

論文2002-39SD-4-6

브래그 반사층 구조와 멤브레인 구조의 체적 탄성과 공진기 필터의 이론적 분석

(Theoretical Analysis of FBARs Filters with Bragg Reflector Layers and Membrane Layer)

趙 紋 基 *, 尹 英 燮 *

(Moon Ki Cho and Yung Sup Yoon)

요 약

본 논문에서는 등가회로를 이용하여 브래그 반사층형 FBAR (Film Bulk Acoustic Wave Resonator) 와 membrane 형 FBAR 그리고 상 하부 전극이 공기와 접하는 이상적인 FBAR 의 특성을 서로 비교함으로써 브래그 반사층과 membrane 이 공진특성에 미치는 영향을 분석하였다. 압전층으로는 ZnO, membrane 층과 낮은 음향적인 임피던스 반사층은 SiO₂, 높은 음향적인 임피던스 반사층으로는 W, 전극층으로는 Al 를 가정하였고 각 층은 탄성과 전달 손실을 가정하였다. 1-port 의 등가회로를 ABCD 파라미터를 추출할 수 있는 단순화된 등가회로로 변환하여 ABCD 파라미터를 추출하여 입력임피던스를 계산하였다. 필터 설계에서는 구하여진 파라미터를 산란행렬로 변환하여 필터의 대역폭 및 삽입손실을 구하였다. 전극층, 반사층, membrane 층의 두께 변화에 의한 공진주파수의 변화는 membrane 층과 전극 바로 아래의 반사층의 두께 변화가 가장 큰 영향을 미친다는 결과를 확인하였다. 반사층 구조에서 반사층수에 따른 공진특성과 K_{eff} 와 electrical Q 의 변화에서는 반사층수가 K_{eff} 에는 거의 영향을 미치지 않지만 electrical Q 는 층수가 증가할수록 증가하다가 7층이상에서 포화되었다. 또한 FBAR 의 electrical Q 는 membrane 층과 반사층의 mechanical Q 에 의존함을 알 수 있었다. Ladder 필터와 SCF(Stacked Crystal Filters) 모두 공진기의 수가 증가할수록 삽입손실과 out-of-band rejection 이 증가하였고 층수가 증가할수록 삽입손실은 감소하지만 대역폭에는 거의 변화가 없었다. membrane 형의 ladder 필터와 SCF 는 불효 공진특성으로 인한 불효응답특성이 나타났다. 또한 ladder 필터는 보다 우수한 대역폭의 skirt-selectivity 특성을 나타내었으며 SCF 는 대역폭의 삽입손실 측면에서 더 우수하였다.

Abstract

In this study, we have analyzed the effects of the membrane layer and the bragg reflector layers on the resonance characteristics through comparing the characteristics of the membrane type FBAR (Film Bulk Acoustic Wave Resonator) and the one type bragg reflector layers with those of the ideal FBAR with top and bottom electrode contacting air by using equivalent circuit technique. It is assumed that ZnO is used for piezoelectric film, SiO₂ are used for membrane layer and low acoustic impedance layer, W are used for the high acoustic reflector layer and Al is used for the electrode. Each layer is considered to have a acoustic propagation loss. ABCD parameters are picked out and input impedance is calculated by converting 1-port equivalent circuit to simplified equivalent circuit that ABCD parameters are picked out possible. From the variation of resonance frequency due to the change of thickness of electrode layers, reflector layers and membrane layer it is confirmed that membrane layer and the reflector layer just under the electrode have the greatest effect on the variation of resonance frequency. From the variation of resonance properties, K_{eff} and electrical Q with the number of layers, K_{eff} is not much affected by the number of layers but electrical Q increases with the number of layers when the number of layers is less than seven. The electrical Q is saturated when the number of layers is large than six. The electrical Q is dependent of mechanical Q of reflector layers and membrane layer. Both ladder filter and SCF (Stacked Crystal Filters) show higher insertion loss and out-of-band rejection with the increase of the number of resonators. The insertion loss decreases with the increase of the number of reflector layers but the bandwidth is not much affected by the number of reflector layers. Ladder Filter and SCF with membrane layer show the spurious response due to spurious resonance properties. Ladder filter shows better skirt-selectivity characteristics in bandwidth but SCF shows better characteristics in insertion loss.

* 正會員, 仁荷大學校 電子材料工學科
(Dept. of Electronic Materials & Device Engineering,

Inha Univ.)
接受日字:2001年10月20日, 수정완료일:2002年1月21日

I. 서 론

무선 통신의 주파수 대역범위가 500MHz~6GHz 로 증가되고, 휴대용 단말기의 소형화 경량화를 추구하면서 저 삽입손실, 높은 온도에서의 주파수 안정성 그리고 단일칩상에 제작 가능한 체적탄성과 공진기(FBAR) 필터 개발이 활발하게 연구되고 있다.^[1,2] 현재 상용화 되고 있는 RF 필터로는 유전체 필터와 SAW 필터가 있다. 유전체 필터는 삽입손실 면에서 우수한 특성을 모이나 기술적인 발전동향인 소형화 및 MMIC 화에는 한계를 보이고 있고 SAW 필터는 FBAR 필터나 유전체 필터에 비해 삽입손실이 크고 IDT 선평의 공정 한계 때문에 초고주파(<5GHz) 대역이 불가능하다. 이에 비해 FBAR 필터의 압전체의 두께는 유전체 공진기와 같이 사용주파수의 $\lambda/2$ 에 의해 결정되지만 이 파장은 전자기파가 아닌 압전 박막의 체적 탄성과의 파장에 의존하므로 10000배 이상의 속도차에 의해 공진기의 두께는 수 마이크로미터로 줄어들게 되고, Si 이나 GaAs 기판을 사용하기 때문에 집적화가 가능하므로, 반도체 공정을 이용한 대량생산과 다른 RF 능동소자들과의 자유로운 결합이 가능하다. FBAR 는 전극-압전박막-전극으로 이루어진 실제 소자에서 압전특성에 의한 전기 기계적 결합(electromechanical coupling)에 의해 형성된 정재파를 이용하는데 음향손실이 적은 정재파가 형성하기 위해서는 소자의 경계조건이 공기 또는 진공상태를 만족해야 하며 이를 만족시키기 위해 지금까지 많은 FBAR 에 대한 연구는 MEMS (Microelectric Mechanical System)공정의 발전에 따라 membrane 을 이용한 공진기 제조와 $\lambda/4$ 두께의 임피던스 차가 큰 재료의 적층에 의한 브래그 반사층을 이용한 FBAR 의 연구가 많은 관심을 모으고 있다.^[2,3,8,11] $\lambda/4$ 두께의 임피던스차가 큰 물질을 적층으로 쌓으면 하부 임피던스를 0으로 근접시킬 수 있는데 이를 이용하여 높은 quality factor 를 갖는 공진기를 얻을 수 있다.

FBAR 의 전기적 Q(Quality factor)^[13] 및 전기기계 결합계수의 향상을 위해 압전층의 c 축 우선배향성과 낮은 roughness를 압전층에 대한 연구에 편중되어 있어 압전층 이외의 조건의 영향 즉, 즉 FBAR의 구조적 차이점에서 전기적 Q 와 유효전기기계결합계수(K_{eff})의 변화에 대해서는 충분히 이해되지 못하고 있다. 본 연구에서는 등가회로를 이용하여 반사층 수 및 반사층

두께와 같은 공진기 변수의 함수로써 공진기를 이해하고 반사층 수에 따른 FBAR의 공진특성 및 반사층 구조의 FBAR와 membrane 구조를 갖는 FBAR의 공진특성을 서로 비교함으로써 구조적 차이점에서의 전기적 Q 와 유효전기기계결합계수를 알아보았다. Membrane 층과 반사층이 공진특성에 미치는 영향을 분석하고자 Membrane 형과 하부전극 아래에 반사층 구조의 FBAR의 특성을 상 하부 전극 모두 공기층과 접하는 이상적인 FBAR 와 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 공진기를 직, 병렬로 조합한 ladder 필터와 SCF (Stacked Crystal Filters) 특성을 비교 분석하여 공진기 구조와 반사층 수에 따른 필터의 대역폭 및 삽입손실, 불효응답특성 등을 알아보았다. 또한 공진기 구조가 동일한 경우 ladder 필터와 SCF 의 장, 단점을 알아보았다.

II. 이론적 배경

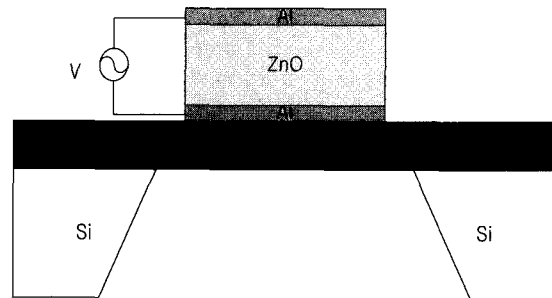
Bragg reflector layers 을 고려한 FBAR 의 특성을 분석하기 위해 그림과 같이 공진기의 구조를 설정하였다. Bragg reflector형 공진기는 Lakin 에 의해 SMR (Solidly Mounted Resonator) 이라 표현하였는데^[5] 본 논문에서는 앞으로 Bragg Reflector 형을 SMR 이란 표현을 쓸 것이다. 그림1(a)는 상하부 전극 모두 공기와 접하는 이상적인 FBAR 구조이고 그림 1(b)(c)는 SMR 구조와 membrane 구조를 나타낸다. 압전층은 인가되는 전기장에 압전박막이 전기장에 대해 동일한 방향으로 정렬되어 있다고 가정하였다. 시뮬레이션에 이용된 압전박막은 ZnO 으로 육방정계의 구조로서 높은 c 축 우선배향성과 높은 전기기계결합계수를 갖는다고 보고되고 있다.^[4,12] 시뮬레이션에 사용된 ZnO 의 물질과 하부 반사층과 전극에 사용한 물질 parameter는 표 1에 나타내었다.

이 세가지 구조를 수식적으로 분석하기 위해 등가회로를 사용하였다. 그림 2(a)(b)는 반사층 구조와 membrane 구조를 갖는 FBAR 의 1-port 등가회로이다. 등가회로는 전기적 부분과 탄성적 부분을 결합으로 이루어져 있어 반사층과 membrane 층을 고려한 입력 임피던스를 구할 수 있다. 첨자로 표시된 p, e, s, m, l, h은 압전층, 전극, 기판, membrane, 낮은 음향학적 임피던스, 높은 음향학적 임피던스를 나타낸다. 압전층과 membrane 층의 두께는 공진주파수 파장의 1/2, 반사층

표 1. (a) FBAR 시뮬레이션에 사용된 물질 상수
Table 1. (a) Thin film material constants used in FBAR 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	0.8	2000
Al	1.11	2700	1		500
SiO ₂	0.79	2200	3.9		1500
W	5.81	18400	1		1500
Si	1.66	2330	11.7		3000

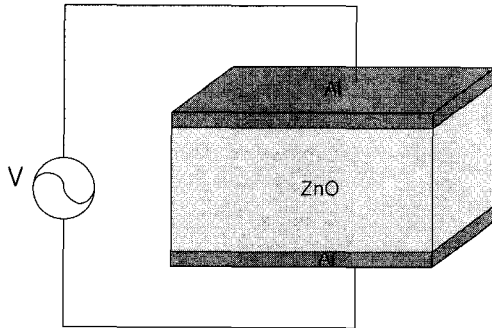
의 두께는 기본공진주파수 파장의 1/4, 전극은 0.1 μm 로 가정하였다. 압전층은 ZnO 를, 전극층에는 Al 을, 기판은 Si, 그리고 membrane 층과 낮은 음향학적 임피던스 층은 SiO₂ 와 높은 음향학적 임피던스층은 W 을 사용하였다. 각 층은 탄성과 전달 손실을 가정하였다. 이는 각층이 유한한 기계적 Q 를 갖는다고 바꾸어 말할 수 있다. Z 는 탄성과 임피던스와 흡수계수 α 그리고 전파상수 β 를 비롯한 등가회로에서 사용한 수식을 정리하면 다음과 같이 정의된다.^[6,7]



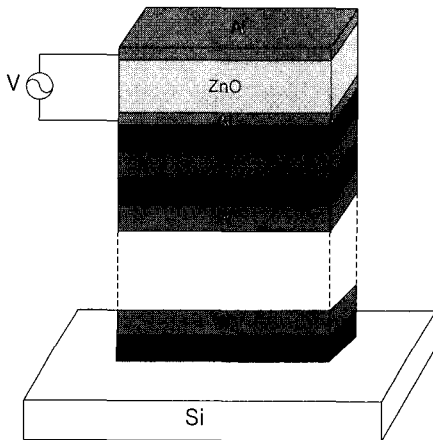
(c)

그림 1. (a) 이상적인 FBAR (b) 반사층형 FBAR (SMR). (c) membrane 형 FBAR

Fig. 1. (a) ideal FBAR (b) reflector layers type FBAR (SMR) (c) membrane type FBAR.



(a)



(b)

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

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

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

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

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

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

$$C_o = \frac{\epsilon_o \epsilon_{33} A}{d} \quad (7)$$

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (8)$$

$$h = \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}} \quad (9)$$

$$a = iZ \tanh(\gamma \frac{d}{2}) \quad (10)$$

$$b = \frac{-iZ}{\sinh(\gamma d)} \quad (11)$$

여기서 $v_{p,n}$ 는 탄성파의 위상 속도이다. p, n의 첨자는 압전층과 비압전층을 의미한다. Q_m 는 mechanical Q 를 나타낸다. A 는 전극면적, d 는 압전층두께, ϵ_{33} 은 압전층의 유전율, η 는 물질의 탄성손실을 나타내는 viscosity factor, ρ 는 밀도, c_{33} 는 탄성계수, e_{33} 는 압전계수이다. hC_o 는 압전효과로 나타나는 기계적으로 변환되는 에너지 양을 나타낸다. 그림 2(a)(b)는 압전층이 전기적 1-port와 탄성적 2-port로 구성되어 있어 ABCD 파라미터를 추출할 수 없다. 그래서 그림 2(c)와 같이 압전층의 위층(상부전극층)과 아래층(하부전극층, 반사층과 기판 또는 하부전극층과 membrane 층)을 각각 하나의 임피던스로 compute 화한 ABCD 전달 매트릭스를 이용할 수 있는 등가회로로 바꾸어서 해석하였다. 여기서 z_i 는 상부전극, z_c 는 SMR의 경우 하부전극층, 반사층과 기판을 membrane 구조인 경우 하부전극층과 membrane 층을 compute 화한 것이다. z_i 는 압전층에서 상부전극을 바로본 임피던스이고 z_c 는 압전층에서 기판을 바로본 임피던스이다. z_i 와 z_c 는 포함하고 있는 층의 ABCD 파라미터의 곱으로 음향학적 경로를 포함하는 식이다. 그림 2(c)의 ABCD 파라미터를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ -v \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$A = \frac{a_p + b_p + z_i + \frac{j h^2 C_o}{2\pi f}}{h C_o (a_p + z_i)} \quad (13)$$

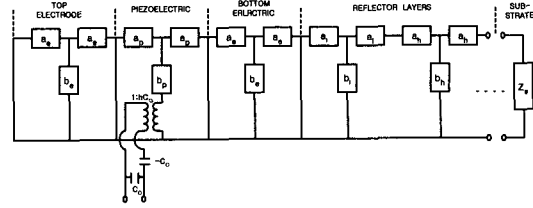
$$B = \frac{(a_p + b_p + z_c + \frac{j h^2 C_o}{2\pi f})(a_p + z_i) + (b_p + \frac{j h^2 C_o}{2\pi f})(a_p + z_c)}{h C_o (a_p + z_i)} \quad (14)$$

$$C = \frac{i 2\pi f (a_p + b_p + z_i)}{h (a_p + z_i)} \quad (15)$$

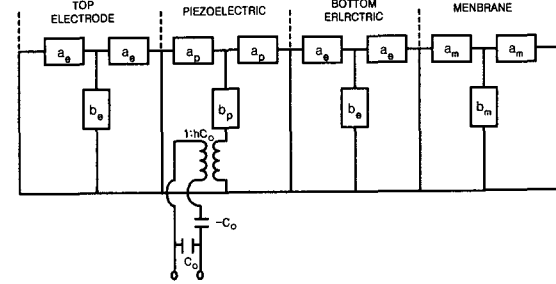
$$D = - \frac{(a_p + b_p + z_c)(a_p + z_i) + b_p (a_p + z_c)}{\frac{j h}{2\pi f} (a_p + z_i)} \quad (16)$$

이상적인 FBAR 의 경우는 z_c 와 z_i 는 같은 식이 된다.

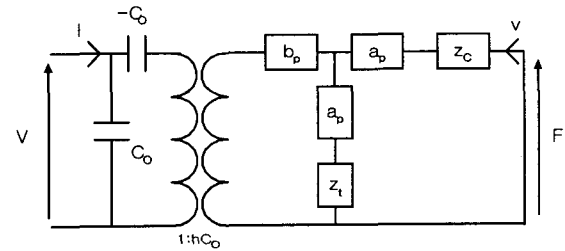
공진기의 입력임피던스 Z_{in} 은 식 (12)의 V/I 이다. 여기서 F는 0가 되므로 입력임피던스는 B/D 가 된다.



(a)



(b)



(c)

그림. 2. (a) 1-port 의 SMR 등가회로
(b) 1-port 의 membrane 형의 FBAR 등가회로
(c) 단순화 시킨 FBAR 등가회로

Fig. 2. (a) SMR of 1-port equivalent circuit
(b) Membrane type FBAR of 1-port equivalent circuit
(c) FBAR of simplified equivalent circuit.

FBAR는 체적 탄성파이므로 두께 변화에 따라 공진 주파수가 변하게 된다. 본 논문에서는 전극과 반사층 그리고 membrane 의 두께에 따른 공진주파수의 변화를 정량적으로 알기 위해 주파수 민감도 ($[\Delta f/f_o] / [\Delta d/d]$)를 구하였다.^[14] 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 두가지 성능지수(Figure of Merits : FOMs)가 있다. 하나는 유효 전기기계결합계수(K_{eff}) 이고 전기적 Q 이다. 본 논문에서는 공진기의 quality factor를 전기적 Q 란 표현을 쓸 것이다. K_{eff} 는 각 모드에서 직렬과 병

렬 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 공진기내에서의 탄성과 손실을 나타낸다. 전기적 Q 는 궁극적으로 필터 특성에서의 삽입손실과 감쇄 특성에 직접적으로 영향을 미치는 변수이고 K_{eff} 는 필터의 대역폭을 결정하는 상수이다. 두가지 성능지수는 다음식을 따른다.^[10]

$$K_{eff} = \frac{\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}\right)} \quad (17)$$

$$Q_{sp} = \frac{f}{2} \frac{d\angle Z_{in}}{df} \Big|_{f=f_{sp}} \quad (18)$$

f_s 는 직렬공진주파수, f_p 는 병렬공진주파수를 나타낸다. 본 논문에서의 직,병렬공진주파수는 공진기의 임피던스의 최소, 최대가 되는 주파수로 정의하였다.

살펴본 공진기의 특성이 필터의 삽입손실 또는 대역폭에 어떤 영향을 미치는지 조사하기위해 필터를 설계해 보았다. FBAR 를 이용한 필터는 크게 monolithic 필터, Ladder 필터, SCF(Stacked Crystal Filters) 3가지 종류가 있는데 monolithic 필터는 shear 모드와 longitudinal 모드 두가지 특성이 함께 나타나는 것으로 알려져 있다.^[9] 본 논문에서는 이상적인 FBAR, SMR 형과 membrane 형의 FBAR 로 이루어진 Ladder 필터와 SCF 를 설계하여 반사층과 membrane 층이 필터 특성에 미치는 영향과 Ladder 필터와 SCF 차이점에 대해 연구의 초점을 맞추어 보았다. Ladder 필터는 직렬공진기의 직렬공진주파수와 병렬공진기의 병렬공진주파수를 일치하는 주파수가 필터의 중심주파수라고 정의된다.^[15] 등가회로에서 구한 입력 임피던스를 이용하여 S21 파라미터를 구하였다. 여기서 입력과 출력측 기준 임피던스는 각각 50Ω이라고 가정하였다.

SCF 필터는 그림 3(b)와 같이 접지 전극을 사이에 두고 두 압전층이 탄성적으로 결합한 형태이다. 이를 그림 3(c)와 같이 두 개의 FBAR 를 탄성적으로 결합하여 등가회로를 구하였다. 이를 이용하여 ABCD 파라미터를 구하여 입력임피던스를 구할 수 있다. ABCD 파라미터를 이용하여 S21 파라미터를 시뮬레이션 하였고 ladder 필터와 마찬가지로 입력과 출력측 기준 임피던스는 각각 50Ω으로 가정하였다.

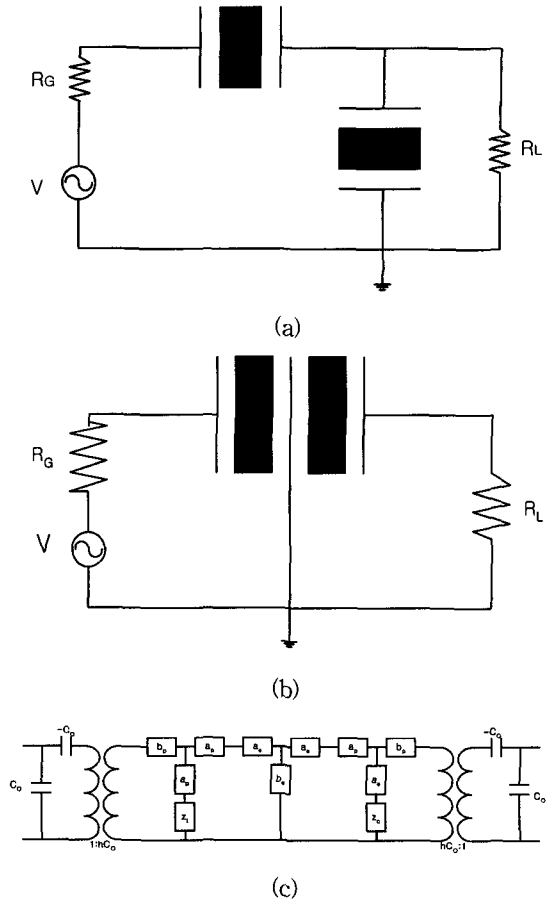


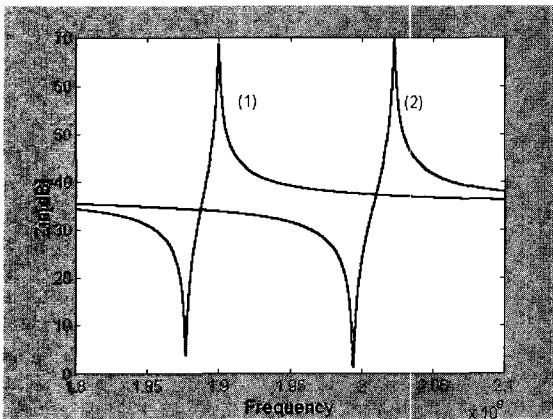
Fig. 3. (a) ladder 필터의 모식도
(b) SCF필터의 모식도
(c) SCF의 등가회로
그림 3. (a) ladder filter topology
(b) SCF topology
(c) SCF of equivalent circuit

III. 결과 및 논의

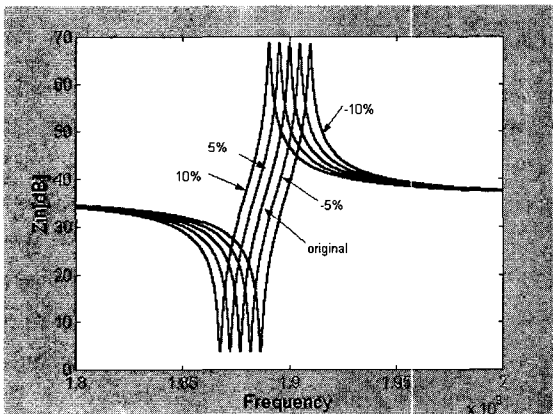
전극이 무한히 얇은 경우 즉, 전극 두께를 고려하지 않은 FBAR 의 공진 주파수는 압전물질의 두께와 wave 속도에 의해서 정해지지만 실제 고주파에서는 전극의 두께에 의해 공진 주파수가 낮아지게 된다. 그림 4(a)는 전극을 고려하지 않은 이상적인 FBAR 와 0.1um의 전극을 고려한 이상적인 FBAR 의 입력 임피던스 특성을 나타낸다. 전극을 고려하지 않으면 실제의 경우 즉, 전극의 acoustic mass loading 효과에 의해 공진주파수가 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그러므로 원하는 공진 주파수를 얻으려면 압전층의 두께를 더 얇게 하여야 한다. 그림 4(b)는 5층의 SMR 의 전극두

계변화에 따른 공진주파수의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 5층은 반사층수를 나타낸다. 전극의 두께 변화율은 %로 나타내었으며, +, -는 전극 두께의 증가 및 감소를 나타낸다. 전극의 두께가 두꺼워질수록 공진주파수는 낮아짐을 확인할 수 있다. 전극의 두께 변화에 의해서도 공진주파수가 이동을 하므로 제작시 전극의 두께도 공진주파수를 변화시키는 중요한 변수임을 알 수 있다. 그림4(c)는 전극의 두께 변화에 따른 주파수 민감도를 구하였다. 민감도는 -0.0523임을 확인할 수 있다.

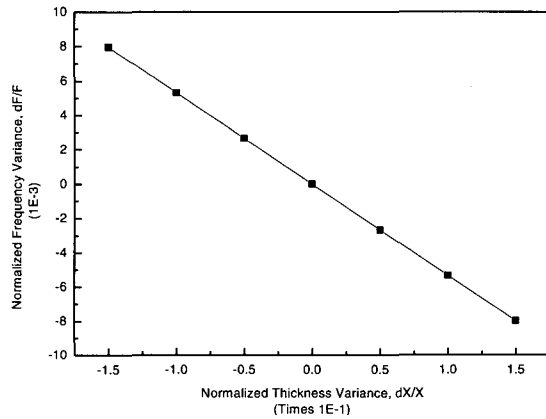
그림 5(a),(b),(c),(d)은 반사층의 두께 변화에 따른 입력임피던스의 변화와 이에 따른 주파수 선택도를 나타내고 있다. 여기서 1,2,3,4,5는 하부전극 바로 아래부터의 층수이다. 즉, 하부전극 바로 아래의 반사층은 반사층1으로 표시되고, 기판 바로 위의 반사층은 반사층5로 표시된다. 반사층의 두께는 공진주파수의 $\lambda/4$ 의 두께로 정해지지만 그림 5(a)에서 알 수 있듯이 $\lambda/4$ 보다 낮은 경우 공진 주파수가 높은 쪽으로 이동하고



(a)



(b)



(c)

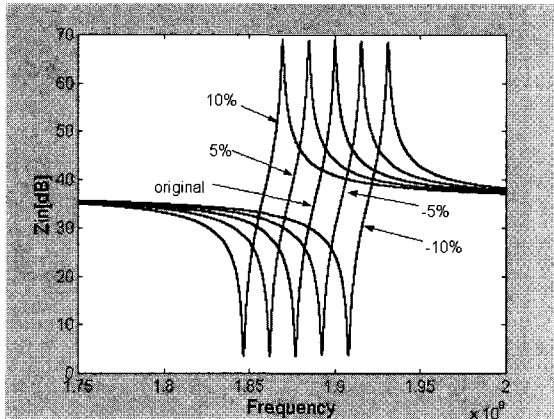
그림 4. (a) 전극 고려유무에 따른 이상적인 FBAR의 입력임피던스 변화
 (1) 전극을 고려하지 않는 경우
 (2) 전극을 고려한 경우
 (b) 전극의 두께 변화에 따른 5층의 SMR 입력임피던스 변화
 (c) 전극의 두께 변화에 따른 5층의 SMR 입력임피던스 변화에 대한 민감도

Fig. 4. (a) Change of input impedance of SMR with five reflector layers with and without electrodes
 (1) Not considering electrodes
 (2) considering electrodes
 (b) Change of input impedance of SMR with five reflector layers with change of electrodes thickness
 (c) Selectivity change of input impedance of SMR electrodes with change of electrodes thickness

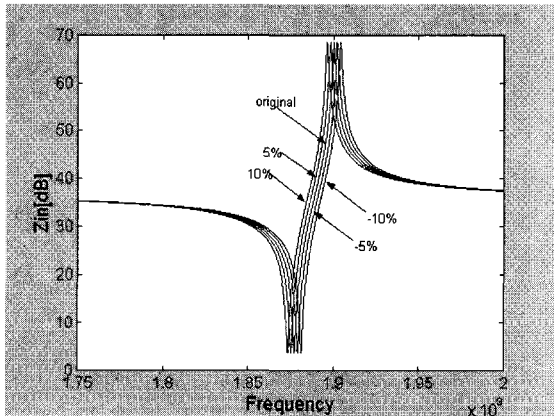
$\lambda/4$ 보다 낮은 쪽으로 이동한다. 하지만 반사층1의 두께변화에 의해서 공진주파수의 변화가 큰 것을 알 수 있고 하부전극으로부터 멀어질수록 공진주파수의 변화가 적다는 것을 민감도 분석을 통해 알 수 있다. 각 층의 민감도는 -0.162(1), -0.02(2), -0.003(3), -0.00035(4), 0(5)이다. 괄호안의 숫자는 반사층을 나타낸다. 반사층1의 민감도가 큰 이유는 생성된 반사층의 정재파가 대부분 반사층1에 존재하기 때문이다.

그림 6(a)는 SMR과 membrane형 FBAR의 입력 임피던스의 공진특성을 보여준다. SMR의 경우 압전체 두께에 따른 유효공진만이 일어나지만 membrane형의 경우 membrane으로 인한 공진모드 증가로 인해 대략 유효공진 주파수의 1/2과 3/2에서 불효공진이 일어남을 알 수 있다. 정확히 1/2, 3/2이 아닌 이유는

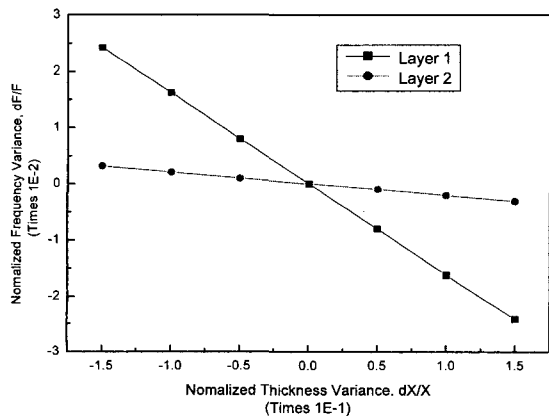
membrane 과 압전층의 탄성과 속도 차이로 인해 공진 주파수의 파장이 다르기 때문이다. 하지만 SMR의 경우 반사층이 유효공진 파장만이 공진 하므로 다른 불효공진은 일어나지 않는다. 그림 6(b)는 membrane 층의 두께 변화에 의한 공진주파수의 변화와 민감도를 나타낸다. 두께 변화로 인한 공진주파수의 변화 폭이 상당히 큼을 알 수 있다. 민감도의 크기는 -0.245이다.



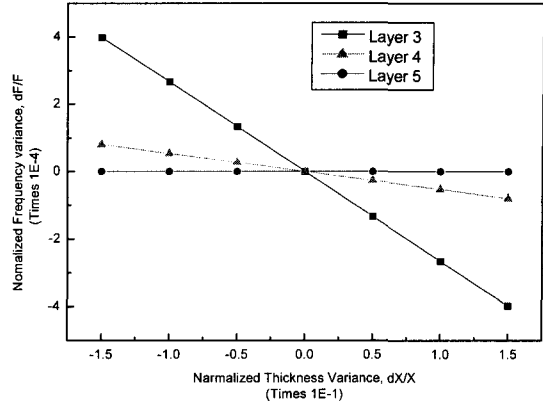
(a)



(b)



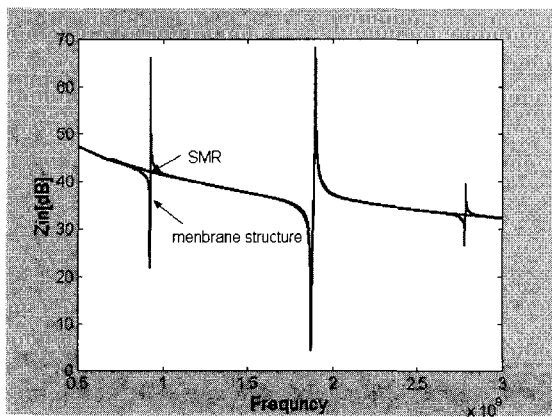
(c)



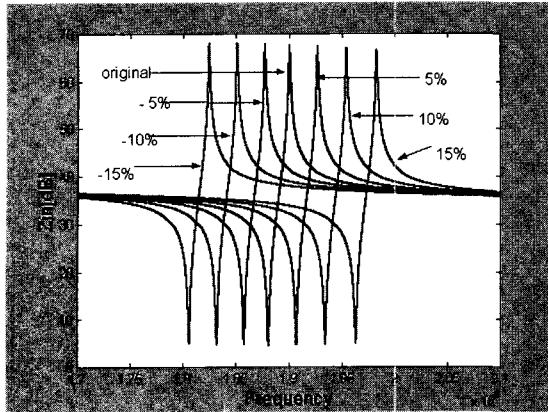
(d)

그림 5. (a) 5층의 SMR 반사층1의 두께 변화에 따른 입력 임피던스의 변화 (b) 5층의 SMR 반사층 2의 두께 변화에 따른 입력 임피던스의 변화 (c) 5층의 SMR 반사층1,2의 두께 변화에 따른 입력 임피던스 변화에 대한 민감도 (d) 5층의 SMR 반사층3,4,5의 두께 변화에 따른 공진주파수 변화에 대한 민감도

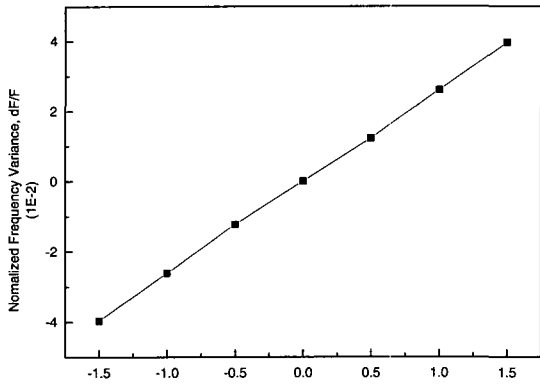
Fig. 5. (a) Change of input impedance of SMR with five reflector layers with change of the thickness of reflector layer 1 (b) Change of input impedance of SMR with five reflector layers with change of the thickness of reflector layer 2 (c) Selectivity change of input impedance of SMR with five reflector layers with change of the thickness of reflector layer 1 and 2 (d) Selectivity for change of input impedance of SMR with five reflector layers with change of the thickness of reflector layer 3,4 and 5



(a)



(b)

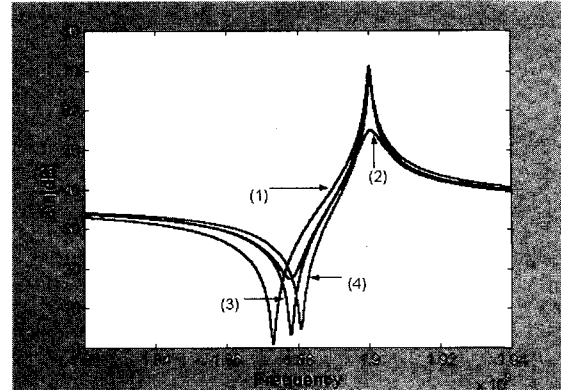


(c)

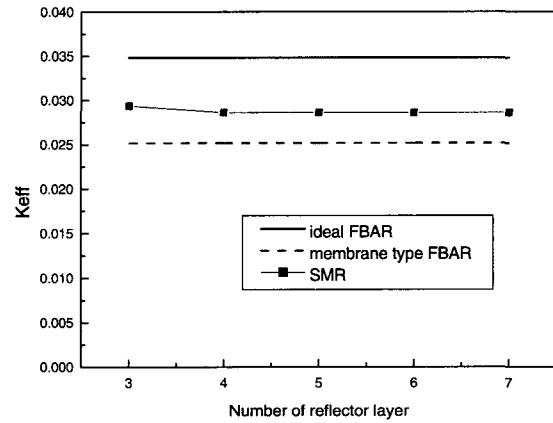
그림 6. (a) 5층의 SMR 과 membrane 형 FBAR 의 입력임피던스 변화
(b) Membrane 의 두께 변화에 따른 입력 임피던스 변화
(c) Membrane 의 두께 변화에 따른 입력 임피던스 변화에 대한 민감도

Fig. 6. (a) Input impedance of SMR with five reflector layers and of membrane structure of FBAR
(b) Change of input impedance of membrane type FBAR with change of the thickness of membrane
(c) Selectivity for change of input impedance of membrane type FBAR with change of the thickness of membrane

그림 7(a)는 membrane 형과 SMR 의 반사층수에 따른 입력 임피던스 변화를 보여준다. SMR 의 경우 반사층수에 따라 공진효율이 다른 이유는 반사층수가 높을수록 더 많은 탄성파에너지가 압전층에 모이기 때문이다. 5층과 7층은 거의 공진효율의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. SMR 과 membrane 형 FBAR 그



(a)



(b)

그림 7. (a) SMR 의 반사층수에 따른 입력 임피던스 와 membrane 형 FBAR 그리고 이상적인 FBAR 의 입력 임피던스
(1) 이상적인 FBAR (2) 3층의 SMR (3) 5,7층의 SMR (4) membrane 형 FBAR
(b) SMR의 반사층수에 따른 K_{eff} 와 membrane 형 FBAR 그리고 이상적인 FBAR 의 K_{eff}

Fig. 7. (a) Input impedance of SMR with the number of reflector layers, of membrane type FBAR and of ideal FBAR
(1) ideal FBAR (2) SMR with three reflector layers (3) SMR with five, seven reflector layers (4) membrane type FBAR
(b) K_{eff} of SMR with the number of reflector layers, of membrane type FBAR and of ideal FBAR

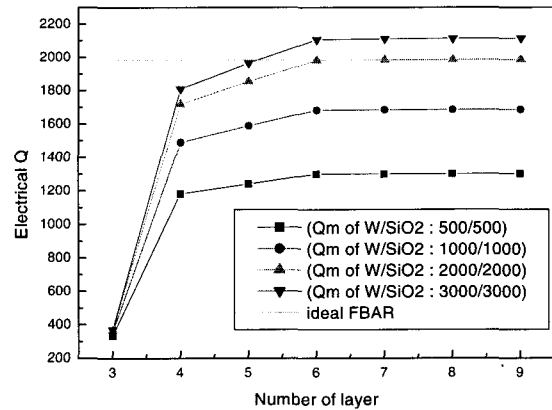
리고 이상적인 FBAR 와 직렬공진 주파수가 다른 것은 K_{eff} 의 차이와 관련이 있다. 그림 7(b)는 SMR 과 membrane 형 FBAR 그리고 이상적인 FBAR 의 K_{eff} 를 나타낸다. 생성된 정재파가 이상적일 경우는 압전층

널에만 존재하지만 반사층이나 membrane 이 있을 경우 반사층과 membrane 층내에도 정재비파가 존재하게 되므로 K_{eff} 의 감소를 유발한다. 또한 SMR의 K_{eff} 는 반사층수에 따라 거의 일정한 값을 갖는데 이는 반사층의 임피던스차가 커서 반사층수가 증가할수록 반사층내의 정재비가 거의 증가하지 않기 때문이다. 이는 반사층내에 존재하는 정재파가 거의 하부전극 아래의 반사층에 존재한다는 것을 알 수 있다. 즉 임피던스차 큰 반사층을 사용할 경우 층수를 증가시켜도 거의 K_{eff} 는 변화가 없다는 결론을 얻는다.

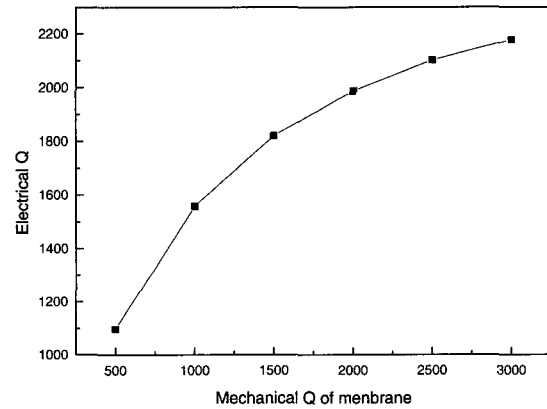
Membrane 구조가 반사층 구조보다 더 낮은 K_{eff} 를 보이는데 이는 반사층 보다 membrane 에 더 많은 정재비파가 존재하기 때문이다.

그림 8(a)은 SMR 의 반사층수에 따른 전기적 Q의 변화량과 membrane 형과 이상적인 FBAR 의 전기적 Q 를 시뮬레이션한 결과이다. 동일한 주파수에서 비교하기 위해 병렬공진주파수에서의 전기적 Q 를 구하였다. SiO₂ 와 W 의 기계적 Q 에 따른 FBAR 의 전기적 electrical Q 를 알아보았다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 FBAR 의 압전층의 Q 의 값이 공진기의 정확한 전기적 Q 라고는 볼 수 없다. 즉 반사층의 기계적 Q 의 값에 영향을 받는다. 반사층의 기계적 Q 가 압전층의 기계적 Q 보다 크고 6층이상의 반사층을 갖을 경우 SMR 의 전기적 Q 가 반사층이 없는 FBAR 의 전기적 Q 보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 반사층의 기계적 Q 가 압전층의 기계적 Q 보다 작을 경우 반사층수가 증가하여도 반사층이 없는 FBAR 의 전기적 Q 보다 작음을 알 수 있다. 즉, FBAR 의 전기적 Q 를 증가시키기 위해서는 압전층과 그에 따른 반사층의 기계적 Q 의 값이 높아야만 가능하다는 결론을 얻는다. 반사층수가 증가할수록 FBAR 의 전기적 Q 가 증가하는데 이는 탄성파에너지가 압전층에 축적하기 때문이다. 반사층의 기계적 Q 에 관계없이 반사층이 4층부터 전기적 Q 의 증감이 둔화되다가 7층에서 saturation 되는 것을 알 수 있다.

그림 8(b) 는 membrane 의 기계적 Q 에 따른 전기적 Q 이다. SMR 의 경우와 같이 membrane 층의 기계적 Q 가 반사층의 기계적 Q 보다 전기적 Q 에 더 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 반사층의 전기적 Q 의 변화량보다 더 큰데 이는 반사층 보다는 membrane 에 더 많은 정재파가 존재함을 나타낸다.



(a)



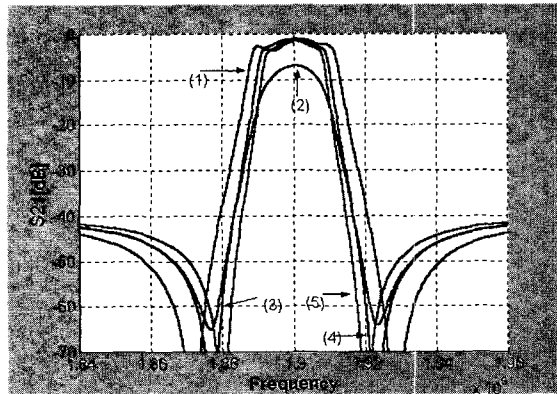
(b)

그림 8. (a) SMR 의 반사층수에 따른 electrical Q 와 이상적인 FBAR 의 electrical Q (b) Membrane 의 mechanical Q 에 따른 electrical Q

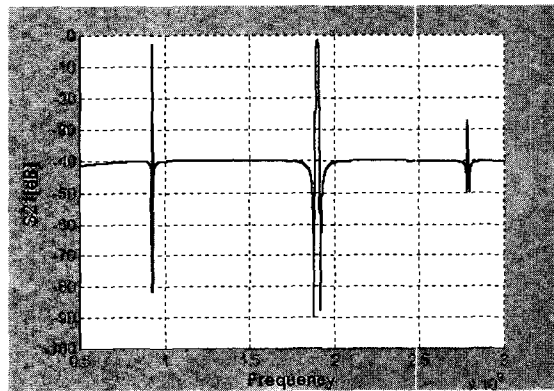
Fig. 8. (a) Electrical Q variance of SMR with the number of reflector layers and electrical Q of ideal FBAR (b) Electrical Q variance of with mechanical Q of membrane

FBAR 를 직,병렬로 전기적으로 연결함으로써 ladder 필터를 구현할 수 있다. 필터의 대역폭은 공진기의 K_{eff} 에 따라 결정되고 전기적 Q 에 따라 삽입손실이 결정된다. Ladder 필터의 설계원리는 직렬공진기의 직렬공진주파수와 병렬공진기의 병렬공진주파수를 일치시킨 주파수가 필터의 중심주파수로 정의된다. 즉 직렬공진기와 병렬공진기는 약간의 두께차이가 난다. 주파수가 일치되지 않으면 통과대역에서 리플이 발생하게 된다. 직렬공진기와 병렬공진기의 공진면적을 조절함으로써 out-of-band rejection 의 크기를 결정하게 되는데

본 논문에서는 직렬공진기의 공진면적을 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 그리고 병렬공진기의 공진면적을 $350\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ 으로 정하였다. 이때 out-of-band rejection은 40dB 이 된다.



(a)



(b)

그림 9. (a) 반사층 수에 따른 SMR 형과 이상적인 FBAR 형 그리고 membrane 형의 2/2 ladder 필터의 S21 비교

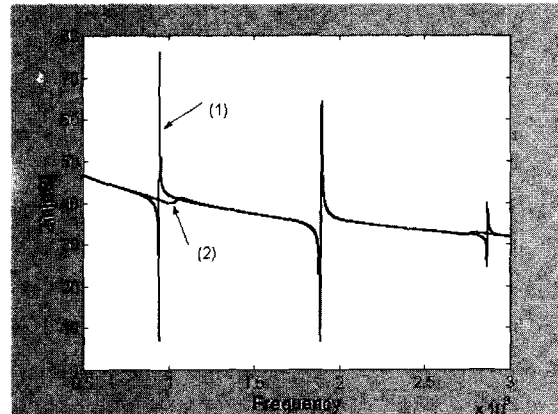
- (1) 이상적인 ladder 필터 (2) 3층의 SMR 형 ladder 필터 (3) 5층의 SMR 형 ladder 필터 (4) 7층의 SMR 형 ladder 필터 (5) membrane 형 ladder 필터

(b) Membrane 형 2/2 ladder 필터의 광대역 S21

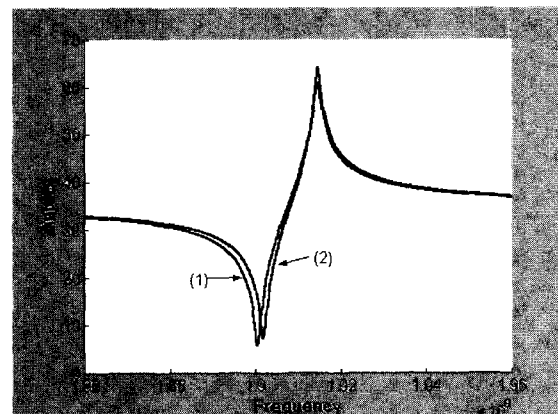
Fig. 9. (a) Comparison S21 2/2 ladder filter of SMR type with the number of reflector layers, of membrane type and of ideal FBAR type

- (1) ideal FBAR (2) SMR with three reflector layers type ladder filter (3) SMR with five reflector layers type ladder filter (4) SMR with seven reflector layers type ladder filter (5) membrane type ladder filter
- (b) Wideband S21 2/2 membrane type ladder filter.

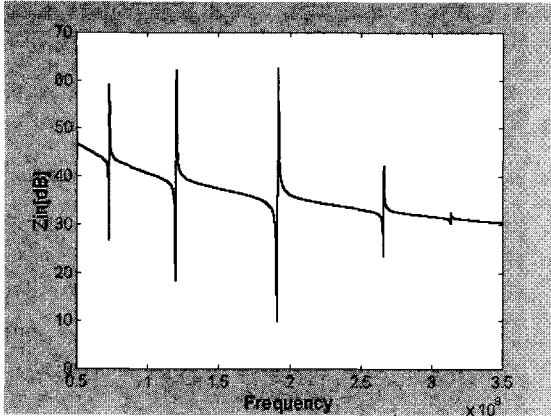
그림 9(a)는 이상적인 FBAR 형과 SMR 형 그리고 membrane 형 2/2 ladder 필터의 S21 특성을 비교한 것이다. 이상적인 FBAR 형과 membrane 형이란 의미도 앞에서 설명한 SMR 형이란 의미와 같이 이상적인 FBAR 와 membrane 형 FBAR 로 구성되었다는 의미이다. 이상적인 FBAR 형인 경우 23 MHz, 5층의 반사층을 갖는 SMR 형의 경우 18.3 MHz, membrane 형인 경우 15.9 MHz로 대역폭이 다르게 나타난다. 이는 membrane 형 FBAR 의 K_{eff} 가 이상적인 FBAR 와 SMR 의 K_{eff} 보다 작기 때문이다. 그리고 반사층수에 따라서 대역폭은 거의 변화가 없는데 이 또한 K_{eff} 가 반사층수에 따라서 거의 일정한 값을 갖기 때문이다. SMR 의 반사층수에 따른 삽입손실은 3층보다는 5, 7층이 훨씬 낮다는 것을 확인할 수 있다. 이는 electrical Q 의 차이 때문인데 그림 8(a)에서 확인할 수 있다. 반사층수에 따른 삽입손실은 3층에서 7dB, 5층에서 1.55dB, 7층에서는 1.45dB 이라는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 10. (a) 5층 SMR 형 SCF 와 이상적인 FBAR 형 SCF의 광대역 입력 임피던스 특성 (1) 이상적인 FBAR 형 SCF (2) 5층 SMR 형 SCF (b) 5층 SMR 형 SCF 와 이상적인 FBAR 형 SCF의 협대역 입력 임피던스 특성 (1) 이상적인 FBAR 형 SCF (2) 5층 SMR 형 SCF (c) Membrane 형 SCF 의 광대역 임피던스

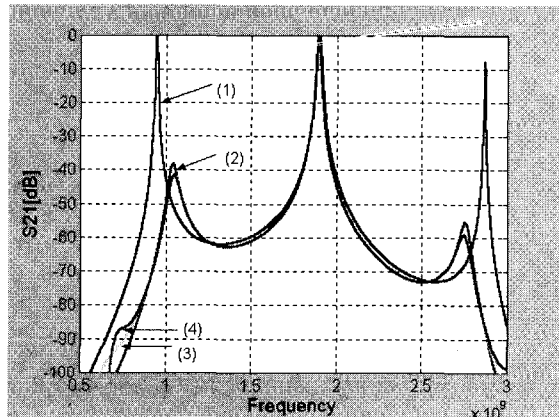
Fig. 10. (a) Wideband impedance characteristics of ideal FBAR type SCF and of SMR with five reflector layers type SCF (1) ideal FBAR type SCF (2) SMR with five reflector layers type SCF (b) Narrowband impedance characteristics of ideal FBAR type SCF and of SMR with five reflector layers type SCF (1) ideal FBAR type SCF (2) SMR with five reflector layers type SCF (c) Wideband impedance characteristics of Cascade membrane type SCF.

그림 9(b)는 membrane 형 ladder 필터의 광대역 S21 특성이다. 대략 기본 응답 주파수의 1/2 과 3/2 에서 불효 응답 특성을 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 6(a)에서 살펴보았듯이 불효 공진특성으로 인해 발생하는 불효 응답 특성이다.

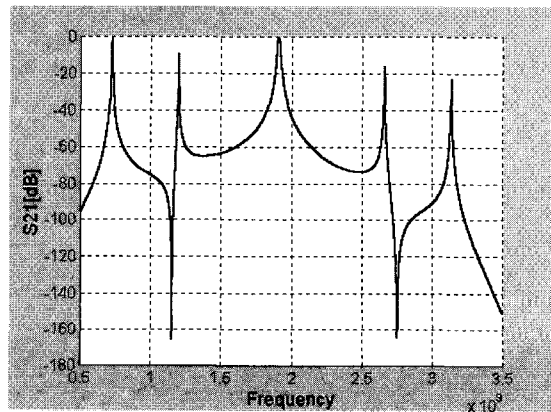
SCF는 Ladder 필터와는 달리 탄성적 결합으로 이루어진다. 즉, 전기적 입력 신호는 중앙의 접지로 흘러가지만 입력측에서 만들어지는 탄성파는 하부 압전층에 전달하여 공진을 일으키는 원리이다.

그림 10(a)는 5층의 SMR 형과 이상적인 FBAR 형 SCF 광대역입력임피던스 특성이다. SMR 형과 membrane 형 SCF 라는 의미는 출력측 압전층 아래의 구조를 의미한다. 예를들면, SMR 형이란 의미는 출력측

압전층 아래가 반사층으로 이루어진 구조를 가르킨다. 이상적인 FBAR 형 SCF 는 유효공진이외에 두 개의 불효공진이 발생하는데 이는 압전체가 탄성적으로 연결한 형태이므로 압전체 전체의 두께가 2배가되기 때문이다. 하지만 SMR 형 SCF 는 반사층의 두께가 유효 공진의 반파장이기 때문에 유효공진 이외의 불효공진으로 인한 임피던스의 크기는 유효공진의 임피던스 크기에 비해 훨씬 작아진다. 그림 10(b)로부터 SMR 형과 이상적인 형의 입력 임피던스 특성 모두 앞에서 살펴본 1-port FBAR 의 K_{eff} 보다 작음을 알 수 있는데 이는 압전층이 두개이므로 정재파가 두 개의 압전층에 분산되었기 때문이다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 반사층이나 membrane 층에 존재하는 정재파 때문에 SMR 이나 membrane 형 FBAR 의 K_{eff} 가 이상적인 FBAR 의 K_{eff} 보다 작은 이유와 같다. 그림 10(c)는 membrane 형 SCF 의 입력임피던스이다. Membrane 으로 인해 4개의 불효공진이 발생하는데 이



(a)



(b)

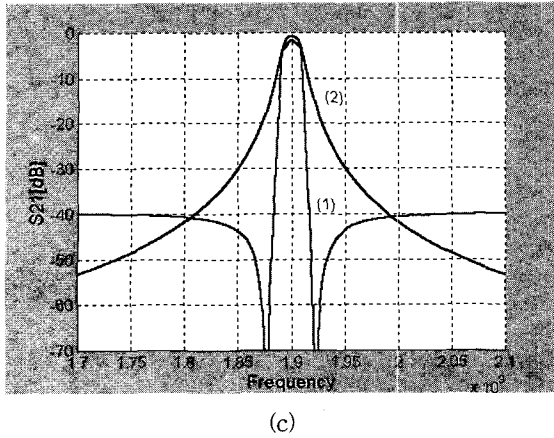


그림 11. (a) SMR 형 2단 SCF와 이상적인 FBAR 형 SCF의 S21 특성비교

(1) 3층 SMR 형 SCF (2) 5층 SMR 형 SCF (3) 7층 SMR 형 SCF (4) 이상적인 FBAR 형 SCF (b) Membrane 형 2단 SCF의 S21특성 (c) SMR 구조의 2/2 ladder 필터와 2단 SCF의 S21특성 비교 (1) 2/2 SMR 형 ladder 필터 (2) 2단 SMR 형 SCF

Fig. 11. (a) S21 of Cascade SMR type SCF and ideal FBAR type.

(1) SMR with three reflector layers type SCF (2) SMR with five reflector layers type SCF (3) SMR with seven reflector layers type SCF (4) ideal FBAR type SCF (b) S21 of Cascade membrane type SCF (c) S21 of 2/2 SMR type ladder filter and Cascade SMR type SCF (1) 2/2 SMR type ladder filter (2) cascade SMR type SCF

는 2개의 압전층과 1의 membrane 층의 두께로 인해 대략 기본공진주파수의 1/3, 2/3, 4/3, 5/3 에서 불효공진이 발생한다.

그림 11(a)는 이상적인 FBAR 형 SCF 와 5층의 SMR 형 SCF의 S21특성을 비교한 결과이다. 이상적인 FBAR 형 SCF 의 대역폭은 20.2 MHz, 5층 SMR 형 SCF 의 대역폭은 17.9MHz 이다. 이상적인 FBAR 형 SCF 가 SMR 형 SCF 보다 대역폭이 큰데 이는 K_{eff} 차이 때문이다. 이는 그림 7(b)에서 확인하였다. 그리고 반사층수의 변화에 따라서 대역폭은 거의 일정한데 이는 K_{eff} 가 반사층수에 따라서 거의 일정하기 때문이다. SMR 형 SCF 의 삽입손실의 반사층수에 따라 차이는 3층에서는 2.3dB 이고 5층에서는 0.72dB, 7층에서는 0.7dB 이라는 것을 확인할 수 있다. 이상적인 FBAR 형 SCF 의 S21 특성은 그림 10(a)에서 살펴본

바와 같이 유효공진 이외에 불효공진으로 인해 기본공진 주파수의 1/2, 3/2 배의 주파수에서 낮은 삽입손실의 대역폭이 발생하게 된다. 그러나 5층 이상의 SMR 형 SCF 의 불효 모드 필터 특성은 대역폭의 삽입손실이 40dB 이상으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 11(b) 는 membrane 형 SCF의 S21 특성이다. 그림 10(c)에서 알 수 있듯이 불효공진으로 인한 불효응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 기본 유효공진의 대역폭은 16.6MHz 로 ladder 필터의 경우와 마찬가지로 SMR 형 SCF 보다 작은 대역폭을 갖는다. 그림 11(c)는 SMR 구조의 2/2 Ladder 필터와 2단 SCF 의 S21특성을 비교한 것이다. 각각 5층의 반사층을 갖는 구조이고 1.9GHz 의 중심주파수를 갖는다. Ladder 필터 형식은 보다 우수한 대역폭의 skirt-selectivity 특성을 나타내었으며 SCF 는 삽입손실 측면에서 더 우수함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 등가회로를 이용하여 membrane 형의 FBAR 와 브래그 반사층 구조를 갖는 FBAR 의 특성을 상 하부 전극이 공기와 접하는 이상적인 공진기와 서로 비교함으로써 membrane 과 브래그 반사층이 공진특성에 미치는 영향을 분석하였다. 두께변화에 따른 공진주파수의 변화는 민감도를 분석하여 알아보았다. 전극의 경우 -0.0523의 민감도를 갖고 반사층의 경우는 -0.162(1층), -0.02(2층), -0.003(3층), -0.00035(4층), 0(5층)와 membrane 층의 민감도는 -0.245 라는 결과에서 membrane 층과 반사층 중 하부전극 바로 아래의 반사층의 두께 조절이 가장 중요하다는 결론을 얻었다. SMR 구조에서는 존재하지 않는 불효 공진특성이 membrane 구조에서 나타나는데 이는 membrane 층으로 인해 공진과장의 길이가 두 배가되기 때문이다. FBAR 의 전기적 Q 는 압전층의 기계적 Q 값뿐만 아니라 반사층과 membrane 층의 기계적 Q 값에도 영향을 미치며 SMR 의 경우 반사층수에 따른 변화는 5층부터 증감이 둔화되다가 7층에서 saturation 되는 것을 알 수 있었다. FBAR 구조에 따른 K_{eff} 의 변화는 이상적인 FBAR 보다 SMR 과 membrane 구조의 FBAR 가 작는데 이는 반사층이나 membrane 층에 정재파가 존재하기 때문이다. 또한 membrane 구조가 SMR 보다

K_{eff} 가 약간 작는데 이는 반사층 보다는 membrane 층에 더 많은 정재파가 존재하기 때문이다. Ladder 필터와 SCF 모두 반사층수가 증가할수록 삽입손실은 감소하지만 대역폭에는 거의 변화가 없음을 확인하였다. membrane 형의 ladder 필터와 SCF 는 불효 공진특성으로 인한 불효응답특성이 나타났는데 이는 ladder 필터의 경우는 membrane 으로 인해 공진모드가 증가하였기 때문이고 SCF 의 경우는 출력측 압전층과 membrane 으로 인해 공진모드가 증가하였기 때문이다. membrane 형의 Ladder 필터의 경우 하나의 유효응답에 2개의 불효응답이 발생하였고 SCF 의 경우 하나의 유효응답에 4개의 불효응답이 나타났다. 또한 membrane 형 필터가 SMR 형 필터보다는 대역폭이 더 작다는 결과를 확인하였다. 동일한 조건에서 ladder 필터와 SCF 를 비교한 결과에서는 ladder 필터는 보다 우수한 대역폭의 skirt-selectivity 특성을 나타내었으며 SCF 는 대역폭의 삽입손실 측면에서 더 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K.M. Lakin "Thin Film Resonator Filters" IEEE Ultrasonics Symposium, pp 895~906, 1999.
- [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] 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.
- [5] K. M. Lakin, G. R. Kline, and K. T. McCarron. "High-Q Microwave Acoustic Resonators and Filters" IEEE Trans. on. Microwaves Theory and Techniques, 41(12):2139~2146, December 1993.
- [6] B. A. Auld Acoustic Fields and Waves in Solids: Volume I, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 2 edition, 1990 pp. 89~91.
- [7] J. F. Rosenbaum. "Bulk Acoustic Wave Theory and Devices" Artech House, Inc., Norwood, MA, 1988 pp. 213~218.
- [8] M. A. Dubois, P. Muralt, H. Matsumoto, V. Plessky. "Solidly Mounted Resonator Based on Alumimum Nitride Thin Film" IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 909~912, 1998.
- [9] K. M. Lakin, J. Rosenbaum, S. Horwitz, C. Vale and R. A. Moore "Film Bulk Wave Resonator Technology" IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 529~536, 1990.
- [10] K. M. Lakin. "Modeling of thin film resonators and filters" In IEEE MTT-S Digest, 1992, pp. 149~152.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] W. E. Newell, "Face-mounted Piezoelectric Resonator", in Proc. IEEE, Vol. 53, June 1965, pp. 575~581.
- [14] 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.
- [15] S. V. krishnaswamy, J. Fosenbaum, S. Horwitz, C. Vale and R. A. Moore "Film Bulk Acoustic Wave Resonator Technology" IEEE Ultrasoncis Symposium, pp. 529~536, 1990.

저 자 소 개

尹 英 燮(正會員) 第37卷 SD編 第6號 參照

1952년 9월 7일생. 1975년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업(B.S.). 1977년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(M.S.). 1988년 12월 U.S.C. 전자공학과 졸업(Ph.D). 1987년 3월~1988년 5월 Oklahoma State University 대우교수. 1988년 12월~1989년 5월 UCLA Device Research Lab. 연구원. 1989년 8월~1992년 2월 삼성전자 기흥반도체연구소 수석연구원. 1992년 3월~현재 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수. <주관심분야: ULSI DRAM을 위한 신물질 개발, 강유전성 박막, Pyroelectric 센서, SAW Device>

趙 紋 基(正會員)

1975년 4월 15일생. 1998년 2월 인하대학교 전자재료공학과 졸업(B.S.). 2000년 9월~현재 인하대학교 전자재료공학과 석사과정. <주관심분야: ZnO 박막, 박막형 체적탄성과 공진기>