

논문 2005-42SD-1-2

공진주파수 스펙트럼법을 이용한 Composite Resonator 구조에서 압전박막의 특성 평가에 대한 연구

(A Study on the Evaluation of Piezoelectric Thin Film Characteristics
in Composite Resonator Structure Using Resonance Spectrum Method)

최준영*, 장동훈**, 강성준***, 윤영섭**

(Joon Young Choi, Dong Hoon Chang, Seong Jun Kang, and Yung Sup Yoon)

요약

공진주파수 스펙트럼법을 이용하여 ZnO 와 AlN 압전박막의 임피던스 특성 및 전기기계결합계수 특성에 대해 조사하였다. 압전박막의 두께가 얇아수록 전체적인 임피던스 응답 피크의 크기가 감소하였으며, 기판의 두께가 얇아수록 응답 피크의 모드 수가 감소하는 것이 관찰되었다. 입력 k_t^2 값으로부터 평가된 k_i^2 값을 통해 압전박막의 두께보다 기판의 두께 변화에 대한 영향이 더 크울 알 수 있었고, 기판의 acoustic 임피던스에 의해서도 k_i^2 값이 감소함을 알 수 있었다. 전극 효과가 첨가되면 임피던스 응답 피크의 크기가 감소하였으며, 전극의 acoustic 임피던스가 커짐에 따라 응답피크는 더 작아졌다. 공진주파수 스펙트럼법에서 전극은 질량부하로 고려되기 때문에 전극 효과가 첨가된 경우 k_{eff}^2 값은 증가하며, 전극의 acoustic 임피던스가 크면 그 효과는 더 커졌다. 공진주파수 스펙트럼법을 이용한 시뮬레이션을 통해 기판, 압전체, 전극으로 이루어진 composite 공진기의 특성 분석과 설계까지도 가능함을 알 수 있었다.

Abstract

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 decreased with the decrease of substrate thickness. An error of k_i^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.

Keywords: electromechanical coupling factor, piezoelectric, composite resonator, acoustic impedance

I. 서론

최근 압전 박막을 이용한 filter, resonator, actuator, sensor 등과 같은 압전 소자에 대한 관심이 높아지면서,

이러한 압전 소자들의 성능 향상을 위해 압전특성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^[1,2] 압전특성을 나타낼 때는 압전상수 (piezoelectric constant, d_{33})와 두께방향 전기기계 결합계수 (thickness electro-mechanical coupling coefficient, k_t^2) 등이 사용되며, 일반적으로 압전체는 기판 위에 구성되어 사용되기 때문에 압전 소자의 성능 향상을 위해서는 기계 (또는 전기) 적에서 전기 (또는 기계) 적 에너지로의 변환 효율을 나타내는 전기-기계 결합계수가 중요하다.^[3] 또, 소자의 크기가

* 학생회원, ** 정회원 인하대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Inha University)

*** 정회원, 여수대학교 반도체학과
(Dept. of Semiconductor Materials & Devices,
Yosu National University)

접수일자: 2004년7월2일, 수정완료일: 2004년12월16일

소형화됨에 따라 전극에 의한 영향도 고려를 해주어야 한다.^[4] 그 결과 압전체와 기판 그리고 상·하부 전극으로 이루어진 형태를 가진 composite 공진기의 전기-기계 결합계수 특성이 필요하게 되었으며, 현재 composite 공진기의 특성에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[4-9]

공진주파수는 압전체의 acoustic 성질을 정확하게 측정하여 특성화 할 수 있는 방법으로 IEEE 표준^[10]이 있으며, 여기서 압전체의 전기-기계 결합계수를 공진과 반공진 주파수로 결정하고 있다. 이러한 특성을 이용한 공진주파수 스펙트럼법(Resonant Spectrum Method)^[4]이 제안되어 압전박막이 기판에 증착되어 두께 방향 진동 모드의 공진기로 사용되는 경우, 압전체의 전기-기계 결합 계수를 평가하기 위해 입력 임피던스 데이터로부터 몇 가지 변환법이 사용되고 있다.^[11,12] 특히, 이 중에서 Zhang^[6] 등에 의해 제안된 방법은 압전체의 두께 값을 알 필요가 없으며, composite 공진기의 두 개의 특정 공진모드 (mN과 mT)의 k_{eff}^2 값으로부터 k_t^2 값을 직접 계산할 수 있다는 장점이 있으며, 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 공진주파수 스펙트럼법은 4층으로 이루어진 composite 공진기 각 층의 물질을 질량부하 (mass loading) 효과로 고려하여 해석하고 있으며, 각층의 두께 및 임피던스 비를 이용하여 원하는 조건에서 동작을 하는 composite 공진기의 설계까지도 가능하다고 보고되고 있다.^[4-8] 최근에는 전극의 효과를 포함한 경우에 대한 연구까지 확장되고 있다. 또, 공진주파수 스펙트럼법을 이용하면 압전체와 기판의 두께 변화에 대한 임피던스 특성 및 압전체와 기판의 acoustic 임피던스 비에 의한 공진기의 임피던스 특성 변화, 그리고 전극의 acoustic 임피던스에 따른 변화에 대한 것도 고려 할 수 있다. 하지만 아직까지 임피던스 특성 변화 및 압전체와 기판의 두께 변화 특성에 대한 연구는 잘 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 공진주파수 스펙트럼법의 이론적 분석과 방법에 대한 설명을 통해 ZnO 와 AlN 박막에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 압전박막과 기판으로 구성된 경우에 대해 기판의 두께 및 압전박막의 두께 변화에 대한 임피던스 특성변화를 관찰하였고, 임피던스 특성으로부터 k_{eff}^2 값을 계산하여 k_t^2 값을 평가하였다. 그리고 기판의 acoustic 임피던스 비에 의한 효과와 전극의 효과를 포함한 경우에 대한 시뮬레이션을 통해 각각의 임피던스 특성과 주파수에 따른 k_{eff}^2 값의 변화를 연구하였고, k_t^2 값을 계산하여 평가하였으며, 전극

의 acoustic 임피던스에 대한 변화도 조사하였다.

II. 이론적 배경

공진주파수 스펙트럼법은 그림 1 과 같이 4 층으로 이루어진 composite 공진기의 특성 및 압전박막의 k_t^2 값을 직접적으로 평가 할 수 있는 장점이 있다. 공진주파수 스펙트럼법에서 composite 공진기의 전기적 입력 임피던스는 suttig 의 모델^[13]로부터 이끌어 낼 수 있으며, 전극의 효과를 포함하지 않은 경우 composite 공진기의 전기적 입력 임피던스는 식 (1) 과 같이 표현된다.

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

여기서, $k_t^2 = (h_{33}^2 \cdot \epsilon_{33}^S) / c_{33}^D$ 이고, 압전박막 경계면에서의 위상지연 $\gamma = (2\pi f / V_p) \cdot l$ 이고, 기판의 경계면에서의 위상지연 $\gamma_b = (2\pi f / V_b) \cdot l$ 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, 여기서 ρ_p 는 압전박막의 밀도이고, V_p 는 압전박막의 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, $Z_p = \rho_p \cdot V_p \cdot A$ 이며, 여기서 A 는 공진기의 표면적이다. IEEE 표준^[10]에 의해 단일 압전체면에서 실수 부분의 Z_{in} 은 최대 저항의 응답인 병렬 공진주파수로 정의 할 수 있으며, 식 (1) 의 $Z_{in} = \infty$ 일 때 구할 수 있으며, 식 (2) 와 같다. 그리고 컨덕턴스의 최대 응답이 직렬 공진 주파수가 된다. 즉, 실수 부분이 $Y_{in} = 1 / Z_{in}$ 이 되며, 식 (1) 의 $Z_{in} = 0$ 일 때 얻을 수 있으며, 식 (3) 과 같이 된다. 이러한 정의에 의해 전체 모드에 대한 직렬 및 병렬 공진 주파수를 재료의 손실이 없는 경우 식 (2) 와 (3) 을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tan(\gamma) + z_b \tan(\gamma_b) = 0 \quad (2)$$

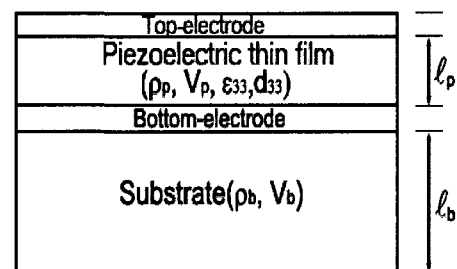


그림 1. Composite 공진기의 구조

Fig. 1. Configuration of the composite resonator.

$$\tan(\gamma) + z_t \tan(\gamma_b) = \left(\frac{k_t^2}{\gamma}\right) 2 \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) + z_t \tan(\gamma_b) \tan(\gamma) \quad (3)$$

이러한 전기적 입력 임피던스는 여러 모양의 피크로 나타나고, 각 피크는 공진 모드에 대한 응답특성을 나타내며, 임피던스의 응답은 composite 공진기 각 층의 두께와 재료의 acoustic 성질에 의해 결정된다. 각 피크는 직렬·병렬 공진주파수 한 개의 쌍을 나타내며, IEEE의 표준^[10]에 의한 식 (4)를 이용해 각 모드(m)의 k_{eff}^2 값을 계산할 수 있다.^[4]

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

여기서 f_s 는 컨덕턴스의 최대 응답을 나타내는 직렬 공진주파수, f_p 는 임피던스의 최대응답을 나타내는 병렬 공진주파수, 그리고 m은 각 공진 모드를 나타낸다.

그림 2에 모드(또는 주파수)에 따른 k_{eff}^2 값의 변화를 나타내었다. 그리고 압전체와 기판의 임피던스 비에 따라 normal 과 transition 영역에서 각각의 모드 m_N 과 m_T 를 가지며 식 (5)와 (6)을 이용해 구할 수 있다.

기판과 압전체의 acoustic 임피던스비가 $\rho_b V_b / \rho_p V_p \ll 1$ 인 경우 최대 k_{eff}^2 값의 위치가 그림 2에서 보듯이 모드 m_N 에 근접함을 알 수 있으며, 이 경우 주파수 $f=v/2\ell$ 에서 최대 $k_{eff}^2(m_N)$ 이 위치하고 압전박막은 $\lambda/2$ 공진기처럼 동작한다. 반대로 기판과 압전체의 acoustic 임피던스비가 $\rho_b V_b / \rho_p V_p \gg 1$ 인 경우 최대 k_{eff}^2

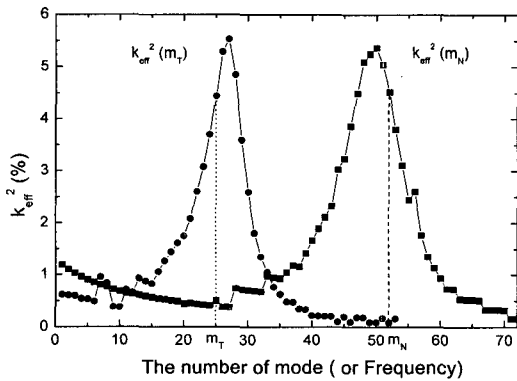


그림 2. 모드 (또는 주파수)에 따른 $k_{eff}^2(m_T)$ 와 $k_{eff}^2(m_N)$

Fig. 2. The effective coupling factor m_T and m_N distribution of the mode(or frequency).

값의 위치가 모드 m_T 에 근접하며, 이 경우 주파수 $f=v/4\ell$ 에서 최대 $k_{eff}^2(m_T)$ 가 위치하고, $\lambda/4$ 공진기처럼 동작하게 된다.^[5]

$$m_N = \left(\frac{v_p \cdot l_b}{v_b \cdot l_p}\right) + 1 \quad (5)$$

$$m_T = \left(\frac{v_p \cdot l_b}{(2v_b \cdot l_p)} + \frac{1}{2}\right) \quad (6)$$

여기서 l_b 와 l_p 는 각각 기판과 압전체의 두께이다.

그리고 각각의 모드 m_T 와 m_N 인 경우에 대해 다음의 식 (7)과 (8)에 대입하여 k_t^2 값을 평가할 수 있다. 여기서 식 (9)는 m_T 가 매우 클 때, 즉 공진 모드 수가 많은 경우에 정확하게 k_t^2 값을 평가하기 위해 사용되는 보정 계수이다.^[7] 또한 식 (7)과 (8)은 박막의 k_t^2 값이 $k_{eff}^2(m_N)$ 과 $k_{eff}^2(m_T)$ 또는 두 층의 질량비, 그리고 두 층의 두께에 의해 결정될 수 있다는 것을 보여준다.

$$k_t^2 = \left(1 + \frac{\rho_b b}{\rho l}\right) \cdot (k_{eff}^2(m_N)) \quad (7)$$

$$k_t^2 = 1 + \left(\frac{b}{l}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot c^2}{\rho_b \cdot v_b^2}\right) \cdot \frac{1}{\Gamma} \cdot (k_{eff}^2(m_T)) \quad (8)$$

$$\Gamma = 1 + 2 \cdot \frac{\rho c}{\rho_b v_b} \cdot (1 + \Sigma') \cdot \delta' \quad (9)$$

두 번째로 전극의 효과를 포함한 경우, 4층으로 구성된 composite 공진기의 전기적 입력 임피던스는 식 (10)과 같이 표현된다.^[5]

$$Z_m = \frac{V}{I} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - k_t^2 \frac{(z_1 + z_2) \sin \gamma + j2(1 - \cos \gamma)}{(z_1 + z_2) \cos \gamma + j(1 + z_1 z_2) \sin \gamma} \right] \quad (10)$$

여기서, $z_1 = Z_1/Z_0$, $z_2 = Z_2/Z_0$ 로 각각 상부 전극과 기판, 하부전극과 기판 사이의 acoustic 임피던스비를 normalized 하여 나타낸 것으로 다음과 같이 표현된다.^[4]

$$Z_1 = jZ_{e1} \tan \gamma_{e1}$$

$$Z_2 = j \frac{Z_{sb} \tan \gamma_{sb} + Z_{e2} \tan \gamma_{e2}}{1 - (Z_{sb}/Z_{e2}) \tan \gamma_{e2} \tan \gamma_{sb}}$$

각 층간의 위상 지연 γ 는 $\gamma_{e1} = \omega d_1 / V_{e1}$, $\gamma_{e2} = \omega d_2 / V_{e2}$, $\gamma_{sb} = \omega d_{sb} / V_{sb}$ 로 표현되며, 아래 첨자 e_1, e_2, s_b 는 각각 상부전극, 하부전극, 기판임을 표시한다. 또한 각층의 acoustic 임피던스는 $Z_{e1} = A \cdot \rho_{e1} \cdot V_{e1}$,

표 1. 시뮬레이션에 사용된 composite 공진기의 변수들

Table 1. The Parameters of composite resonators used in simulation.

	Material	ρ (kg/m ³)	V (m/s)	l (μ m)	ϵ_{33}	C ₃₃ (10 ¹⁰ N/m ²)	Impedance (10 ⁶ kg/m ² ·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	

$Z_{el} = A \cdot \rho_{el} \cdot V_{el}$, $Z_{sb} = A \cdot \rho_{sb} \cdot V_{sb}$ 가 된다. 위의 식 (10) 을 이용할 경우 각각 m_T 와 m_N 모드에서 k_t^2 값은 아래의 식 (11) 과 식 (12) 를 이용해 구할 수 있다.^[4]

$$k_t^2 = \frac{\rho l (\rho l + \rho_{sb} l_{sb} + \rho_{e1} l_{e1} + \rho_{e2} l_{e2})}{\left(\rho l + \rho_{e1} l_{e1} + \frac{1}{2} \rho_{e2} l_{e2} \right)^2} k_{eff}^2 (m_N + 1) \quad (11)$$

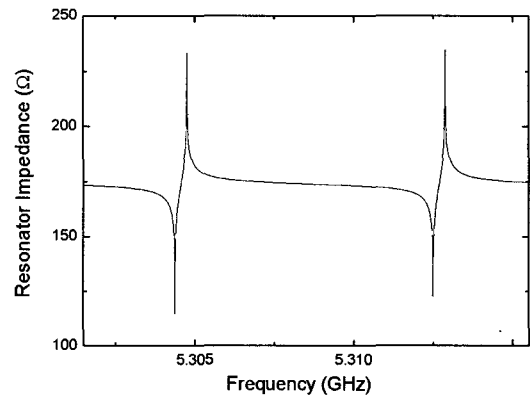
$$k_t^2 = \frac{\rho l \left[1 + \frac{\rho_a l_a}{\rho l} + \frac{\rho V_a^2 l_a}{\rho_a V_a^2 l} + \left(\frac{\rho^2 V_a^2}{\rho_a V_a^2} + 1 \right) \frac{\frac{1}{2} \rho_a l_a}{\rho l} \right]}{\rho l + \rho_a l_a + \frac{1}{2} \rho_{e2} l_{e2}} \times \frac{k_{eff}^2 (m_T + 1)}{\Gamma} \quad (12)$$

여기서 Γ 는 보정계수^[4]로 전극 효과가 없는 경우와 같이 k_t^2 값의 오차를 줄이기 위해 사용되며 식 (13) 과 같이 표현된다.

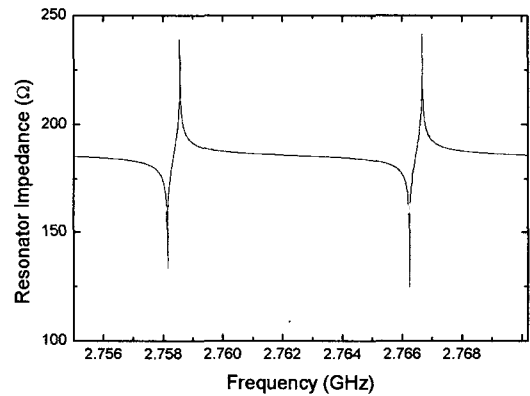
$$\Gamma = 1 - 2\rho_0 v \cdot \left(1 + \frac{2\pi f_s l}{v} - \frac{\pi}{2} \right) \times \left(\frac{2\pi f_s l}{\rho_{sb} v_{sb}^2} - \frac{\left(m_T + \frac{1}{2} \right) \pi}{\rho_{sb} v_{sb}} + \frac{2\pi f_s l_{e2}}{\rho_{e2} v_{e2}^2} \right) \quad (13)$$

III. 결과 및 논의

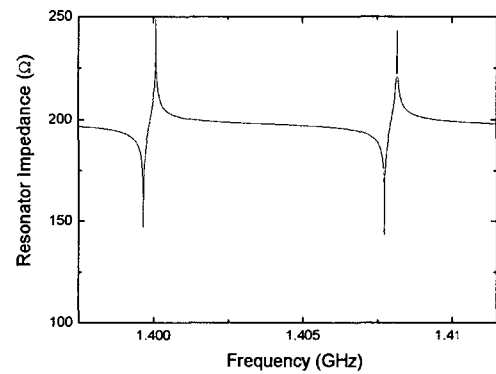
일반적으로 모든 압전체 재료와 기관에는 손실이 존재한다. 따라서 식 (2) 와 식 (3) 보다는 식 (1) 과 식 (10) 을 이용하여 시뮬레이션을 실시하는 것이 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있다.^[45] 표 1 에 시뮬레이션에 사용한 변수들을 나타내었다. 압전박막이 기관에 증착되어 두께 방향 진동모드로 사용되는 composite 공진기에서 압전박막과 기관이 공진기에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 압전체와 기관의 두께를 변화시키고 기관과 압전박막의 acoustic 임피던스 비에 따른 composite 공진기의 임피던스 특성 변화를 조사해 보았다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. ZnO 두께 변화에 대한 임피던스 응답 : (a) ZnO 0.5 μ m, (b) ZnO 1 μ m, (c) ZnO 2 μ m

Fig. 3. Response of Impedance for various ZnO thickness.: (a)ZnO 0.5 μ m, (b)ZnO 1 μ m, (c)ZnO 2 μ m.

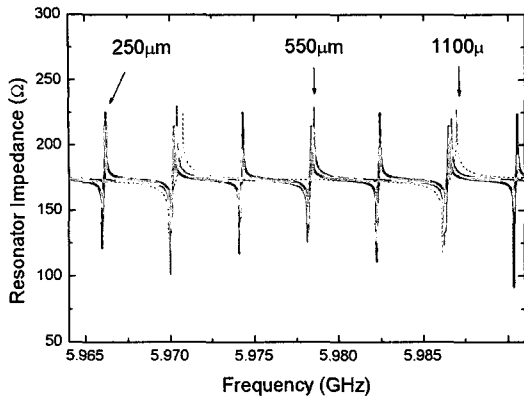


그림 4. 실리콘 기판 두께에 따른 임피던스 특성 변화

Fig. 4. Change of the impedance characteristics by different Si substrate thickness.

그림 3 은 일정한 실리콘 기판 두께에 대해 압전박막의 두께를 변화시킨 경우 주파수에 대한 임피던스 특성을 나타낸 것이다. 압전박막의 두께가 얇아질수록 composite 공진기의 주파수 범위가 길어졌으며, 압전박막의 두께 증가에 따라 응답피크의 크기가 증가되고, 임피던스 곡선이 이동되는 것이 관찰되었다. 그리고 압전박막의 두께 증가에 따라 응답피크의 모드 수는 변화가 없었지만, 주파수 간격은 약간의 변화가 있었으며, ZnO 박막의 두께가 2μm, 1μm, 0.5μm 로 감소함에 따라 주파수 간격이 각각 7.5MHz, 8MHz, 12MHz 로 증가하는 경향이 나타났다.

그림 4 는 0.5μm 의 ZnO 에서 기판 두께를 변화시킨 경우의 임피던스 응답을 나타낸 것이다. 그림 4에 나타난 5.965GHz~5.990GHz 의 범위에서 기판의 두께가 250μm, 500μm, 1100μm 으로 증가함에 따라 응답 모드 수는 각각 7, 3, 2 번으로 감소하는 것이 관찰되었다. 즉 기판 두께가 증가해도 임피던스 응답 피크의 크기는 거의 변화가 없지만 동일한 주파수 범위 안에서 기판의 두께가 두꺼울수록 모드 수는 감소함을 관찰 할 수 있었다. 즉 기판의 두께가 증가하면서 공진기 내부에서 이동하는 파 (wave) 의 진행거리가 더 길어지고 이에 따라 진행 시간도 길어지게 되어 기판의 두께가 증가함에 따라 임피던스 응답 모드 수가 감소하는 것으로 생각된다.

그림 5 는 기판의 acoustic 임피던스 차이에 의한 임피던스 응답의 특성을 나타낸 것이다. 그림을 보면 acoustic 임피던스가 큰 스틸 기판의 경우 acoustic 임피던스가 작은 실리콘 기판보다 응답 피크의 크기는 작지만 더 많은 응답모드 수가 나타났고, 주파수 간격이

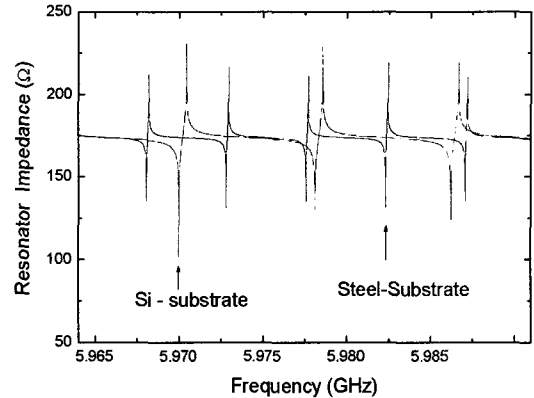


그림 5. 기판의 acoustic 임피던스에 의한 임피던스 특성 변화

Fig. 5. Change of the impedance characteristics by acoustic impedance of substrate.

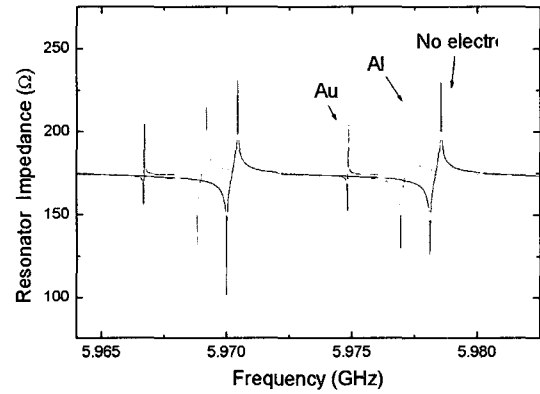


그림 6. 전극효과에 대한 임피던스 응답

Fig. 6. Response of the impedance by electrode effect.

더 좁아짐을 알 수 있었다. 즉, acoustic 임피던스가 큰 기판을 사용하면 파 (wave) 의 진행이 기판의 acoustic 임피던스에 방해를 받아 임피던스 응답감소와 함께 모드 수가 증가하는 것으로 생각된다.

그림 6 은 전극의 효과에 대한 임피던스 응답특성을 나타낸 것이다. 전극의 효과가 첨가되어도, 응답 모드 수의 감소는 거의 일어나지 않았으며, 응답 피크의 크기만이 감소하는 특성을 나타냈다. 즉 전극의 acoustic 임피던스에 의해 영향을 받아 composite 공진기의 임피던스 응답크기가 감소한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 Al 전극 보다 acoustic 임피던스가 큰 Au 전극을 사용할 경우 더 큰 응답 감소가 일어나는 것이 관찰되었으며, 이것은 acoustic 임피던스가 큰 Au 전극의 질량 부하 효과가 더 크기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 결과로 기판 및 압전박막의 두께, 기판 및 전극의 acoustic 임피던스에 대한 composite 공진기의 주파수에 따른 임피던스 특성을 알 수 있었다. 이러한 임피던

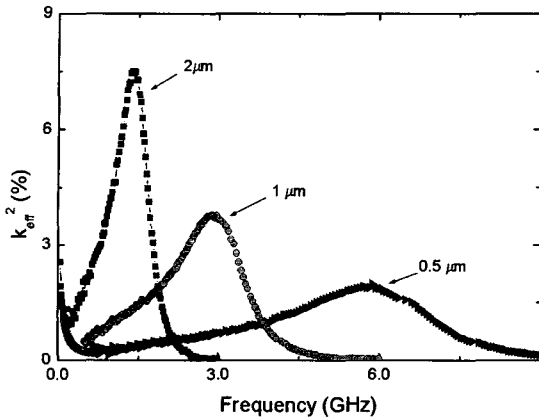


그림 7. ZnO 박막의 두께에 따른 k_{eff}^2 값의 변화
Fig. 7. Effective coupling coefficient, k_{eff}^2 , distribution versus frequency for different ZnO thickness.

표 2. 시뮬레이션을 통해 평가한 ZnO 와 AlN 압전박막의 두께에 따른 k_t^2 값
Table 2. Evaluating k_t^2 of Thickness of ZnO and AlN piezoelectric thin film by simulation.

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

스 특성을 토대로 IEEE 표준^[10]에 의한 식 (4) 를 이용해 각각의 경우에 대해 k_{eff}^2 값의 특성에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.^[4]

그림 7 은 압전박막의 두께 변화에 대한 k_{eff}^2 값의 변화를 주파수에 대해 나타낸 것이다. 두께가 증가함에 따라 주파수 범위 (또는 모드 수) 는 작아지는 반면에 k_{eff}^2 값은 증가하였다. 여기서 모드 수는 그림 7 에 주파수에 따른 k_{eff}^2 의 값을 나타낸 점의 개수이며, 식 (5) 와 (7) 을 이용하여 계산한 ZnO 와 AlN 압전박막의 두께 변화에 대한 k_t^2 값을 표 2 에 나타내었다.

표 2 를 보면 ZnO 와 AlN 압전박막의 두께가 감소함에 따라 k_t^2 값이 감소함을 알 수 있다. 이것은 압전박막의 두께 감소로 인해 상대적으로 기판의 두께 비가 증가되어 기판의 acoustic 임피던스에 의한 질량 부하 효과가 증가하여 압전 박막의 k_t^2 값이 감소한 것으로 생각된다. 즉, composite 공진기에서 압전 박막의 두께가 k_t^2 값에 영향을 미치며, 사용되는 주파수 범위를 결정짓는 중요한 변수임을 알 수 있었다. 또, 압전박막 각각의 두께에 대한 k_t^2 값을 입력하면 좀 더 정확한 해석을 할 수 있을 것으로 사려된다.

일반적으로 압전박막을 이용한 소자 제조나 압전 박

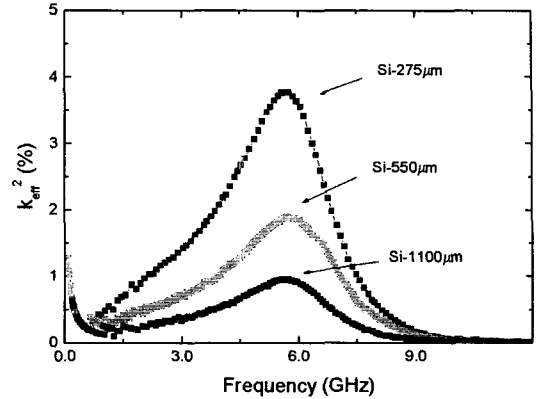


그림 8. 실리콘 기판의 두께 변화에 따른 k_{eff}^2 값의 변화
Fig. 8. Effective coupling coefficient, k_{eff}^2 , distribution versus frequency for different Si thickness.

표 3. 실리콘 기판 두께 변화에 대한 ZnO 의 k_t^2 .
Table 3. k_t^2 of ZnO distribution versus frequency for different Si thickness.

	Input k_t^2 (%)	Evaluating k_t^2 (%)
Si-275 μ m	8.02	1.034
Si-555 μ m	8.02	2.746
Si-1100 μ m	8.02	3.906

막의 압전특성 측정을 위해서 압전 박막은 기판 위에 증착된다. 따라서 압전박막의 압전특성 측정이나 4 층으로 구성된 composite 구조로 소자에 이용될 때 기판의 두께는 압전박막의 두께보다 상대적으로 두껍기 때문에 압전 박막에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 기판의 영향에 대해 알아보기 위해 기판의 두께 변화에 대한 k_{eff}^2 값을 시뮬레이션을 통해 그림 8 에 나타내었다. 그림 8 을 보면 기판의 두께가 증가함에 따라 k_{eff}^2 의 값이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 압전박막의 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 composite 공진기에서 기판에 의한 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다. 기판 두께 변화에 대한 k_t^2 값을 식 (5) 와 식 (7) 을 이용해 계산하여 표 3 에 나타내었다. 표 2 에 나타낸 k_t^2 값과의 비교를 통해 composite 공진기는 기판의 영향에 의해 지배된다는 사실을 확인하였다. 그리고 composite 공진기에서 압전체 두께 변화와 기판의 두께 변화에 대한 그림 7 과 그림 8 을 통해, 압전체 두께는 composite 공진기가 사용되는 주파수 범위에 관여하며, 기판은 k_t^2 값

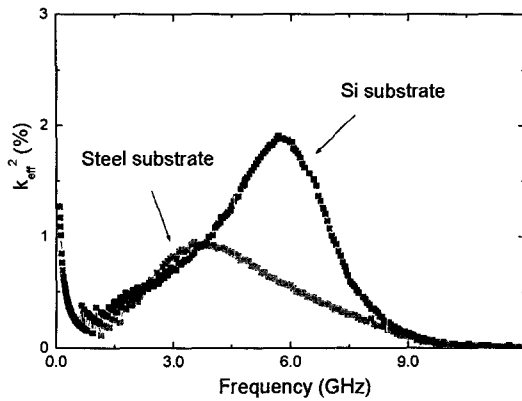


그림 9. 기판의 acoustic 임피던스 크기에 대한 k_{eff}^2 값의 변화

Fig. 9. Distribution of k_{eff}^2 by Amplitude of acoustic impedance of substrate.

표 4. 기판의 임피던스 비에 따른 k_t^2 값의 평가
Table 4. Evaluating of the k_t^2 by acoustic impedance ratio of substrate.

	Steel Substrate k_t^2 (%)	Si Substrate k_t^2 (%)
ZnO	1.876	2.746

에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

그림 9 는 기판의 acoustic 임피던스 크기에 따른 k_{eff}^2 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 acoustic 임피던스가 큰 스틸 기판의 경우 k_{eff}^2 값이 더 작아지고, 최대 k_{eff}^2 값은 m_T 영역에서 나타나며, 임피던스가 작은 실리콘 기판의 경우 m_N 영역에서 최대 k_{eff}^2 값이 나타난다는 Paol^[5] 등의 보고와 일치함을 알 수 있었다. 즉 기판의 acoustic 임피던스에 의해서도 k_{eff}^2 값이 영향을 받으며, 식 (6) 과 식 (8) 을 이용해 구한 표 4 의 k_t^2 값을 보면 스틸 기판의 k_t^2 값이 더 작은 것을 확인할 수 있다. 즉, 스틸 기판의 acoustic 임피던스에 의한 영향으로 주파수 범위와 k_{eff}^2 값이 감소하여 결과적으로 acoustic 임피던스가 작은 실리콘 기판 보다 k_t^2 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (6) 과 식 (8) 을 이용해 기판의 acoustic 임피던스를 조정하면 composite 공진기의 주파수 범위와 k_t^2 값을 조정할 수 있다.

그림 10 은 전극의 효과를 포함한 경우에 대한 k_{eff}^2 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 전극의 효과가 첨가되면 k_{eff}^2 값이 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 전극의 acoustic 임피던스가 클수록 k_{eff}^2 값은 더 많이 증가하며, 최대 k_{eff}^2 값이 나타나는 주파수 (또는 모드) 도 작아짐을 알 수 있다. 즉 composite 공진기는 전극 물질의 acoustic 임피던스에 의해서도 영향을 받는

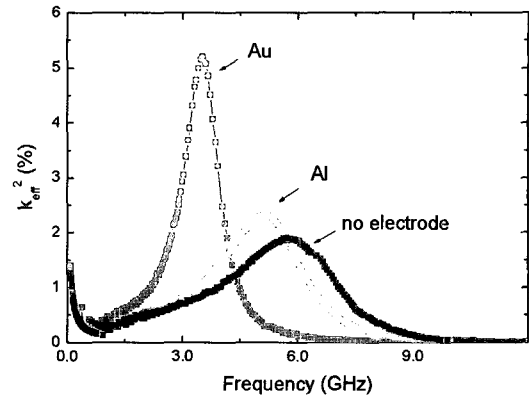


그림 10. 전극의 acoustic 임피던스 크기에 대한 k_{eff}^2 값의 변화

Fig. 10. Distribution of k_{eff}^2 by amplitude of acoustic impedance of electrode.

다는 사실을 알 수 있다. 또한 전극의 acoustic 임피던스가 압전체와 기판의 acoustic 임피던스 보다 크면 주파수 범위에도 영향을 주는 것으로 보인다. 여기서 전극 첨가 효과에 의한 k_t^2 값의 증가는 실제 공진기 동작에서는 전극의 질량 부하 효과에 의한 손실로 작용하게 될 것이며, 시뮬레이션 결과를 통해 acoustic 임피던스가 큰 전극 물질일수록 그 오차는 커질 것으로 예상할 수 있다. 따라서 공진주파수 스펙트럼법은 전극을 질량 부하로 고려하기 때문에 acoustic 임피던스가 클수록 k_t^2 값이 커지게 되며, 이러한 경향은 Zhang^[4] 등에 의한 보고와 일치한다. 이러한 전극의 효과는 압전체의 두께가 두꺼울수록 전극의 영향이 상대적으로 적어짐을 예상할 수 있으며, 4층으로 구성된 composite 공진기 형태로 압전 박막의 특성을 측정할 때는 acoustic 임피던스가 낮은 전극 물질을 사용해야 정확한 측정을 할 수 있을 것으로 생각된다.

위와 같은 시뮬레이션 결과를 통해 압전체, 기판, 그리고 전극의 두께 및 acoustic 임피던스가 composite 공진기의 특성에 미치는 영향에 대해 알 수 있었으며, composite 공진기의 구조를 통해 압전 박막의 특성을 분석 할 수 있었다. 실제 박막에 대해 측정된 k_t^2 값을 사용하고, 압전박막과 기판의 재료 손실에 대해 고려한다면 composite 공진기 실제의 동작을 예측할 수 있고, 공진기의 설계도 가능함을 알 수 있었다. 하지만 시뮬레이션에 사용한 변수들은 실제 압전박막에서 측정된 k_t^2 값을 사용한 것이 아니고, 기판과 압전 박막이 갖는 재료 고유의 손실을 고려하지 않았기 때문에, 박막의 정확한 k_t^2 값을 알고 손실에 대해 고려한다면 보다 정확한 시뮬레이션을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 연구는 공진주파수 스펙트럼법을 이용하여 상·하부 전극과 압전박막 그리고 기판의 4 층으로 이루어진 composite 공진기에서 각 층의 두께 및 acoustic 임피던스가 미치는 영향에 대해 조사하였다. 공진주파수 스펙트럼법으로 평가한 ZnO 와 AlN 압전박막의 임피던스 특성은 압전체 두께를 변화시킬 경우, 압전박막이 얇아지면 상대적으로 기판의 두께가 두꺼워지기 때문에 기판의 질량 부하 효과가 증가하여 임피던스 응답피크의 크기가 감소하였으며, 기판의 두께를 변화시킨 경우 기판의 두께 감소에 따라 임피던스 응답 피크의 모드 수 증가가 관찰되었다. 입력 k_t^2 값으로부터 평가된 ZnO 와 AlN 박막의 k_t^2 값의 비교를 통해 압전박막의 두께 보다 기판의 두께에 의한 영향이 크다는 사실을 확인하였으며, 기판의 acoustic 임피던스에 의해서도 k_t^2 값과 주파수 범위가 변화되는 것을 알 수 있었다. 또, 이러한 결과를 통해 압전박막의 두께가 composite 공진기의 주파수 범위에 영향을 미치며, 기판의 두께가 k_t^2 값에 압전박막 보다 더 큰 영향을 준다는 것을 알게 되었다. 또한 전극의 질량 부하 효과에 의해서도 k_t^2 값이 영향을 받으며, 전극의 acoustic 임피던스가 크면 주파수 범위와 k_t^2 값에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

공진주파수 스펙트럼법을 이용하여 composite 공진기에서 압전박막의 k_t^2 값의 평가를 통해 composite 공진기의 특성을 평가 할 수 있었으며, 특성 분석을 통해 composite 공진기의 설계까지도 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

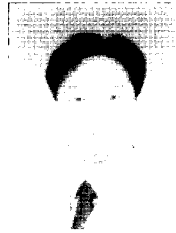
- [1] 조문기, 윤영섭 “브래그 반사층 구조와 멤브레인 구조의 체적 탄성과 공진기 필터의 이론적 분석”, 전자공학회 논문지, 제39권 SD편, 제4호, 41~54쪽, 2002.
- [2] 조문기, 윤영섭, “공진모드에 따른 Bragg-Reflector Type FBAR 의 이론적 분석”, 전자공학회 논문지, 제40권 SD편, 제11호, 9~18쪽, 2003.
- [3] J. F. Rosenbaum, Bulk Acoustic Theory and Devices, Artech House, Norwood MA, 1988.
- [4] Yuxing Zhng et al, “Resonant Spectrum Method to Characterize Piezoelectric Films in Composite Resonators”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., vol. 50, no. 3 pp. 321~333, 2003.
- [5] S. Y. Pao et al, “Analysis and Experiment of

- HBAR Frequency spectra and Applications to Characterize the Piezoelectric Thin Film and to HBAR design”, 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, pp. 27~35, 2002.
- [6] Q. B. Zhou, Y. K. Lu, S. Y. Zhang, “Extraction of Electromechanical Coupling Coefficient of Piezoelectric Thin Films Deposited on Substrates”, Ultrasonics 39, pp. 377~382, 2001.
- [7] Z. Wang, Y. Zhang, J. D. N. Cheeke, “Characterization of Electromechanical Coupling Coefficients of Piezoelectric Films using Composite Resonators”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., vol. 46, no. 5 pp. 1327~1330, 1999.
- [8] M. Sayer et al. “Characterization for Piezoelectric Films using Composite Resonators”, 1998 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1125~1128, 1998.
- [9] Y. Zhang, Z. Wang, J. D. N. Cheeke and F. S. Hickernell, “Direct Characterization of ZnO Films in Composite Resonators by the Resonance Spectrum Method”, 1999 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 235~242, 1999.
- [10] “IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE std. 176-1987)”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., vol. 43, no. 5, pp. 719~772., 1996.
- [11] F. S. Hickernell, “Measurement Techniques for Evaluating Piezoelectric Thin Films”, Proc. 1996 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 235~242, (San Antonio, 1996).
- [12] B. S. Naik, J. J. Lutsky, R. Rief and C. D. Sodini, “Electromechanical Coupling constant extraction of Thin Film Piezoelectric Materials using a Bulk Acoustic Wave Resonators”, IEEE Trans. on UFFC, vol. 45(1), pp. 257~263, 1998.
- [13] E. K. Sittig, “Design and Technology of Piezoelectric Transducers for Frequencies above 100 MHz”, Physics Acoustics Vol. IX, W. P. Mason and R. N. Thurston, Eds., New York, Academic Press, pp. 221~275, 1972.

저 자 소 개



최 준 영(학생회원)
 2003년 국립한밭대학교
 재료공학과 학사 졸업.
 2003년~현재 인하대학교
 전자공학과 석사 과정.
 <주관심분야: 강유전체 박막을 이
 용한 메모리소자, 압전박막을 이
 용한 고주파 소자의 모델링 및 시뮬레이션>



장 동 훈(정회원)
 1995년 수원대학교 전자재료
 공학과 학사 졸업.
 1997년 인하대학교 전자재료
 공학과 석사 졸업.
 2003년 인하대학교 전자재료
 공학과 박사 졸업.
 2003년~현재 인하대학교 전자공학과 연구원
 <주관심분야: ULSI DRAM 응용을 위한 강유전
 체 박막, Pyroelectric 센서>



강 성 준(정회원)
 1989년 인하대학교 응용물리학과
 학사 졸업.
 1994년 인하대학교 전자재료
 공학과 석사 졸업.
 1999년 인하대학교 전자재료
 공학과 박사 졸업.
 1999년 3월~2000년 1월 인하대학교
 전자재료공학과 연구원(Post Doc.)
 2000년~현재 국립여수대학교 반도체학과
 조교수
 <주관심분야: 강유전체 박막을 이용한 메모리 소
 자, Pyroelectric 센서, 압전박막>



윤 영 섭(정회원)
 1975년 서울대학교 금속공학과
 학사 졸업.
 1977년 한국과학기술원 재료공학과
 석사 졸업.
 1988년 12월 U.S.C 전자공학과
 박사 졸업.
 1987년~1988년 Oklahoma State University
 대우교수
 1988년~1989년 UCLA Device Research Lab.
 연구원
 1989년~1992년 삼성전자 기흥반도체연구소
 수석연구원
 1992년 3월~현재 인하대학교 공과대학
 전자공학과 교수
 <주관심분야: ULSI DRAM 을 위한 신물질 개발,
 강유전성 박막, Pyroelectric 센서, SAW Dvice>

