각 공진 모드를 나타낸다.

압전체와 기판의 임피던스 비에 따라 normal과 transition 영역에서 각각의 모드 m_N 과 m_T 를 가지며 각각 식(3)과 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 그림 1에 m_N 과 m_T 를 나타내었다. $\rho_b V_b / \rho_p V_p \ll 1$ 인 경우 '무른(soft) 기판'이라고 하며, 주파수 $f = v/2l$ 에서 최대 $k_{eff}^2(m_N)$ 이 위치하고 압전박막은 $\lambda/2$ 공진기처럼 동작하며, $\rho_b V_b / \rho_p V_p \gg 1$ 인 경우 '단단한(hard) 기판'이라고 하며, 주파수 $f = v/4l$ 에서 최대 $k_{eff}^2(m_T)$ 가 위치하며 $\lambda/4$ 공진기처럼 동작한다.[2]

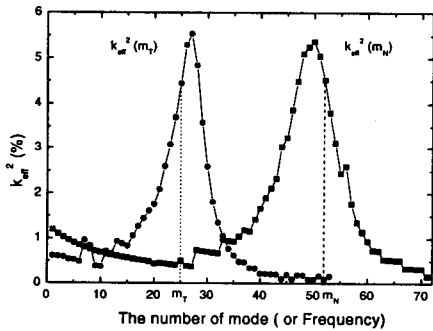


그림 1. ZnO와 AlN 압전박막의 모드(또는 주파수)에 따른 $k_{eff}^2(m_T)$ 와 $k_{eff}^2(m_N)$

$$m_N = \left(\frac{v_p \cdot l_b}{v_b \cdot l_p}\right) + 1 \quad (3)$$

$$m_T = \left(\frac{v_p \cdot l_b}{2v_b \cdot l_p}\right) + \frac{1}{2} \quad (4)$$

표 2. 시뮬레이션에 사용된 압전체와 기판 및 전극의 parameter

	material	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$V(\text{m/s})$	$l(\mu\text{m})$	ϵ_{33}	$c_{33}(10^{10}\text{N/m}^2)$	Impedance ($10^6\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$k_t^2(\%)$
Electrode	Au	19300	3400	0.05			65.62	
	Al	2695	6350	0.05			17.2	
Piezoelectric	AlN	3260	10400	0.5~2	8	39.5	33.904	2.945
	ZnO	5525.3	6135.9	0.5~2	10.2	21.1	33.9	8.02
Substrate	Si	2330	8947	275~1100			20.85	
	Steel	7800	5231	275~1100			40.8	

그리고 각각의 경우에 대해 다음의 식(5)와 (6-1)에 대입하여 k_t^2 값을 평가할 수 있다.

$$k_t^2 = \left(1 + \frac{\rho_b b}{\rho l}\right) \cdot (k_{eff}^2(m_N)) \quad (5)$$

$$k_t^2 = \left[1 + \left(\frac{b}{l}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot c^2}{\rho_b \cdot v_b^2}\right)\right] \cdot \frac{1}{\Gamma} \cdot (k_{eff}^2(m_T)) \quad (6-1)$$

$$\Gamma = 1 + 2 \cdot \frac{\rho c}{\rho_b v_b} \cdot (1 + \Sigma') \cdot \delta' \quad (6-2)$$

여기서, 식(6-2)는 m_T 가 매우 클 때, 즉 공진 모드 수가 많은 경우에 정확하게 k_t^2 값을 평가하기 위해 사용되는 보정 계수이다.

두 번째로 전극의 효과를 포함한 경우, 4층으로 구성된 composite 공진기의 전기적 입력 임피던스는 식(7)과 같이 표현된다.[2]

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - k_t^2 \frac{(z_1 + z_2) \sin \gamma + j2(1 - \cos \gamma)}{(z_1 + z_2) \cos \gamma + j(1 + z_1 z_2) \sin \gamma}\right] \quad (7)$$

여기서, $z_1 = Z_1/Z_0$, $z_2 = Z_2/Z_0$, $Z_1 = jZ_{el} \tan \gamma_{el}$,

$$Z_2 = j \frac{Z_{sb} \tan \gamma_{sb} + Z_{el} \tan \gamma_{el}}{1 - (Z_{sb}/Z_{el}) \tan \gamma_{el} \tan \gamma_{sb}}, \quad \gamma_{el} = \frac{\omega d_1}{V_{el}},$$

$$\gamma_{el} = \frac{\omega d_2}{V_{el}}, \quad \gamma_{sb} = \frac{\omega d_{sb}}{V_{sb}}, \quad Z_{el} = A \cdot \rho_{el} \cdot V_{el},$$

$$Z_{el} = A \cdot \rho_{el} \cdot V_{el}, \quad Z_{sb} = A \cdot \rho_{sb} \cdot V_{sb} \text{ 이다.}$$

공진주파수 스펙트럼법은 압전체와 기판은 손실이 없다는 가정을 이용하며, 시뮬레이션에서 손실에 대한 부분은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 논의

표 1에 시뮬레이션에 사용한 parameter를 나타내었다. composite 공진기의 임피던스 특성에 압전체와 기판이 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 압전체 및 기판의 두께를 변화시켜 기판과 압전체의 acoustic 임

피던스 비에 따른 임피던스 특성 변화를 조사해 보았다. 일정한 기판 두께에 대해 압전체 두께를 변화시킨 경우 임피던스 피크의 모드 간격은 일정 했으며, 두께가 감소함에 따라 주파수 범위만 커지는 결과가 나왔다. 그림 2 는 0.5 μm 의 ZnO 에서 기판의 두께를 변화시켰을 경우의 임피던스 응답을 나타낸 것으로 기판 두께 증가에 따라 응답 모드 수가 감소함을 알 수 있으며, 이것은 기판의 두께 증가로 wave 의 진행거리가 더 길어지기 때문인 것으로 생각된다.

기판의 acoustic 임피던스 차이에 의한 임피던스 응답 특성은 임피던스가 큰 steel 기판의 경우 임피던스가 작은 Si 기판보다 응답 피크의 크기는 작지만 더 많은 모드 수가 관찰되었다.

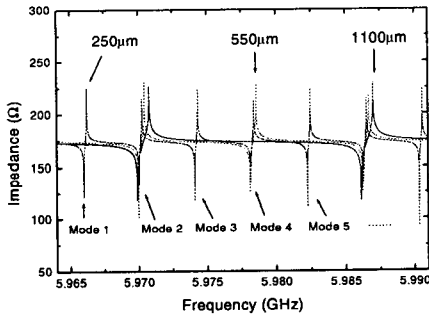


그림 2. Si 두께에 따른 임피던스 특성 변화

이와 같은 결과로 기판과 압전박막의 두께, 기판 및 전극의 acoustic 임피던스에 의한 composite 공진기의 임피던스 특성을 알 수 있었다. 임피던스 특성을 토대로 IEEE 표준[4] 식(2) 를 이용해 각각의 경우에 대해 k_{eff}^2 특성을 알아보았다.

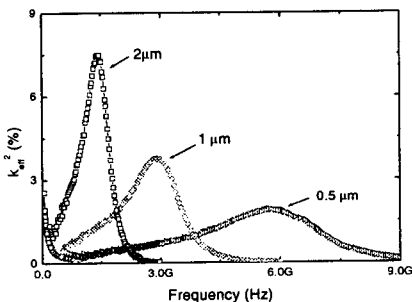


그림 3. ZnO 박막의 두께에 따른 k_{eff}^2 의 변화

그림 3 은 압전체 두께 변화에 대한 k_{eff}^2 의 변화를

주파수에 대해 나타낸 것이다. 두께가 증가함에 따라 주파수 범위는 작아지는 반면에 k_{eff}^2 값은 증가함을 알 수 있었다. 표 2 에 압전체 두께 변화에 대하여 계산한 k_i^2 값을 나타내었다. ZnO 와 AlN 의 두께가 감소함에 따라 k_{eff}^2 값과 같이 k_i^2 값도 감소하였다. 여기서 k_i^2 값의 감소는 실제의 동작 값과 오차가 커짐을 의미한다.

표 3. 시뮬레이션을 통해 평가된 ZnO 와 AlN 압전 박막의 두께에 따른 k_i^2

	Input k_i^2 (%)	0.5 μ -(%)	1 μ -(%)	2 μ -(%)
ZnO	8.02	2.746	4.142	7.3
AlN	2.945	0.579	0.84	1.564

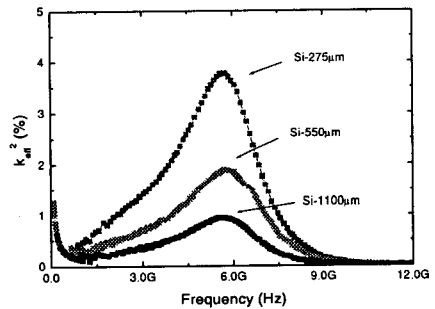


그림 4. 실리콘 기판의 두께 변화에 따른 ZnO(0.5 μm) 박막의 k_{eff}^2 변화

표 4. 실리콘 기판 두께 변화에 대한 ZnO (0.5 μm) 박막의 k_i^2 값의 변화

	Input k_i^2 (%)	Evaluating k_i^2 (%)
Si-275 μm	8.02	1.034
Si-550 μm	8.02	2.746
Si-1100 μm	8.02	3.906

그림 4 는 기판의 두께를 변화시킨 경우 k_{eff}^2 의 변화를 나타낸 것이다. 기판의 두께가 증가함에 따라 k_{eff}^2 의 값이 작아졌으며, 압전체 두께를 변화시켰을 때와 비교해 기판의 두께를 변화시킨 경우, 즉 기판과 압전체의 동일한 임피던스비에서 기판의 두께를 변화시켰을 경우에 k_{eff}^2 값의 감소가 더 큰 것으로 보아 기판에 의한 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다. 기판 두께 변화에 대한 k_i^2 값을 계산하여 표 3 에 나타내었으며, 표 2 에 나타낸 k_i^2 값과의 비교를 통해서도 composite 공진기에서, 압전박막은 기판의 영향에 의해 지배된다고 볼 수 있다.

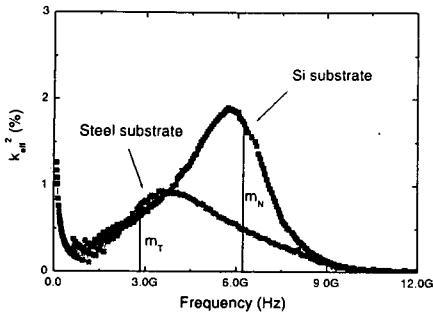


그림 5. 기판의 acoustic 임피던스 크기에 대한 ZnO(0.5μm) 박막의 k_{eff}^2 변화

그림 5 는 기판의 acoustic 임피던스 크기에 따른 k_{eff}^2 의 변화를 나타낸 것이다. 임피던스가 큰 steel 기판의 경우 k_{eff}^2 의 값이 더 작아지며, 최대 k_{eff}^2 은 m_r 영역에서 나타났고, 임피던스가 작은 Si 기판의 경우, m_n 영역에서 최대 k_{eff}^2 이 나타났다.[2] 즉, 기판의 acoustic 임피던스에 의해서도 k_{eff}^2 이 영향을 받으며, 식(4) 와 식(6-1) 을 이용해 k_t^2 값을 구해 비교해보면 steel 기판의 k_t^2 값이 작은 것을 확인할 수 있었으며, 기판의 acoustic 임피던스에 의해 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 전극의 효과를 포함한 경우 k_{eff}^2 의 변화는 전극의 효과를 첨가함으로써 k_{eff}^2 이 증가하는 것이 관찰되었으며, 전극의 임피던스가 클수록 k_{eff}^2 의 오차가 더 커지는 결과가 나왔다. 공진주파수 스펙트럼법은 전극을 질량 부하로 고려하기 때문에 전극의 효과에 의해 k_t^2 값이 커지며, 이러한 결과는 Zhang 등에 의한 보고와 일치한다.[1] 시뮬레이션을 통해 composite 공진기는 전극 물질의 acoustic 임피던스에 의해서도 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

위와 같은 시뮬레이션 결과는 전극과 기판 그리고 압전체의 두께 및 acoustic 임피던스와 식(3), (4), (5), (6) 을 이용하면 원하는 주파수 대역에서 동작하는 composite 공진기의 설계가 가능하다는 것을 말해준다. 박막의 정확한 k_t^2 값을 알고 있다면 좀 더 정확한 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문은 상·하부 전극과 압전박막 그리고 기판의 4층으로 이루어진 composite 공진기의 임피던스 특성과 전기-기계 결합계수 특성에 대해 연구하였다. 입력 k_t^2 값과 시뮬레이션을 통해 평가한 k_t^2 값 사이의 오차는 압전박막의 두께가 작아질수록 커진다. 이것은 압

전박막의 각 두께에 대해 직접 측정된 k_t^2 의 값이 아니기 때문이며, 직접 제작한 압전 박막의 k_t^2 을 측정하여 대입하면 손실을 제외한 압전박막 실제의 k_t^2 값에 대한 평가를 할 수 있을 것으로 생각된다.

공진주파수 스펙트럼법을 이용하여 ZnO 와 AlN 압전박막의 임피던스 특성 및 전기기계결합계수 특성에 대해 조사한 결과 압전체의 두께가 얇을수록 임피던스 응답 피크의 크기 감소와 기판의 두께 감소에 따른 응답 피크의 모드 수 증가가 관찰되었다. 입력 k_t^2 값으로부터 평가된 ZnO 와 AlN 박막의 k_t^2 값의 오차를 통해 압전체 보다 기판의 영향이 크다는 것을 확인하였으며, 기판의 acoustic 임피던스에 의해서도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 또한 전극에 의해서도 영향을 받으며, 전극의 acoustic 임피던스가 큰 경우 영향이 더 커졌다. 따라서 직접 제작한 압전박막의 parameter 를 이용하면 정확한 시뮬레이션을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 공진주파수 스펙트럼법을 이용하여 압전박막과 기판으로 구성된 composite 공진기의 동작 특성 분석을 통해 composite 공진기의 설계도 가능할 것으로 기대된다.

Reference

- [1] Yuxing Zhng et al, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., vol. 50, NO.3 pp. 321~333, 2003.
- [2] S. Y. Pao et al, 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, pp. 27~35, 2002.
- [3] E. K. Sittig, W. P. Mason, R. N. Thurston (Eds.), Physics Acoustics Vol. IX, Academic Press, New York, 1972, pp. 221~275.
- [4] "IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE std. 176-1987)", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., vol. 43, NO.5, pp. 719~772., 1996.