

論文2003-40SD-11-2

공진 모드에 따른 Bragg-Reflector Type FBAR 의 이론적 분석 (Theoretical Analysis of Bragg-Reflector Type FBAR with Resonance Mode)

趙 紋 基 * , 尹 英 燮 * *

(Moon Ki Cho and Yung Sup Yoon)

요 약

본 논문에서는 $\lambda/4$ 반사층으로 이루어진 체적 탄성과 공진기의 두 가지 유형을 등가회로를 이용하여 이론적으로 분석하고 두 유형의 차이점을 비교 논의하였다. $\lambda/2$ 모드는 상, 하부전극이 공기와 접하는 이상적인 공진기와 $\lambda/4$ 모드는 상부전극은 공기와 접하고 하부전극 아래는 완전히 막혀 있는 이상적인 공진기와 비교하여 반사층이 공진특성에 미치는 영향을 분석하였다. 압전층으로는 ZnO 를 전극층으로는 Al 을 기판층은 Si 을 사용하였다. Mason 등가회로를 ABCD 파라미터를 추출할 수 있는 단순화된 등가회로로 변환하여 입력임피던스를 구하였다. 반사층의 두께 변화에 의한 공진주파수의 변화와 반사층의 기계적 Q 에 따른 전기적 Q 의 변화를 통해 하부전극 바로 아래의 반사층의 변화율이 제일 큼을 알 수 있었다. 반사층의 탄성 임피던스 비가 증가함에 따라 Q 의 포화에 필요한 반사층의 수가 감소하였고 동일한 반사층 조건에서 $\lambda/2$ 모드의 전기적 Q 가 $\lambda/4$ 모드의 전기적 Q 보다 다소 크다는 사실을 확인하였다. 전기기계결합계수는 반사층수에 독립적이었고 반사층의 탄성 임피던스 비가 증가함에 따라 증가하였다. 두 모드 모두 전기기계결합계수는 반사층에 탄성과 에너지의 존재로 인하여 이상적인 공진기 보다 낮고 동일한 반사층 조건에서 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 큼을 확인하였다. Ladder 필터 특성에는 반사층수가 증가할수록 삽입손실은 감소하지만 대역폭에는 큰 변화가 없었고 반사층의 탄성임피던스비가 높을수록 동일한 반사층수에서 삽입손실은 감소하였고 대역폭은 넓어졌다. 분석한 모든 특성으로 볼 때 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 다소 우수하였다.

Abstract

Two configurations of Film Bulk Acoustic Wave Resonators with acoustic quarter-wave bragg reflector layers are theoretically analyzed using equivalent circuits and the difference of their characteristics are discussed. We compare the characteristics of $\lambda/2$ mode to those of ideal FBAR with top and bottom electrode contacting air and the characteristics of $\lambda/4$ mode to those of ideal FBAR with top electrode contacting air and bottom electrode clamped. We assume that the piezoelectric film is ZnO, the electrode is Al and the substrate is Si. ABCD parameters are extracted and input impedance is calculated by converting the equivalent circuit from Mason equivalent circuits to the simplified equivalent circuits that ABCD parameters are extracted possible. From the variation of resonance frequency due to the change of thickness of reflector layers and the variation of electrical Q due to the change of mechanical Q of reflector layers, it is confirmed that the reflector layer just under the bottom electrode have the greatest effect on the variation of resonance frequency and electrical Q. It is shown that the number of reflector layers required for the saturation of electrical Q decreases with the increase of the impedance ratio of reflector layers and electrical Q of $\lambda/2$ mode is larger than that of $\lambda/4$ mode. Electromechanical coupling factor is independent of the number of layers. The impedance ratio of reflector layers becomes larger as the electromechanical coupling factor becomes larger. The electromechanical coupling factor of the two mode are smaller than those of ideal FBARs because of the trapping of acoustic energy in the reflector layers. The insertion loss of the ladder filter decreases with the increase of the number of reflector layers but the bandwidth is not affected much by the number of reflector layers. As the impedance ratio of reflector layers becomes larger the insertion loss becomes smaller and the bandwidth becomes wider. In our analysis of the two mode, characteristics of $\lambda/2$ mode appear to be slightly more favorable than that of $\lambda/4$ mode

Keyword : FBAR, resonator, ZnO, Ladderfilter

* 正會員, Hynix 半導體 研究員

(Hynix Semiconductor Inc.)

** 正會員, 仁荷大學校 電子電氣工學部 電子工學科

(School of Electronic & Electrical Engineering, Inha

Univ.)

* 이 논문은 2002년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(INHA-22763)

接受日字:2002年3月12日, 수정완료일:2003年11月6日

I. 서론

지난 수십년간 Si 이나 GaAs 반도체 공정기술의 비약적인 발전으로 인하여 전자기기의 소형화 및 경량화가 이루어졌다. 이에 따라 통신장비의 단일칩화를 통하여 장비의 부피를 줄이고 가격을 낮추는데 관심이 집중되고 있다. 하지만 필터를 구현하는데 있어서 집중소자와 유전체 필터의 경우는 부피가 너무 크며, 수정공진기나 SAW 필터의 경우는 압전기판을 사용하므로 MMIC 화가 어렵고 그로 인해 소형화, 저가격화에 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 압전박막의 두께진동을 이용한 FBAR 에 대한 관심이 높아지고 있다. FBAR 는 양전극 사이에 압전박막을 공진주파수의 반파장 두께로 증착하여 체적파를 유발시켜 공진하는 원리이다. 그러나 FBAR 의 압전박막내에 음향손실이 적은 정재파가 형성되기 위해서는 소자의 경계조건이 공기 또는 진공상태를 만족해야 한다. 그래서 membrane 층을 이용한 공진기에 초점을 맞추어 왔다. 하지만 stress 에 의한 membrane 층의 파괴와 심한 buckling 현상이 일어나는 문제점을 가지고 있다¹⁾. 또한 비등방성 기판의 에칭으로 인해 뒷면에 큰 hole을 필요로 하게 되고 그로 인하여 소자의 수에 제한을 받는다. 그래서 하부전극 아래에 탄성 임피던스 차가 큰 물질을 공진주파수의 1/4의 두께로 교대로 증착한 브래그 반사층을 이용한 FBAR 의 연구가 많은 관심을 끌고 있다^{2), 3)}. Membrane 구조의 FBAR 는 하부전극에서 바라본 임피던스가 0 만을 만들어 줄 수 있지만 반사층 구조의 FBAR 는 반사층 증착 순서에 따라 하부전극에서 바라본 임피던스가 0 과 ∞ 으로 만들어 줄 수 있다¹⁾. 그래서 반사층의 FBAR 는 두 가지 종류로 나누어 볼 수 있다. 하나는 반사층의 가장 상단 임피던스 층이 낮은 임피던스 층인 경우 압전체는 기본 공진 주파수의 1/2 파장 두께에서 공진이 발생한다. 본 논문에서는 이와 같은 구조를 $\lambda/2$ 모드라 명명하였다. 다른 하나는 반사층의 가장 상단 임피던스층이 높은 임피던스 층인 경우 압전체는 기본 공진 주파수의 1/4 파장 두께에서 공진이 발생한다. 본 논문에서는 이와 같은 구조를 $\lambda/4$ 모드라 명명하였다.

이제까지의 FBAR 에 대한 연구가 압전체에 대한 연구에 국한되어 있어 반사층 조건에 따른 변화와 두 가지 반사층 구조에 따른 전기적 Q (Quality factor) 나

전기기계결합계수의 변화에 대해서는 충분히 연구되어 있지 못하였다. 본 연구에서는 FBAR 의 공진특성을 등가회로를 이용하여 반사층의 층수와 반사층의 임피던스 비와 같은 공진기 변수의 함수로써 이해하고자 하였다. 두 가지 모드를 비교 분석하기 위하여 $\lambda/2$ 모드의 경우 상 하부 전극 모두 공기층과 접하는 이상적인 FBAR 와 비교 분석하였고 $\lambda/4$ 모드의 경우 하부 전극아래가 clamped 된 상태의 FBAR 와 비교하였다. 이러한 반사층 두께 변화에 따른 공진주파수의 변화와 반사층 수와 반사층의 임피던스비에 따른 공진기의 전기적 Q 와 전기기계결합계수의 변화를 분석하여 두 모드의 차이점을 알아보았다. 또한 필터 응용시 단일 공진기의 전기적 Q 와 전기기계결합계수의 변화에 따른 필터의 대역폭과 삽입손실의 변화를 조사하였다.

II 이론적 배경

$\lambda/2$ 의 구조와 $\lambda/4$ 모드의 구조의 FBAR 의 특성을 분석하기 위해 <그림 1(a), (b)> 와 같이 공진기 구조를 설정하였다. Bragg reflector 형은 Lakin 에 의해 SMR (Solidly Mounted Resonator) 이라 명하였는데 본 논문에서도 반사층 구조의 FBAR 를 SMR 이란 표현을 사용하였다⁴⁾. 반사층에 의한 공진특성을 비교 분석하기 위해 $\lambda/2$ 모드는 상 하부 전극이 모두 공기와 접하는 이상적인 구조를 가정 비교하였고 $\lambda/4$ 모드는 상부전극은 공기와 접하지만 하부전극 아래는 clamped 되었다고 가정 비교하였다. 압전층은 c 축 배향성이 우수한 HCP 구조이고 압전 박막이 인가되는 전기장에 대해 동일한 방향으로 정렬되어 있다고 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 압전층은 ZnO 으로 우수한 c 축 성장률과 높은 전기기계결합계수를 갖는다고 보고되고 있다^{5), 6)}.

두 가지 구조의 SMR 을 수식적으로 분석하기 위해 등가회로를 사용하였다. <그림 2(a)> 는 $\lambda/2$ 모드의 3-port 등가회로이다. $\lambda/4$ 모드의 등가회로는 $\lambda/2$ 모드의 반사층의 순서가 반대인 등가회로로 생각하면 된다. 등가회로는 탄성적 부분과 전기적 부분의 결합으로 비압전층이 공진특성에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 첨자로 표시된 p, e, s, l, h 는 압전층, 전극층, 기판, 낮은 음향학적 임피던스와 높은 음향학적 임피던스를 나타낸다. $\lambda/2$ 모드의 압전층의 두께는 공진주파수 파장의 1/2 의 두께이고 $\lambda/4$ 모드의 압전층의 두

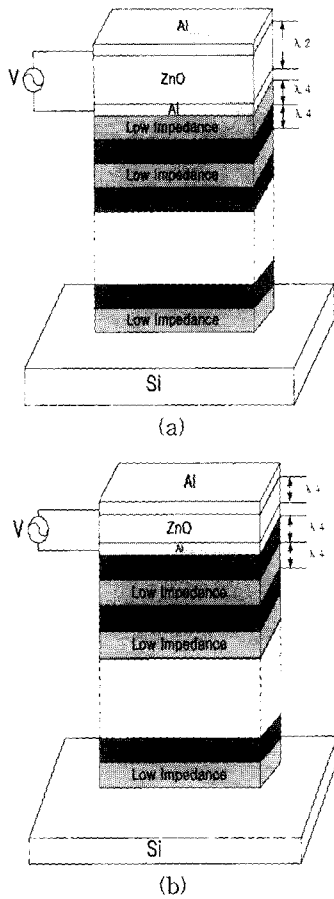


그림 1. (a) λ/2모드의 모식도 (b) λ/4모드의 모식도
 Fig. 1. (a) Topology of λ/2mode (b) Topology of λ/4mode.

표 1. 시물레이션에 사용된 물질 상수
 Table 1. Thin film material constants used in simulation.

Material	Stiffness (C ₃₃) (10 ¹¹ N/m ²)	Density (ρ) (kg/m ³)	Dielectric Constant	Piezoelectric Stress Constant (C/m ²)	Mechanical Quality factor
ZnO	2.11	5680	10.2	1.27	1500
Al	1.11	2695	1		1000
Si	1.66	2332	11.7		3000

계는 공진주파수 파장의 1/4 두께이다. 반사층의 두께는 공진주파수의 파장의 1/4 의 두께를 가정하였고 전극층은 전극에 의한 acoustic mass loading 효과를 무시할 수 있을 정도로 무한히 얇다고 가정하였다^[7]. 압전층과 반사층의 공진주파수가 반사층의 두께에만 의존할 수 있도록 높고 낮은 임피던스층의 탄성과 속도

는 압전층과 같다고 가정하였다. Z 는 탄성과 임피던스와 흡수계수 α 그리고 전파상수 β 를 비롯한 등가 회로에서 사용한 수식을 정리하면 다음과 같이 정의된다^[8,9].

$$v_p [m/s] = \frac{\left(1 + \frac{3}{8} \frac{\omega \eta}{\left(c_{33}^E + \frac{e_{33}}{\epsilon_{22}}\right)^2}\right)^{0.5}}{\left(\frac{\rho}{c_{33}^E + \frac{e_{33}}{\epsilon_{22}}}\right)^{0.5}} \quad (1)$$

$$v_n [m/s] = \frac{\left(1 + \frac{3}{8} \left(\frac{-\omega \eta}{c_{33}^E}\right)^2\right)^{0.5}}{\left(\frac{\rho}{c_{33}^E}\right)^{0.5}} \quad (2)$$

$$Z [10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}] = \rho v_{p,n} \quad (3)$$

$$Q_m = \frac{v_{p,n}^2 \rho}{\omega \eta} \quad (4)$$

$$\beta = w/v_{p,n} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\eta \omega^2}{2 \rho v_{p,n}^3} \quad (6)$$

$$C_o = \frac{\epsilon_{11} \epsilon_{22} A}{d} \quad (7)$$

$$h = \frac{e_{33}}{\epsilon_{22}} \quad (8)$$

$$a = i Z \tanh\left(\gamma \frac{d}{2}\right) \quad (9)$$

$$b = \frac{-i Z}{\sinh(\gamma d)} \quad (10)$$

여기서 $v_{p,n}$ 는 탄성과의 group velocity 이다. p, n 의 첨자는 압전층과 비압전층을 의미한다. Q_m 는 mechanical Q 를 나타낸다. A 는 전극면적, d 는 압전층 두께, ϵ_{22} 은 압전층의 유전율, η 는 물질의 탄성손실을 나타내는 viscosity factor, ρ 는 밀도, c_{33} 는 탄성계수, e_{33} 는 압전계수이다. hC_o 는 전기적 에너지가 기계적으로 변환되는 에너지 양을 나타낸다. 낮은 주파수 대역에서는 탄성과 전달 손실은 무시될 수 있으나 GHz 의 높은 주파수에서는 탄성과 전달 손실은 무시될 수 없기 때문에 각층은 유한한 기계적 Q 를 갖는다고 가정하였다. 복소수 탄성 상수는 다음의 식 ($c(1 + j/Q_m)$) 식으로 표현할 수 있다. 여기서 Q_m 은 기계적 품질 계수이다. 각 층의 기계적 Q 와 압전층과 전극층, 기판층의 물질상수는 Table 1 에 나타내었다^[10]. 압전체에서의 탄성 부하 임피던스는 Z_{load} 로 표현되고 이는 하부전극과 다층박막 계면에서의 임피

던스이다. Z_{load} 는 다음식에 따른다.

$$Z_{load}(\lambda/2 \text{ 모드}) = \begin{cases} \left(\frac{Z_l}{Z_h}\right)^{n-1} \left(\frac{Z_l^2}{Z_s}\right) & (n: \text{odd}) \\ \left(\frac{Z_l}{Z_h}\right)^n Z_s & (n: \text{even}) \end{cases} \quad (11)$$

$$Z_{load}(\lambda/4 \text{ 모드}) = \begin{cases} \left(\frac{Z_h}{Z_l}\right)^{n-1} \left(\frac{Z_h^2}{Z_s}\right) & (n: \text{odd}) \\ \left(\frac{Z_h}{Z_l}\right)^n Z_s & (n: \text{even}) \end{cases} \quad (12)$$

n 은 반사층 수를 나타낸다. $\lambda/2$ -SMR 의 경우 Z_{load} 는 $Z_l/Z_h < 1$ 이기 때문에 n 이 증가함에 따라 감소하고 n 이 증가할수록 0 으로 접근한다. 반면에 $\lambda/4$ -SMR 의 경우 Z_{load} 는 $Z_l/Z_h > 1$ 이기 때문에 n 이 증가함에 따라 증가하고 n 이 증가할수록 ∞ 로 접근한다.

하지만 <그림 2(a)> 의 등가회로에서 압전층이 전기적 1-port 와 탄성적 2-port 로 구성되어 있어 공진기의 입력 임피던스를 구하는데 어려움이 있다. 그래서 상부전극층을 Z_l 로, 하부전극과 반사층을 $\lambda/2$ - 모드의 경우 Z_{half} 로와 $\lambda/4$ 모드의 경우 $Z_{quarter}$ 로 compute 화한 2-port 회로망으로 변환하여 해석하였다. 2-port 등가회로에서 구한 ABCD 파라미터는 다음과 같다. 편이상 Z_{half} 와 $Z_{quarter}$ 를 Z_c 로 표현하였다. Z_l 와 Z_c 는 음향학적 경로를 포함한 식이다.

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ -v \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$A = \frac{a_p + b_p + z_l + \frac{j h^2 C_o}{2 \pi f}}{h C_o (a_p + z_l)} \quad (14)$$

$$B = \frac{\left(a_p + b_p + z_c + \frac{j h^2 C_o}{2 \pi f}\right)(a_p + z_l) + \left(b_p + \frac{j h^2 C_o}{2 \pi f}\right)(a_p + z_c)}{h C_o (a_p + z_l)} \quad (15)$$

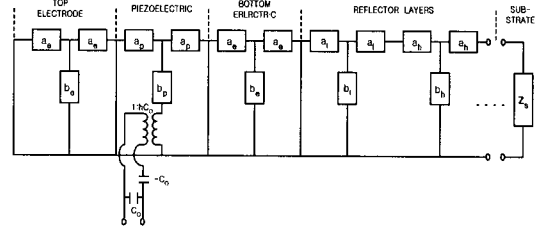
$$C = \frac{j 2 \pi f (a_p + b_p + z_l)}{h (a_p + z_l)} \quad (16)$$

$$D = -\frac{(a_p + b_p + z_c)(a_p + z_l) + b (a_p + z_c)}{\frac{j h}{2 \pi f} (a_p + z_l)} \quad (17)$$

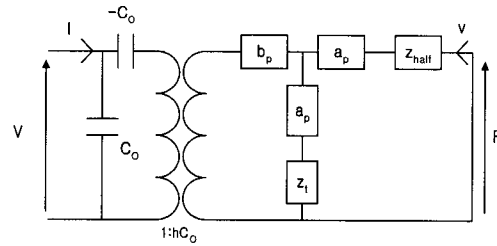
이상적인 FBAR 의 경우는 Z_l 와 Z_c 는 같은 식이

된다.

입력임피던스 Z_{in} 은 식 (13) 의 전압(V)/전류(I) 이다. 여기서 F 는 0 이 되므로 입력임피던스는 B/D 가 된다.



(a)



(b)

그림 2. (a) $\lambda/2$ 모드 Mason 등가회로 (b) $\lambda/2$ 모드의 단순화된 등가회로

Fig. 2. (a) $\lambda/2$ mode of Mason equivalent circuit (b) $\lambda/2$ mode of simplified equivalent circuit.

FBAR 는 압전층의 두께에 의해 공진주파수가 결정된다. 하지만 반사층의 두께 변화에 의해서도 공진주파수가 변하는데 본 논문에서는 반사층의 두께 변화에 따른 공진주파수의 변화를 정량적으로 분석하기 위해 민감도 ($[\Delta f/f_o]/[\Delta d/d]$) 를 구하였다^[11].

Δf 는 공진주파수의 변화량을 나타내고 $\Delta f/f_o$ 는 공진주파수의 변화도의 정규화이다. Δd 는 두께의 변화량을 나타내고 $\Delta d/d$ 는 두께의 변화량의 정규화이다. 공진기의 성능을 나타내는 두 가지 성능지수 (Figure of Merits : FOMs) 가 있다. 하나는 유효 전기기계결합계수 (K_{eff}) 이고 electrical Q 이다. 본 논문에서는 공진기의 quality factor 를 electrical Q 란 표현을 쓸 것이다. K_{eff} 는 각 모드에서 직렬과 병렬 공진 사이의 절대 간격을 의미하며 이 상수는 압전 박막의 압전, 유전, 기계적 변수의 조합으로서 얼마나 잘 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되는지를 나타내고

electrical Q 는 공진기 내에서의 탄성과 손실을 나타낸다. electrical Q 값은 궁극적으로 필터 특성에서의 삽입손실과 감쇄 특성에 직접적으로 영향을 미치는 변수이고 K_{eff} 는 필터의 대역폭을 결정하는 상수이다. 두 가지 성능지수는 다음 식을 따른다^[2].

$$K_{eff} = \frac{\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}\right)} \quad (18)$$

$$Q_{sp} = \frac{f}{2} \frac{d\angle Z_{in}}{df} \Big|_{f=f_s} \quad (19)$$

f_s 는 직렬공진주파수, f_p 는 병렬공진주파수를 나타낸다. 본 논문에서의 직, 병렬공진 주파수는 임피던스가 최소인 주파수와 최대인 주파수로 구분하였다.

두 모드의 반사층 수와 반사층의 탄성 임피던스 비에 따른 전기적 Q 와 전기기계결합계수의 변화에 따른 필터 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 공진기를 직·병렬로 조합한 Ladder 필터를 설계하여 공진기 특성에 따른 필터 특성을 알아보았다. <그림 3(a)> 는 Ladder 필터의 모식도로써 직렬공진기의 직렬공진주파수와 병렬공진기의 병렬 공진주파수가 일치하는 주파수가 필터의 중심 주파수로 정의된다^[12]. 등가회로에서 구한 입력임피던스의 ABCD 파라미터를 S 파라미터를 구하였다. 입력과 출력 기준 임피던스는 50Ω 을 가정하였다.

III. 결과 및 논의

<그림 3(a), (b)> 는 4층의 반사층의 경우 $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드의 반사층 1 의 두께 변화에 따른 입력 임피던스 특성을 나타내고 있다. 여기서 반사층 1, 2, 3, 4 는 하부전극 바로 아래부터의 층수이다. 즉, 하부전극 바로 아래의 반사층은 반사층1으로 표시되고, 기판 바로 위의 반사층은 반사층4 로 표시된다. 반사층의 임피던스 비는 7이고 압전층과는 $Z_p^2 = Z_l \cdot Z_b$ 의 관계가 있다. 반사층의 두께는 공진주파수의 $\lambda/4$ 의 두께로 정해지지만 <그림 3(a), (b)> 에서와 같이 $\lambda/4$ 보다 낮을 경우 공진 주파수가 높은 쪽으로 이동하고 $\lambda/4$ 보다 낮은 쪽으로 이동한다. 그리고 반사층1의 두께변화에 의한 공진주파수의 변화는 $\lambda/4$ 모드가 $\lambda/2$ 모드보다 크다는 사실을 알 수 있다. <그림 3(c)~(f)> 는 $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드의 반사층 두께 변화에 따른

공진주파수 민감도를 나타내고 있다. 1층의 민감도가 제일 크고 4층의 민감도가 가장 작다는 사실을 알 수 있다. 반사층1의 민감도가 큰 이유는 생성된 반사층의 정재파가 대부분 반사층 1 에 존재하기 때문이다. 두 모드의 민감도를 비교해 보면 4층의 반사층을 제외하

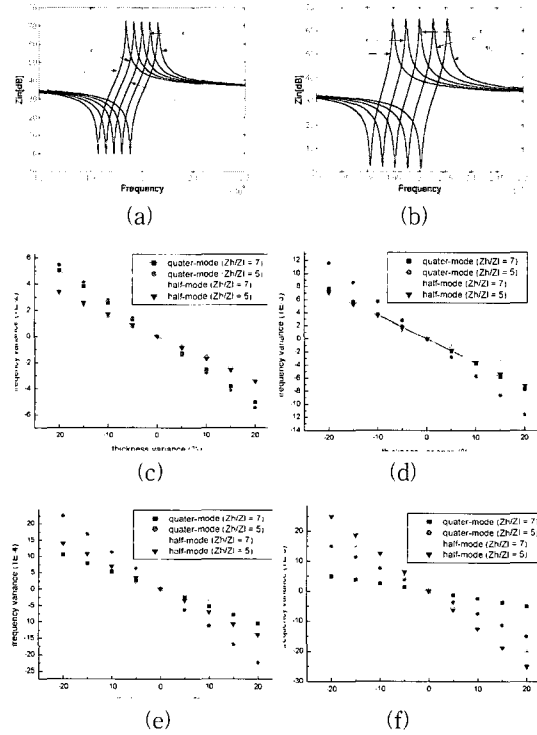


그림 3. (a) $\lambda/2$ 모드의 반사층 1의 두께 변화에 따른 입력 임피던스의 변화 (b) $\lambda/4$ 모드의 반사층 2의 두께 변화에 따른 입력 임피던스의 변화 (c) 반사층 1의 두께 변화에 따른 공진주파수에 대한 민감도 (d) 반사층 2의 두께 변화에 따른 공진주파수에 대한 민감도 (e) 반사층 3의 두께 변화에 따른 공진주파수에 대한 민감도 (f) 반사층 4의 두께 변화에 따른 공진주파수에 대한 민감도

Fig. 3. (a) Change of input impedance of $\lambda/2$ mode with change of the thickness of reflector layer 1 (b) Change of input impedance of $\lambda/4$ mode with change of the thickness of reflector layer 2 (c) Sensitivity with change of the thickness of reflector layer 1 (d) Sensitivity with change of the thickness of reflector layer 2 (e) Sensitivity with change of the thickness of reflector layer 3 (f) Sensitivity with change of the thickness of reflector layer 4

고는 $\lambda/2$ 모드의 민감도가 $\lambda/4$ 모드의 민감도보다 더 작다는 사실을 알 수 있다. 그리고 반사층 임피던스 비가 클수록 민감도가 더 작다는 사실을 알 수 있다.

<그림 4(a), (b)> 는 $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드의 반사층수에 따른 입력임피던스의 공진특성을 나타낸다. 반사층의 임피던스비는 5이고 압전층과는 $Z_p^2 = Z_i \cdot Z_b$ 의 관계가 있다. $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드 모두 반사층이 증가할수록 공진효율이 증가함을 알 수 있다. 이는 반사층이 증가할수록 축적되는 탄성 에너지의 증가로 전기적 Q가 증가하기 때문이다. 또한 이상적인 경우 즉, $\lambda/2$ 모드의 경우는 하부 전극에서 바라본 임피던스가 0인 경우와 $\lambda/4$ 모드의 경우 하부전극에서 바라본 임피던스가 ∞ 인 경우와 SMR 을 비교하면 직렬공진 주

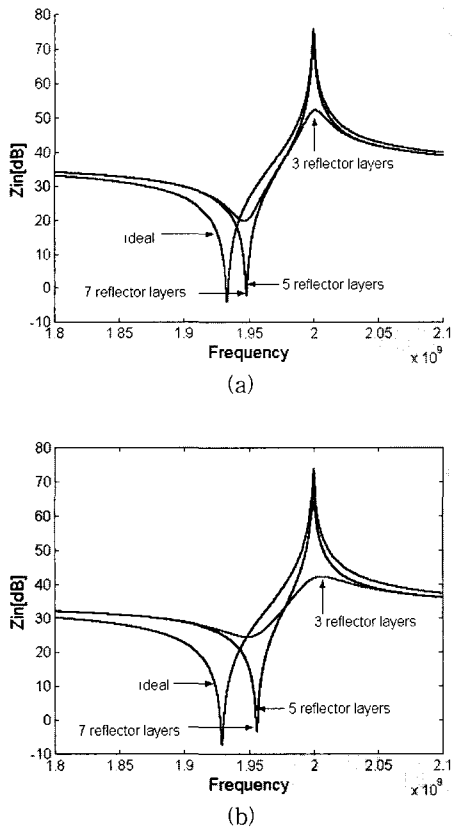


그림 4. (a) $\lambda/2$ 모드의 반사층수에 따른 입력임피던스 (b) $\lambda/4$ 모드의 반사층수에 따른 입력임피던스

Fig. 4. (a) Input impedance of $\lambda/2$ mode with the number of reflector layers (b) Input impedance of $\lambda/4$ mode with the number of reflector layers.

파수가 높음을 알 수 있다. 이는 반사층에 정재파가 존재하기 때문에 전기기계결합계수가 작아짐을 의미한다.

<그림 5> 는 $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드에서 반사층의 탄성임피던스 비를 가진 반사층수의 함수로써 전기기계결합계수를 표현한 것이다. 압전층과 반사층의 비는 $Z_h = Z_p$ 와 $Z_h = 2Z_p$ 두가지로 나누어 압전층과 반사층의 탄성 임피던스비와의 관계에 따른 변화를 살펴본 것이다. <그림 5(a), (b)> 는 $\lambda/2$ 모드의 전기기계결합계수를 나타낸다. 반사층의 탄성임피던스의 비가 증가함에 따라 전기기계결합계수가 증가함을 알 수 있다. 이는 탄성임피던스 비가 클수록 반사층에 존재하는 탄성에너지가 작아짐을 의미한다. 또한 높은 임피던스와 압전층과의 탄성임피던스비가 증가할수록 전기기계결합계수가 감소함을 알 수 있다. 이는 반사층의 탄성임피던스 차에 의해서도 전기기계결합계수가 달라지지만 압전층과 반사층의 탄성임피던스 차에 의해서도 전기기계결합계수가 달라짐을 의미한다. 이는 압전층과 하부전극층 바로 아래의 낮은 임피던스 비에 전기기계결합계수의 크기가 의존함을 의미한다. <그림 5(c), (d)>

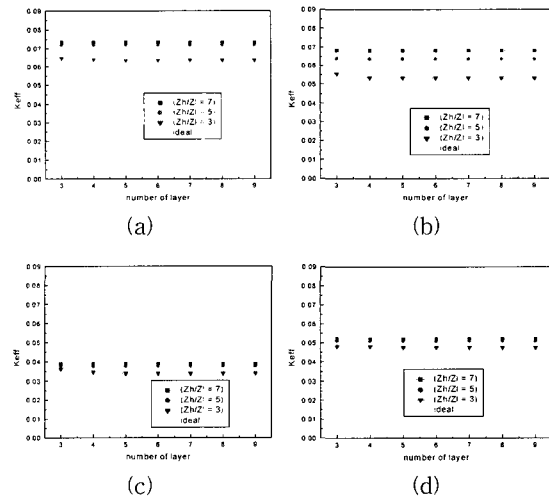


그림 5. $\lambda/2$ 모드의 반사층수에 따른 전기기계결합계수 : (a) $Z_h = Z_p$, (b) $Z_h = 2Z_p$ $\lambda/4$ 모드의 반사층수에 따른 전기기계결합계수 : (c) $Z_h = Z_p$, (d) $Z_h = 2Z_p$

Fig. 5. Electromechanical coupling factor of $\lambda/2$ mode with the number of reflector layers : (a) $Z_h = Z_p$, (b) $Z_h = 2Z_p$ Electromechanical coupling factor of $\lambda/4$ mode with the number of reflector layers : (c) $Z_h = Z_p$, (d) $Z_h = 2Z_p$.

는 $\lambda/4$ 모드와 $\lambda/2$ 모드와 마찬가지로 반사층의 탄성임피던스비가 증가할수록 전기기계결합계수가 증가함을 알 수 있다. 하지만 압전층과 높은 임피던스의 비가 증가할수록 전기기계결합계수가 달라짐을 알 수 있는데 이는 $\lambda/4$ 모드와 $\lambda/2$ 모드 모두 이상적인 경우에 비해 전기기계결합계수가 감소하는데 이는 <그림 4>에서 설명한 바와 같이 이상적인 경우에는 정재파가 압전층 내에만 존재하지만 반사층이 있을 경우 반사층내에도 정재파가 존재하게 되므로 이상적인 경우에 비해서 SMR의 경우가 전기기계결합계수가 더 낮아짐을 알 수 있다. 이는 Membrane 구조에서도 Membrane에 의해 같은 현상이 일어남을 다른 연구 결과에 의해 보고되고 있다^[13]. 전기기계결합계수가 반사층 수에 따라서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 동일한 조건에서 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드에 비해 상대적으로 전기기계결합계수가 높음을 알 수 있다.

<그림 6>은 $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드에서 반사층의 탄성임피던스 비를 가진 반사층수의 함수로써 전기적

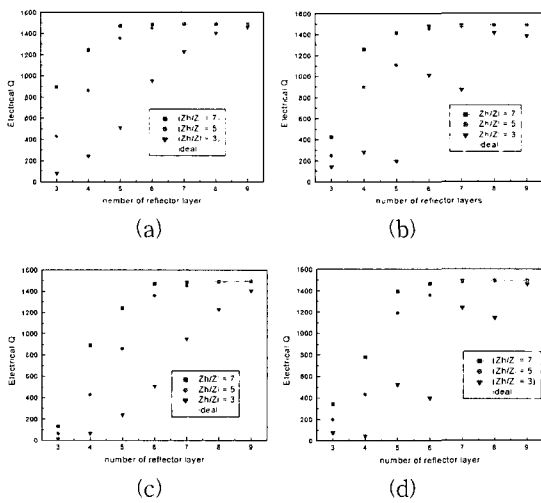


그림 6. $\lambda/2$ 모드와 $\lambda/4$ 모드에서 반사층의 탄성임피던스 비를 가진 반사층수의 함수로써 전기적 Q : (a) $Z_h = Z_p$, (b) $Z_h = 2Z_p$, $\lambda/4$ 모드와 $\lambda/2$ 모드에서 반사층의 탄성임피던스 비를 가진 반사층수의 함수로써 전기적 Q : (c) $Z_h = Z_p$, (d) $Z_h = 2Z_p$.

Q를 표현한 것이다. <그림 4>에서 전기기계결합계수를 분석한 조건과 같이 압전층과 반사층의 비는 $Z_h = Z_p$ 와 $Z_h = 2Z_p$ 두 가지로 나누어 압전층과 반사층의 탄성 임피던스비와의 관계에 따른 변화를 살펴 보았다. 식 (11)과 식 (12)에서 살펴본 바와 같이 반사층수가 증가할수록 탄성에너지의 축적으로 인해 전기적 Q가 증가함을 알 수 있다. 또한 두 모드 모두 반사층의 탄성임피던스 비가 증가할수록 전기적 Q가 더 낮은 층수에서 이상적인 경우에 도달함을 알 수 있다. 그리고 동일한 반사층 조건에서 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드에 비해 전기적 Q가 다소 큼을 알 수 있다. 또한 반사층의 탄성임피던스비가 7이나 5와 같이 상당히 높을 경우 반사층의 동일한 조건에서 $\lambda/4$ 모드에서는 압전층과 높은 임피던스의 비가 클수록 전기적 Q가

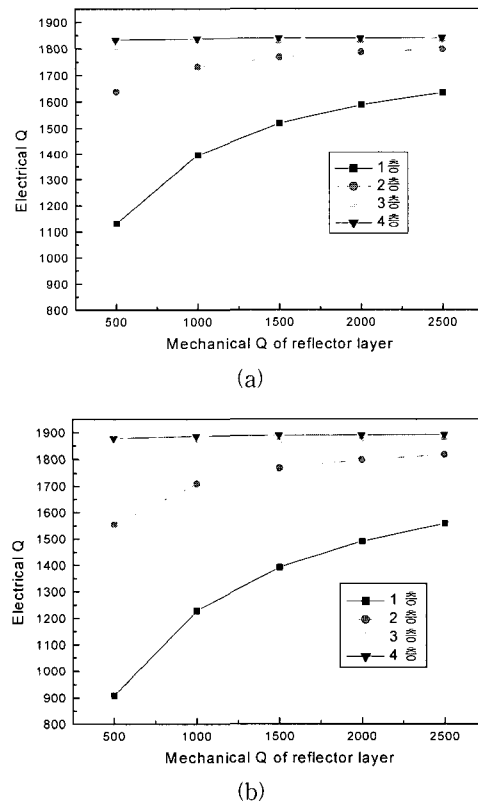


그림 7. (a) $\lambda/2$ 모드에서 반사층의 기계적 Q에 따른 전기적 Q (b) $\lambda/4$ 모드에서 반사층의 기계적 Q에 따른 전기적 Q
 Fig. 7. (a) Electrical Q of $\lambda/2$ mode with mechanical Q of the reflector layers (b) Electrical Q of $\lambda/4$ mode with mechanical Q of the reflector layers.

증가하고 $\lambda/2$ 모드에서는 압전층과 높은 임피던스의 비가 작을수록 전기적 Q 가 증가함을 알 수 있다. 이는 전기적 Q 는 압전층과 하부 전극 바로 아래의 임피던스의 비에 의존함을 알 수 있다.

<그림 7> 은 6층의 반사층을 갖는 두 모드의 기계적 Q 에 따른 공진기의 전기적 Q 를 나타낸다. 반사층의 임피던스비는 5이고 압전층과는 $Z_p^2 = Z_l \cdot Z_h$ 의 관계가 있다. 본 그래프에서 1층이라 명한 데이터는 1층의 기계적 Q 가 500 에서 2500 의 크기를 갖고 나머지 층은 손실이 없는 반사층이라 가정하였다. 2, 3, 4층도 마찬가지로 해당 층에만 기계적 Q 를 갖고 나머지 층은 무손실이라 가정하였다. 압전층의 기계적 Q 는 1500이다. 두 모드 모두 전기적 Q 가 반사층 1의 기계적 Q 에 크게 의존함을 알 수 있고 4층의 경우는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 정재파가 반사층 1에 집중되어 있음을 의미한다. 또한 $\lambda/4$ 모드의 전기적 Q 가 $\lambda/2$ 모드의 전기적 Q 에 비해 반사층의 기계적 Q 에 더 많이 영향을 받음을 알 수 있다.

<그림 8> 은 반사층수와 반사층의 탄성임피던스 비

에 따른 Ladder 필터의 응답특성이다. Ladder 필터는 공진기를 직·병렬로 전기적으로 연결한 형태로서 본 논문에서는 직·병렬공진기 2개의 조합인 1/1 를 설계하였다. 반사층과 압전층과의 관계는 $Z_p^2 = Z_l \cdot Z_h$ 으로 가정 하였다. 층수에 따라 대역폭의 차이가 거의 없는데 이는 전기기계결합계수가 층수에 따라 큰 변화를 보이지 않기 때문이다. 또한 반사층의 탄성임피던스 비가 증가할수록 전기기계결합계수의 증가로 인해 대역폭이 증가함을 알 수 있다. 삽입손실은 공진기의 전기적 Q 와 관련이 있는데 <그림 6> 에서 살펴본 바와 같이 층수가 증가할수록 축적 에너지 증가로 인해 전기적 Q 가 증가함을 알 수 있고 반사층의 탄성임피던스 비가 증가함에 따라 전기적 Q 의 증가로 인해 삽입손실이 감소하고 out-of-band rejection 역시 감소함을 알 수 있다. 동일한 반사층 조건에서 필터의 대역폭 및 삽입손실 측면에서 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드에 비해 우수함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 등가회로를 사용하여 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드의 특성을 반사층 두께변화에 의한 공진주파수의 민감도 분석, 반사층의 탄성임피던스 비와 반사층수에 따른 공진임피던스 특성과 전기기계결합계수, 전기적 Q 의 특성을 비교 분석하였다. 반사층 두께 변화에 의한 공진주파수의 민감도 분석을 통해 반사층 1의 두께 변화에 의한 공진주파수 변화가 제일 컸으며 반사층의 임피던스 비가 클수록 민감도는 줄어들음을 알 수 있었다. $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 민감도가 더 작음을 알 수 있었다. 반사층의 기계적 Q 에 따른 공진기의 전기적 Q 의 의존도에서도 반사층 1의 의존도가 제일 컸으며 반사층이 증가함에 따라 반사층의 기계적 Q 의 의존도는 작음을 알 수 있었다. 이로써 대부분의 정재파 에너지가 반사층 1에 집중되어 있음을 알 수 있었다. 반사층수가 증가함에 따라 SMR 의 전기적 Q 는 이상적인 FBAR 의 전기적 Q 에 근접하였고 반사층의 탄성임피던스비가 클수록 더 낮은 층수에서 전기적 Q 가 포화됨을 알 수 있었다. 탄성임피던스 비가 5, 7정도로 높을 경우 전기적 Q 가 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 더 높은 값을 가졌다. 또한 $\lambda/2$ 모드의 경우 압전층과 반사층의 낮은 임피던스비에 $\lambda/4$ 모드의 경우 압전층과 높은 임피던스비에 전기적 Q 가

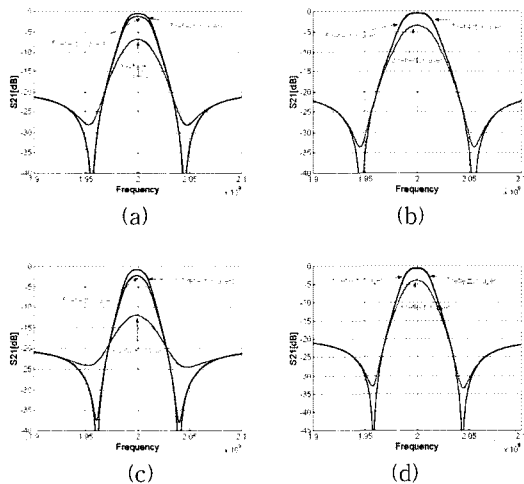


그림 8. $\lambda/2$ 모드의 Ladder 필터의 응답특성 : (a) $Z_h/Z_l = 3$, (b) $Z_h/Z_l = 5$ $\lambda/4$ 모드의 Ladder 필터의 응답특성 : (c) $Z_h/Z_l = 3$, (d) $Z_h/Z_l = 5$

Fig. 8. Response characteristic of $\lambda/2$ -mode Ladder filter with the number of reflector layers : (a) $Z_h/Z_l = 3$, (b) $Z_h/Z_l = 5$ Response characteristic of $\lambda/4$ -mode Ladder filter with the number of reflector layers : (c) $Z_h/Z_l = 3$, (d) $Z_h/Z_l = 5$

의존함을 알 수 있었다. 이는 하부전극 바로 아래의 임피던스층에 의존함을 의미한다. 전기기계결합계수는 반사층의 탄성 임피던스비에 따라 큰 차이를 보였으나 반사층수에 따라서는 거의 변화가 없었다. 압전층과 반사층과의 탄성임피던스의 관계에 따른 전기기계결합계수는 전기적 Q 와 마찬가지로 하부전극 바로 아래의 임피던스층에 의존함을 알 수 있었다. 이상적인 FBAR 보다 SMR 의 전기기계결합계수가 작는데 이는 정재파가 반사층 내에 존재하기 때문이다. 동일한 반사층 조건에서 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 전기기계결합계수가 더 큼을 알 수 있다. Ladder 필터 특성에서 반사층의 탄성임피던스 비가 증가함에 따라 전기기계결합계수의 증가로 인해 대역폭의 증가하였고 동일한 반사층수에서 탄성임피던스 비가 높은 반사층일 경우 삽입손실이 더 작음을 알 수 있었다. 이는 동일한 반사층수일 때 탄성임피던스비가 높은 반사층을 가질 경우 전기적 Q 가 높기 때문이다. $\lambda/2$ 모드의 필터가 $\lambda/4$ 모드의 필터보다 대역폭 및 삽입손실이 우수함을 알 수 있다. $\lambda/4$ 모드는 $\lambda/2$ 모드보다 압전층의 두께가 반이라는 장점을 가지고 있지만 반사층의 두께변화에 의한 공진주파수 변화가 컸으며 전기기계결합계수 및 전기적 Q 에서도 더 낮다는 사실로부터 $\lambda/2$ 모드가 $\lambda/4$ 모드보다 우수함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kanbara, H. Kobayashi, and K. Nakamura "Analysis of Piezoelectric Thin Film Resonator with Acoustic Quarter-Wave Multilayers" JJAP. vol.39 May 2000, pp. 3049~3053.
- [2] S. H. Park, B. C. Seo, H. D. Park, and G. W. Yoon, "Film Bulk Acoustic Resonator Fabrication for Radio Frequency Filter Applications" JJAP. vol.39 July 2000, pp 4115~4119.
- [3] K. M. Lakin, K.T. McCarron, and R.E. Rose "Solidly Mounted Resonators And Filters" IEEE Ultrasonics Symposium, pp 905~908, 1995.
- [4] K. M. Lakin, G. R. Kline, and K. T. McCarron "Development of Miniature Filters for Wireless Applications". IEEE Tran. Microwave and Theory, vol. 43, pp. 2933~2939, Dec. 1995.
- [5] V. P. Kutepova, D. A. Hall "Effect of Sputtering parameters on the Growth and Piezoelectirc Properties of Zinc Oxide Thin Films". IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 213~217, 1998.
- [6] Qing-Xin Su, Paul Kirby, Eiju Komuro, Massaki Imura, Qi Zhang, and Roger Whatmore, "Thin-Film Bulk Acoustic Resonators and Filters Using ZnO and Lead-Zirconium_Titanate Thin Films" IEEE Trans. on. Microwaves Theory and Techniques, 49(4): 769~778, April 2001.
- [7] P. Osbond, C. M. Beck. J. Brierley, M. R. Cox, S. P. Marsh, and N. M. Shorrocks, "The Influence of ZnO and Electrode Thickness on the Performance of Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonators" IEEE Ultrasonics Symposium, pp 911~914, 1999.
- [8] B.A. Auld Acoustic Fields and Waves in Solids : Volume I, Krieger Publishing Company, Malabar, Flolida, 2 edition, 1990 pp 86~97.
- [9] B. A. Auld Acoustic Fields and Waves in Solids: Volume I, Krieger Publishing Company, Malabar, Flolida, 2 edition, 1990 pp 357~382.
- [10] J.F. Rosenbaum. "Bulk Acoustic Wave Theory and Devices" Artech House, Inc., Norwood, MA, 1988 pp. 213~218.
- [11] Bolaji L. Olutade And William D. Hunt. "Sensitivity Analysis of a Thin Film Bulk Acoustic Resonator Ladder Filter", IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, 1997, pp. 737~742.
- [12] K. M. Lakin. "Modeling of thin film resonators and filters" In IEEE MTT-S Digest, 1992, pp. 149~152.
- [13] K. M. Lakin, J. S. Wang, "UHF Composite Bulk Wave Resonator", IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 834-837, 1980.

저 자 소 개

尹 英 燮(正會員) 第37卷 SD編 第6號 參照

1975년 2월 : 서울대학교 금속공학과 졸업(B.S.). 1977년 2월 : 한국과학원 재료공학과 졸업(M.S.). 1988년 12월 : U.S.C. 전자공학과 졸업(Ph.D). 1987년 3월~1988년 5월 : Oklahoma State University 대우교수. 1988년 12월~1989년 6월 : UCLA Device Research Lab. 연구원. 1989년 8월~1992년 2월 : 삼성전자 기흥반도체연구소 수석연구원. 1992년 3월~현재 : 인하대학교 전자전기·컴퓨터공학부 교수. <주관심분야 : ULSI DRAM 을 위한 신물질 개발, 강유전성 박막, Pyroelectric 센서, SAW Device>

趙 紋 基(正會員)

1998년 2월 : 인하대학교 전자재료공학과 졸업(B.S.). 2002년 8월 : 인하대학교 전자재료공학과 졸업(M.S.). 2002년 9월~현재 : (주)하이닉스 반도체 연구원. <주관심분야 : FBAR 필터 응용을 위한 ZnO 박막 및 특성 시뮬레이션>