

박막공진기에 대한 새로운 모델링 기법

A New Modeling Methodology of TFBAR

김 종 수 · 구 명 권* · 육 종 관

Jong-Soo Kim · Myeong-Gweon Gu* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 박막공진기에 대한 새로운 모델링 기법을 제안하고, 등가회로를 이루고 있는 각 수동소자들 값에 대한 정확한 공식을 소개하였다. 제안된 새로운 모델은 박막공진기의 물리적 수직 구조 특성을 잘 표현하고 있는 Mason 모델에 대해 유전체 손실을 표현할 수 있는 저항 성분을 추가한 뒤, 임피던스 특성을 기반으로 한 단순화 과정을 통해 유도되었다. 제안된 모델은 기존의 Modified Butterworth-Van Dyke(MBVD) 모델과 비슷한 형태로 표현되지만 최적화 변수가 3개에 불과하기 때문에 측정값에 대한 훨씬 정확하고 빠른 커브 피팅(curve fitting)을 수행할 수 있으며, 공진주파수나 반공진주파수와 같은 설계자의 의도를 반영할 수 있는 변수들로 구성되기 때문에 여파기나 전압제어 발진기 등을 설계하는데 있어서 편리하게 이용될 수 있다.

Abstract

In this paper, a new modeling methodology of thin film bulk acoustic resonator(TFBAR) is presented and the formulations of each lumped element in the model are also introduced. The new model is based upon the Mason model that is a reasonable model to explain the physical characteristics of unit TFBAR. After simplifying the modified Mason model with an additional dielectric loss term, the new model similar to Modified Butterworth- Van Dyke(MBVD) model is complete. The proposed model has three optimization variables which is half of the MBVD model. As a result, the curve fittings for the measured data are much faster and more accurate than any other conventional models. Moreover, it is very useful to design the bandpass filters or voltage controlled oscillators due to the design parameters, such as resonant and anti-resonant frequency, which can reflect the intentions of designer in the model.

Key words : TFBAR, Mason Model, MBVD Model

I. 서 론

1990년대 후반 이후 공정기술의 비약적인 발전으로 인하여 RF 회로의 소형화 및 집적화가 가능해지면서 이동통신용 단말기의 중요한 부품중 하나인 여파기 역시 점점 소형화되어가고 있다. 대부분의 낮은 GHz 대역에서 동작하고 있는 단말기에는 세라믹 공진기를 이용한 여파기나 Surface Acoustic Wave (SAW) 기술을 이용한 여파기가 사용되고 있는데,

이런 여파기들은 on-chip 시스템을 위한 소형화가 어렵고, 고(高)전력에 대해 불안정하며, 동작 주파수 영역이 한계가 있다는 단점을 가지고 있다^{[1],[2]}. 근래에 들어 이러한 문제점을 해결하기 위해 박막공진기(TFBAR)를 이용한 여파기가 대안으로 제시되었다. 이러한 박막공진 여파기는 실리콘 기판 위에 직접 제작이 가능하기 때문에 단말기 내부의 다른 능동소자들과의 집적화가 가능하여 on-chip 시스템으로 가는 해결책이 될 수 있다^{[2],[3]}.

연세대학교 전기전자공학과(Dep. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*(주)엠에스 솔루션(MEMS Solution Inc.)

· 논문 번호 : 20031120-165

· 수정완료일자 : 2004년 1월 2일

박막공진기를 이용하여 여파기를 제작하는 경우 단일 박막공진기에 대한 모델링을 통해 주어진 조건을 만족하는 여파기를 설계하게 된다. 박막공진기에 대한 정확하고 효과적인 모델링을 위해 수행된 다양한 연구들^{[4]~[7]} 중 그림 1에 나타난 Mason 모델은 박막공진기의 수직구조를 분석하기가 용이하여 가장 널리 알려진 모델이다. 그러나 다양한 물질 변수와 복잡한 구조로 이루어지기 때문에 컴퓨터 모의실험을 위한 구조로는 적합하지 않다.

박막공진기에 대한 보다 정확한 해석을 위해 FEM(Finite Element Method)이나 FDTD(Finite Difference Time Domain) 같은 3차원 EM 모의실험을 사용

한 방법도 시도되었다^[8]. 하지만 이러한 접근 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있는 반면 모델링을 위한 시간이 너무 많이 소비된다는 단점으로 인해 널리 사용되지 못하고 있다.

한편 그림 2에 보인 것과 같은 MBVD 모델은 6개의 수동소자들로 이루어지기 때문에 비교적 간단하게 구현할 수 있고, 박막공진기에 대한 모델링 결과도 우수하다. MBVD 모델의 수동소자 값을 구하기 위한 공식은 아래 식 (1)과 같다^[1].

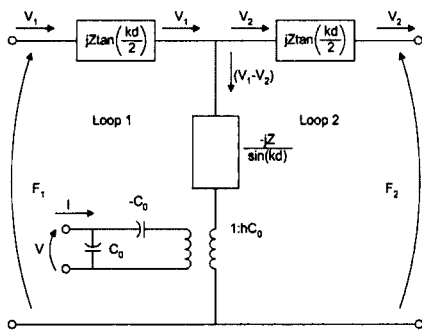
$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}, C_m = \frac{8}{\pi^2} k_t^2 C_0$$

$$R_m = \frac{\pi \eta \epsilon_r \epsilon_0}{8 k_t^2 \rho A \omega \nu_a}, L_m = \frac{\pi^3 \nu_a}{8 \epsilon_r \epsilon_0 A \omega^3 k_t^2} \quad (1)$$

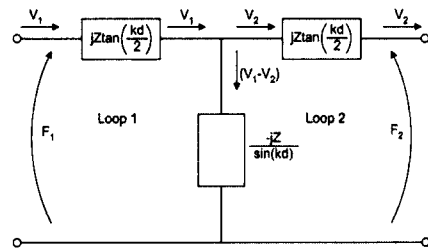
여기서, ϵ_r 은 압전물질의 유전율이고, ϵ_0 는 공기의 유전율, η 는 음향 점성도(acoustic viscosity), ρ 는 밀도, ν_a 는 음향 속도(acoustic velocity), ω_r 은 공진주파수, k_t^2 는 electromechanical 결합상수, d 는 압전물질의 두께, A 는 공진기 면적이다.

하지만 식 (1)에 주어진 수동소자 값에 대한 공식은 온도나 기압, sputtering 속도, DC 바이어스와 같은 공정 조건에 따라 값이 달라지는 압전물질에 대한 물질변수들만으로 구성되기 때문에 실제 제작된 박막공진기의 특성을 정확히 표현할 수가 없다. 따라서 MBVD 모델을 이용하여 제작된 박막공진기의 특성을 표현하기 위해서는 6개의 수동소자들에 대한 최적화(optimization) 과정이 필요하다.

상용 회로 시뮬레이터에서 제공하는 최적화 프로그램은 최적화 과정이 끝날 때마다 조금씩 다른 결과를 보인다. 또한 최적화 과정을 이용하여 수동소자 값을 구하면 설계자의 의도라고 할 수 있는 설계 변수가 전혀 반영되지 않기 때문에 원하는 결과를 얻기 위한 적절한 박막공진기를 설계할 수 없게 된다. 본 논문에서는 이러한 기존모델들의 단점을 극복하고자 박막공진기에 대한 새로운 모델링 기법을 제시하였다. 제안된 모델은 설계 변수를 이용하여 수동소자 값을 계산하게 되며 MBVD 모델의 절반에 불과한 3개의 최적화 변수로 구성되기 때문에 최적화 과정에 의해 조금씩 달라지는 경향을 줄일 수 있다. 또한 3개 변수에 대해서만 최적화 과정을 수행하기 때문에 기존의 MBVD 모델에 비해 빠른 시간



(a) 압전물질에 대한 등가회로
(a) Equivalent circuit of piezoelectric material



(b) 비압전물질에 대한 등가회로
(b) Equivalent circuit of non-piezoelectric material

그림 1. Mason 등가회로
Fig. 1. Mason equivalent circuit.

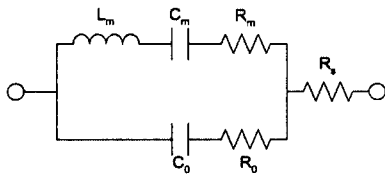


그림 2. MBVD 등가회로
Fig. 2. MBVD equivalent circuit.

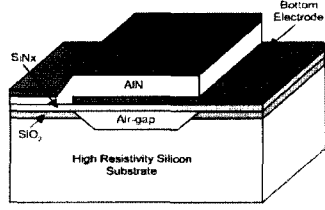


그림 3. 제작된 박막공진기 구조
Fig. 3. Geometry of fabricated unit TFBAR.

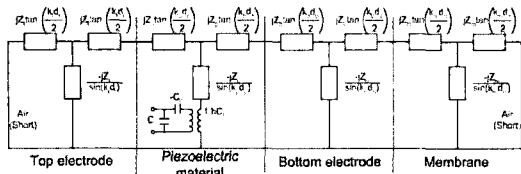


그림 4. 기존의 Mason 모델
Fig. 4. Conventional Mason model.

안에 측정값을 기본으로 하는 최적값을 유도할 수 있다.

II. Mason 모델의 구현

본 논문에서는 기관의 로딩효과에 의한 오버모드 현상을 제거하기 위하여 그림 3에 보인 것처럼 1 μm 의 공기층을 멤브레인과 유전체 기관 사이에 위치시켰다. 압전물질로는 AlN를 사용하였고, 두 개의 전극은 백금(Pt)으로 제작되었다. 공기층과 기관의 영향으로 인하여 음향파(acoustic wave)의 전파범위는 상위 전극으로부터 멤브레인까지로 한정시킬 수 있다. 따라서 그림 1의 등가모델들을 이용하여 그림 4와 같이 제작된 박막공진기에 대한 Mason 모델을 완성할 수 있다. 그러나 이 모델은 최적화 과정의 반복 횟수를 증가시켜도 그림 5에 보인 것과 같이 공진주파수 근처에서 발생하는 차이를 줄일 수 없다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 그림 6에 주어진 것처럼 기존의 Mason 모델에 유전체 손실을 의미하는 저항 R_0 를 추가하였다. 여기서 저항 R_0 는 압전물질이 가지고 있는 유전체 손실이므로 $R_0 = d/(\sigma A)$ 로 표현될 수 있고 여기서 d 는 압전물질의 두께, σ 는 압전물질의 도전율(conductivity), 그리고 A 는 공진기 면적이다. 개선된 Mason 모델은 여러 가지 물질 변수들에 대한 최적화 과정을 수행해야 하기 때문에 많은 시간이 걸리기는 하지만 그림 7에 보인 것처럼 측정

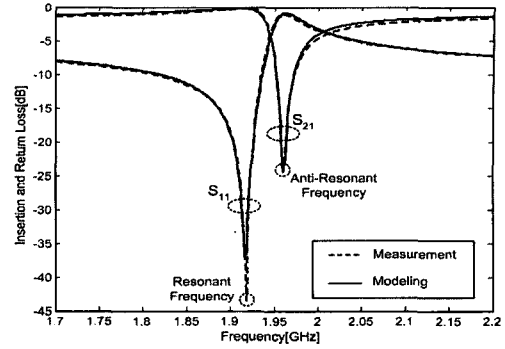


그림 5. 기존 Mason 모델을 이용한 모델링 결과
Fig. 5. Modeling result using the conventional Mason model.

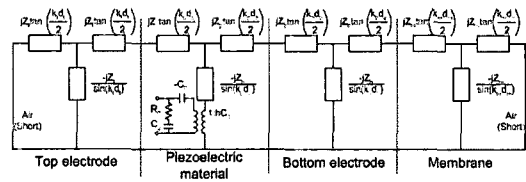


그림 6. 개선된 Mason 모델
Fig. 6. Modified Mason model.

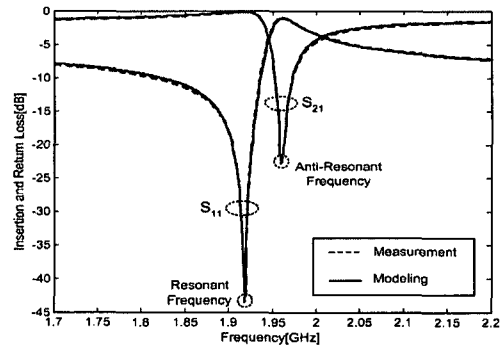


그림 7. 개선된 Mason 모델을 이용한 모델링 결과
Fig. 7. Modeling result using the modified Mason model.

값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

III. Mason 모델의 간략화

그림 1(b)에 보인 비압전물질에 대한 Mason 등가회로의 ABCD 파라미터를 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kd) & jZ \sin(kd) \\ jY \sin(kd) & \cos(kd) \end{pmatrix} \quad (2)$$

이 결과는 특성임피던스가 Z 이고, 전파상수가 k 이

며 길이가 d 인 전송선로의 $ABCD$ 파라미터와 정확하게 같은 형태이다. 이러한 사실을 이용하여 본 논문에서 제작된 박막공진기의 비압전물질인 백금과 멤브레인은 임의의 전송선로 모델로 대치시킬 수가 있고, 아래의 식 (3)을 통하여 입력임피던스를 구할 수가 있다.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(kd)}{Z_0 + jZ_L \tan(kd)} \quad (3)$$

그림 6에 보인 개선된 Mason 모델에서 압전물질의 입장에서 바라본 좌, 우의 입력임피던스를 각각 Z_L, Z_R 이라고 하면

$$Z_L = jZ_t \tan(k_t d_t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Z_R &= Z_b \frac{(jZ_m \tan(k_m d_m)) + jZ_b \tan(k_b d_b)}{Z_b + j(jZ_m \tan(k_m d_m)) \tan(k_b d_b)} \\ &= jZ_b \frac{Z_b \tan(k_b d_b) + Z_m \tan(k_m d_m)}{Z_b - Z_m \tan(k_b d_b) \tan(k_m d_m)} \end{aligned} \quad (5)$$

이고, 여기서 t, b, m 의 아래첨자는 각각 상위전극(top electrode), 하위전극(bottom electrode), 멤브레인(membrane)을 가리키며 각 층의 특성임피던스는

$$Z_{t,b,m} = A \sqrt{\rho_{t,b,m} c_{t,b,m}} \quad (6)$$

로써, ρ 는 밀도, c 는 경직상수, A 는 면적을 의미한다. 이런 방식으로 그림 8에 주어진 것처럼 압전물질 내부의 변압기 전단에서의 입력 임피던스를 구하면

$$Z_M = n^2 Z_p \frac{(1 + z_t z_r) \sin(kd) - j(z_t + z_r) \cos(kd)}{(z_t + z_r) \sin(kd) + j4 \sin^2(kd/2)} \quad (7)$$

이고, 여기서 Z_M 은 총 기계적 임피던스, z_t 과 z_r 은 압전물질 좌, 우의 모든 기계적 임피던스를 압전물질의 임피던스로 정규화 한 것이며, $n^2 = 1/(h^2 C_0^2)$ 로써 h 는 변환상수를 의미한다. 식 (7)의 총 기계적 임피던스 Z_M 을 이용하여 그림 6의 개선된 Mason 모델을 단순화시키면 그림 9와 같은 형태의 간단한 회로로 표현할 수 있다.

그림 10은 총 기계적 임피던스 Z_M 만을 S-파라미터 모의실험한 결과와 Z_M 에 $-C_0$ 가 직렬로 연결된 회로를 모의실험한 결과를 비교한 것이다. Z_M 만을 모의실험하면 공진점에서 S_{21} 이 거의 0 dB에 가깝기 때문에 L 과 C 가 직렬로 연결된 공진기와 같은 특성

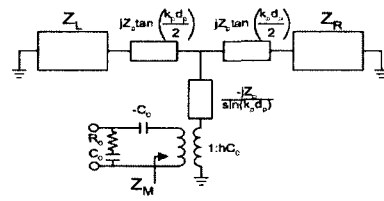


그림 8. 총 기계적 임피던스를 구하기 위한 회로도
Fig. 8. Schematic for calculating the total mechanical impedance.

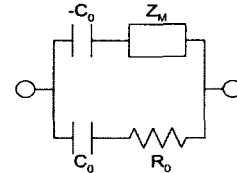


그림 9. 개선된 Mason 모델의 단순화된 회로도(I)
Fig. 9. Simplified schematic of modified Mason model(I).

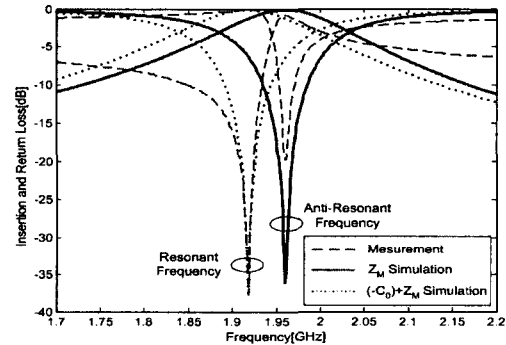


그림 10. Z_M 과 $-(C_0)+Z_M$ 의 S 파라미터 모의실험 결과
Fig. 10. S-parameter simulation results of Z_M and $-(C_0)+Z_M$.

을 가진다고 볼 수 있으며, 그 공진점은 제작된 박막공진기의 반공진주파수와 정확하게 일치한다. Z_M 에 $-C_0$ 가 직렬로 연결된 회로는 비슷한 특성을 유지하며 공진점이 박막공진기의 공진 주파수쪽으로 이동하게 된다. 이런 사실들을 바탕으로 Z_M 이 기계적 인덕턴스 L_m 과 기계적 캐패시턴스 C_m 의 직렬연결로 표현될 수 있다는 가정을 하고, $-C_0$ 가 직렬로 연결되었을 때의 공진점 이동현상을 이용하여 다음과 같이 공진주파수와 반공진주파수의 함수로써 L_m 과 C_m 에 대한 공식을 유도하였다.

$$L_m = \frac{1}{C_0(\omega_a^2 - \omega_r^2)}, \quad C_m = C_0 \left(1 - \frac{\omega_r^2}{\omega_a^2} \right) \quad (8)$$

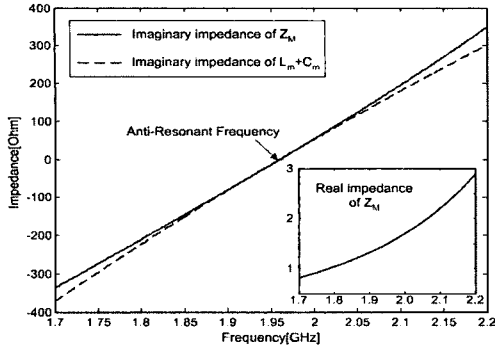


그림 11. Z_M 의 임피던스 모의실험 결과
Fig. 11. Impedance simulation result of Z_M .

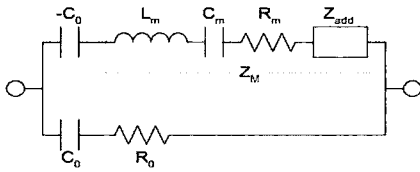


그림 12. 개선된 Mason 모델의 단순화된 회로도(II)
Fig. 12. Simplified schematic of modified Mason model(II).

여기서 $C_0 = (\epsilon_r \epsilon_0 A) / d$ 로써 두 전극 사이의 정적 캐패시턴스 (static capacitance)이다.

L_m 과 C_m 의 직렬연결이 Z_M 의 공진주파수 및 반공진주파수 특성을 잘 표현하기는 하지만 Z_M 이 가지고 있는 모든 특성을 표현할 수는 없기 때문에 임피던스 모의실험을 추가적으로 수행하였다. 그림 11은 Z_M 의 허수부 임피던스와 L_m, C_m 직렬연결의 허수부 임피던스를 겹쳐서 그린 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 제작된 박막공진기의 반공진주파수에서 멀어질수록 두 모의실험 결과의 차이가 커지게 된다. 이를 통해 L_m, C_m 이외의 또 다른 허수부 임피던스 성분이 필요함을 알 수 있으며, 모의실험 결과를 토대로 하여 다음과 같은 관계를 만들어 낼 수 있다.

$$Z_{add} = jz_w \sqrt{(\omega_r - \omega)^2 (\omega_a - \omega)^2} \quad (9)$$

여기서 Z_{add} 는 추가된 허수부 임피던스 성분이고, z_w 는 적절한 가중치로써 최적화 과정을 통해 구해내게 된다. 또한 그림 10의 작은 창에서 볼 수 있듯이 총 기계적 임피던스 Z_M 은 실수부 임피던스 성분도 가지고 있기 때문에 기계적 저항 R_m 을 가정할 수 있는 허수부 임피던스에 비해 현저하게 작은 값을

가지므로 그 자체를 최적화 변수로 둔다. 이상의 결론을 토대로 그림 9를 그림 12와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

IV. 새로운 모델

그림 12에서 부성 저항 $-C_0$ 와 C_m 의 직렬연결을 합하여 하나의 캐패시터로 표현하면 그림 13과 같이 본 논문에서 제안하는 새로운 모델이 완성된다. 제안된 모델의 수동소자 값들을 정리하면 다음과 같다.

$$C_1 = (-C_0 // C_m) = C_0 \left(\frac{\omega_a^2}{\omega_r^2} - 1 \right)$$

$$L_1 = L_m = \frac{1}{C_0 (\omega_a^2 - \omega_r^2)}$$

$$Z_{add} = jz_w \sqrt{(\omega_r - \omega)^2 (\omega_a - \omega)^2}$$

$$R_1 = R_m, C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}, R_0 = \frac{d}{\sigma A} \quad (10)$$

여기서 z_w, σ, R_0 은 상용 틀에서 제공하는 최적화 알고리즘을 이용하여 구해야 하는 최적화 변수이다. 본 논문에서 제작된 박막공진기의 면적은 $12000 \mu\text{m}^2$ 이고, 압전물질의 두께는 $0.8 \mu\text{m}$, 공진주파수는 1.914 GHz , 반공진주파수는 1.956 GHz 이다. 이런 설

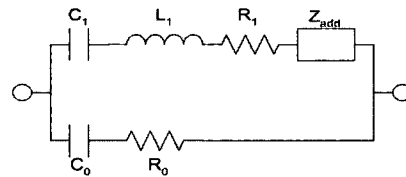


그림 13. 제안된 모델
Fig. 13. Proposed model.

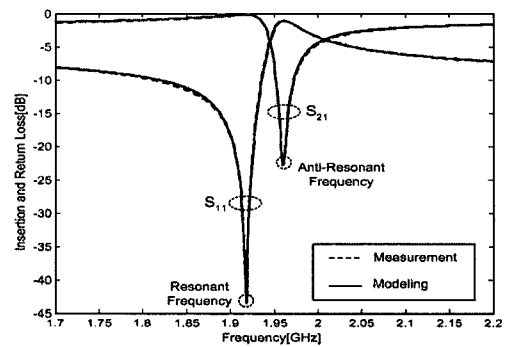


그림 14. 제안된 모델을 이용한 모델링 결과
Fig. 14. Modeling result using the proposed model.

계 변수들과 최적화 변수들을 이용하여 실제 제작된 박막공진기의 측정값에 모델링을 수행하면 그림 14와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정된 결과와 매우 잘 일치하는 특성을 얻을 수 있으며, 모델링 시간 또한 단축시킬 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 박막공진기의 새로운 모델링 기법을 제안하고, 제안된 모델을 이루고 있는 각 수동소자들의 값을 소개하였다. 제작된 박막공진기는 air-gap 형태로서 압전물질로는 AlN가 사용되었으며, 두개의 전극은 백금(Pt)으로 제작되었다. 제안된 모델은 기존의 Mason 모델보다 훨씬 간단한 형태로 표현되며, MBVD 모델의 절반에 불과한 최적화 변수로 구현되기 때문에 더욱 정확하고 빠른 시간에 주어진 측정값에 대한 커브 피팅을 완성할 수 있다. 또한 설계자의 의도를 반영할 수 있는 설계 변수들로 구성되기 때문에 박막공진기를 이용한 다른 소자들에 대한 설계를 용이하게 수행할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Rosenbaum, *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*, Artech House, Norwood, 1998.
 [2] R. S. Naik, J. J. Lutsky, R. Rief and C. G. Sodini, "Electromechanical materials using a bulk acoustic wave resonator", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 45, no. 1, pp. 257-263, Jan. 1998.

[3] K. W. Kim, J. G. Yook, M. G. Gu, W. Y. Song, Y. J. Yoon and H. K. Park, "TFBAR filters for 2 GHz wireless applications", *2002 IEEE MTT-S Digest*, vol. 2, pp. 1181-1184, 2002.
 [4] J. D. Larson III, P. D. Bradley, S. Wartenberg and R. C Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system," *2000 IEEE Ultrasonics Symposium Digest*, vol. 1, pp. 863-868, 2000.
 [5] K. M. Lakin, "Modeling of Thin Film Resonators and Filters," *1992 IEEE MTT-S Digest*, vol. 1, pp. 149-152, 1992.
 [6] S. A. Morris, C. G. Hutchens, "Implementation of Mason's Model on Circuit Analysis Program," *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 33, no. 3, pp. 295-298, May 1986.
 [7] W. M. Leach, "Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers," *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 41, no. 1, pp. 60-66, Jan. 1994.
 [8] R. Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two and three dimensional finite element", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.*, vol. 37, pp. 233-247, May 1990.
 [9] K. W. Kim, J. G. Yook and H. K. Park, "CAD Model Analysis of the Air-gap Type TFBAR", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 384-385, Sep. 2002.

김 종 수



2002년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2002년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 박막공진기 및 초고주파 회로설계

구 명 권



1986년 2월: 한양대학교 재료공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 금속공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 박막공진기

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학
과 (공학사)

1989년 2월: 연세대학교 전자공학
과 (공학석사)

1996년 2월: University of Michigan
(공학박사)

2000년 2월~현재: 연세대학교 전

기전자공학과 부교수

[주 관심분야] FDTD, MMIC, RF MEMS