

SOI 웨이퍼를 이용한 압전박막공진기 제작

Monolithic Film Bulk Acoustic Wave Resonator using SOI Wafer

김인태^{*,}, 박윤권[,], 이시형[,], 이윤희^{*,}, 이진국[,], 김남수^{*,}, 주병권[,]
(In-Tae Kim^{*,}, Yun-Kwon Park[,], Si-Hyung Lee[,], Yun-Hi Lee^{*,}, Jeon-Kook Lee[,]
Nam-Soo Kim^{*,}, and Byeong-Kwon Ju[,])

Abstract

Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) using thin piezoelectric films can be made as monolithic integrated devices with compatibility to semiconductor process, leading to small size, low cost and high Q RF circuit elements with wide applications in communications area. This paper presents an MMIC compatible suspended FBAR using SOI micromachining. It is possible to make a single crystal silicon membrane using a SOI wafer. In fabricating active devices, SOI wafer offers advantage which removes the substrate loss. FBAR was made on the 12 μ m silicon membrane. Electrode and piezoelectric materials were deposited by RF magnetron sputter. The maximum resonance frequency of FBAR was shown at 2.5GHz range. The reflection loss, K_{eff}^2 , Q_{series} and $Q_{parallel}$ in that frequency were 1.5dB, 2.29%, 220 and 160, respectively.

Key Words : FBAR, Piezoelectric, SOI, MMIC, Membrane

1. 서론

최근 높은 주파수에서 동작하는 새로운 시스템의 개발로 인해 신호를 선택적으로 전달하는 밴드패스 필터의 수요가 늘어나고 있다. 특히 필터는 무선 통신시스템 중 필수적인 것 중 하나로서, 크기의 소형화가 절실히 요구되고 있다. 현재까지 유전체 공진기를 이용한 필터나 표면탄성과 필터(SAW filter)가 많이 사용되어 왔으나 동작 주파수가 높아짐에 따라 저전력, 저 삽입 손실을 구현하기 어려워며 MMIC화에도 적당하지 않다. 본 논문에서는 이러한 문제의 대안으로 떠오르고 있는 압전

박막 공진기(FBAR)를 제작하였다. 압전 박막 공진기는 ZnO, AlN과 같은 압전 물질의 음향 공진 현상을 이용한 공진기로서, 압전 물질 내에서의 음향 전파속도가 전자파 속도에 비해 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 배 정도로 낮아 같은 주파수에서 음파의 파장이 훨씬 짧아져서 소형의 음향 공진기를 만들 수 있다[1]. 필터에 적용 할 경우 기존의 유전체 필터의 좋은 특성을 유지하면서 크기는 100배 이상 줄일 수 있으며 Surface Acoustic Wave(SAW)필터 보다 크기가 작고 삽입 손실이 작으며 MMIC화가 가능한 필터를 구현 할 수 있다[2]. 이상적인 FBAR는 압전체 약단에 저계통 가하여 탄성파를 박생시키고 이 탄성파는 압전층과 외부와의 탄성 임피던스 차에 의해 압전층 사이에 갇히게 되어 정재파를 형성한다. 이렇게 만들어진 정재파가 공진 현상으로 나타나게 된다[3]. 제작 방법에는 하부전극 아래에 브래그 반사층을 형성하는 방법과 공기 층을 만드는 방법으로 나눌 수 있다. 브래그 반사 층이나 공기 층은 모두 압전체와 외부의 탄성 임피던스 차

* : 한국과학기술연구원 마이크로시스템
(서울특별시 성북구 하월곡동 39-1,
Fax:02-958-5692
E mail:kimit@kist.re.kr)
** : 충북대학교 반도체공학과
*** : 고려대학교 물리학과
2002년 5월 17일 접수, 2002년 7월 16일 1차 심사완료,
2002년 9월 12일 최종 심사완료

를 크게 하여 전반사가 일어나게 하기 위한 것이다. 브래그 반사 층의 경우, 탄성 임피던스 차가 큰 물질을 번갈아 가며 증착 하여야 한다는 공정의 복잡성과 각 박막의 정확한 두께 조절을 하여야 한다는 문제점을 갖고 있다[4]. 현재 많은 연구가 진행되는 실리콘 뒷면 식각을 통해 공기 층을 만드는 방법은 하부전극 아래의 실리콘 기판을 전부 식각하는 방법이다. 이때 실리콘의 결정성에 의해 식각면이 경사를 갖기 때문에 전체 소자가 차지하는 면적이 증가하는 점과, 식각 시 소자를 보호해야 한다는 단점이 있다[5]. 본 논문에서는 위에서 제시한 문제점들을 해결하고, 보다 간단한 공정을 이룰 수 있는 SOI 웨이퍼를 이용한 단결정 실리콘 멤브레인을 형성한 후 그 위에 FBAR를 제작하는 방법을 제시하였다. 또한 제안된 구조는 MATLAB으로 시뮬레이션 하여 설계한 후 제작하였다. 제작된 멤브레인은 12 μm의 단결정 실리콘 구조로서 일반적으로 사용되는 증착에 의한 멤브레인보다 안정된 구조를 갖게 되며 고주파 회로에 적용될 때 다른 능동소자의 기판으로의 누설 전류를 감소시키는 장점도 갖게 된다[6].

2. 설 계

MATLAB을 이용하여 FBAR의 압전체 두께와 면적에 의한 공진 주파수 및 임피던스 특성을 확인하고, 2.4GHz 대역에서 공진이 일어나는 최적의 두께 및 면적 조건을 확인하였다. 그림 1은 FBAR 제작을 위한 구조의 단면도를 보여주고 있다.

제작은 상부 실리콘 기판이 12 μm인 SOI 웨이퍼를 사용하였으며 하부 전극으로는 전기적 전도성이 우수하며 압전체 증착이 잘 이루어지는 Au를

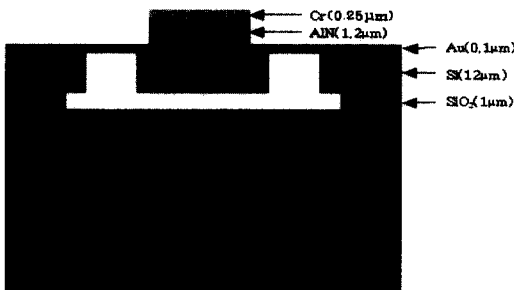


그림 1. 제안된 FBAR의 단면도.
Fig. 1. Structure of proposed FBAR.

사용하였다. 압전 물질로는 AlN를 이용하였고 상부전극으로는 Cr을 사용하였다. AlN의 최적 공진 특성을 파악하기 위한 시뮬레이션을 간편하고 빠르게 하기 위하여 FBAR의 임피던스 식을 이용하여 1차원적으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시 변수로는 전극의 물질 및 두께, 압전체 두께 그리고 실리콘 멤브레인의 두께를 사용하였다. 식 1은 시뮬레이션에 사용된 FBAR의 임피던스 수식이다 [5].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - \frac{K^2}{1 + K^2} \frac{\tan kh}{kh} \frac{(z_{top} - z_{bot}) \cos^2(kh) + j \sin(2kh)}{(z_{top} - z_{bot}) \cos(2kh) + j(1 - z_{top} z_{bot}) \sin(2kh)} \right]$$

$$K^2 = \frac{e^2}{c^E \epsilon^S}, \quad k = \omega \sqrt{\frac{\rho_m}{c^D}}, \quad c^D = c + j\omega\eta$$

$$C_0 = \frac{\epsilon^S A}{h} \quad (1)$$

여기서 z_{top} 와 z_{bot} 는 각각 상부전극과 하부전극에서의 input acoustic impedance이다. K 는 압전 물질의 전기기계결합상수(electromechanical coupling constant)이며 C_0 는 electrical capacitance, k 는 complex wave vector, η 는 viscosity, h 는 압전 박막의 두께, A 는 공진기의 면적이다. e 는 piezoelectric constant, c^E 는 electric field가 일정할 때의 stiffness, ϵ^S 는 strain이 일정할 때의 dielectric constant, c^D 는 piezoelectrically stiffened constant이다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 물질 상수.

Table 1. Acoustic parameters of bulk material.

| | Stiffness | Dielectric constant | Stress | Density | Viscosity |
|-----|-----------|---------------------|--------|---------|-----------|
| AlN | 395e9 | 9.5e-11 | 1.55 | 3260 | 0 |
| Si | 165e9 | | | 2332 | 0.0089 |
| Au | 120e9 | | | 19320 | 0.586 |
| Cr | 252e9 | | | 7140 | 0 |

여기서 압전 물질의 phase velocity v_p 는 wave vector(k)와 각주파수(ω)의 함수로 다음과 같은 관계를 보인다[4]. $V_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{c^D}{\rho_m}}$ 이 때 사용

된 각 박막의 물성 값은 표 1에 나타내었다.

먼저 멤브레인이 없는 이상적인 공진기의 특성을 확인하기 위해 전극과 압전체로만 구성된 공진기에 대해 시뮬레이션 하였다.

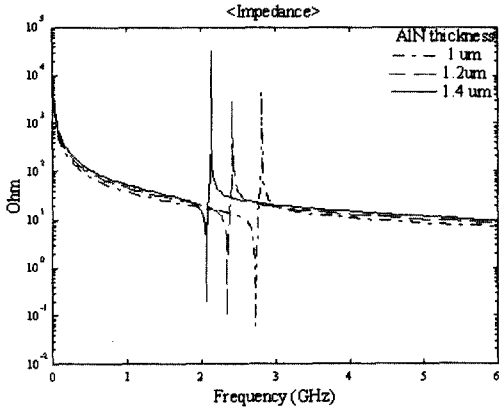


그림 2. 압전체 두께에 따른 공진 주파수 곡선.
Fig. 2. Resonance frequency versus thickness of AlN.

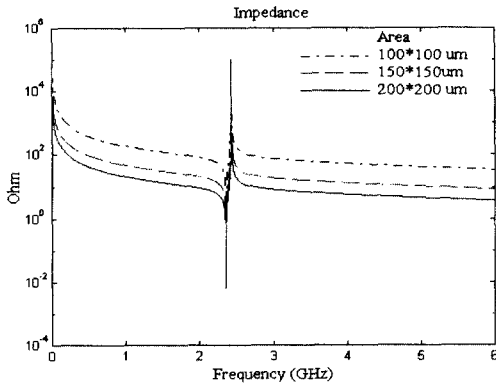


그림 3. 공진기 면적에 따른 임피던스 특성.
Fig. 3. Impedance characteristics versus area of FBAR.

그림 2는 압전체 두께에 따른 공진 주파수 관계를 나타내며 그림3은 공진기 면적에 따른 임피던스 특성을 나타낸다. 수식에서 예측된 바와 같이, 그림 2와 3은 압전체 두께는 공진 주파수와 반비례 관계를 보여 주고 압전체 면적은 공진 주파수와는 무관하며 임피던스 값에만 영향을 주는 것을 확인하였다. 그림 4는 본 논문에서 제시한 구조인 실리콘 12 μm 멤브레인이 삽입된 경우 FBAR

의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이 2.4 GHz대역에서 발생한 공진은 시리즈 공진 주파수와 패러럴 공진 주파수가 2.4735GHz, 2.4909GHz이고 두 공진 주파수 간격은17.4MHz로서 주변에 발생한 하모닉 성분에 의한 공진 주파수 간격보다 큰 것을 알 수 있다.

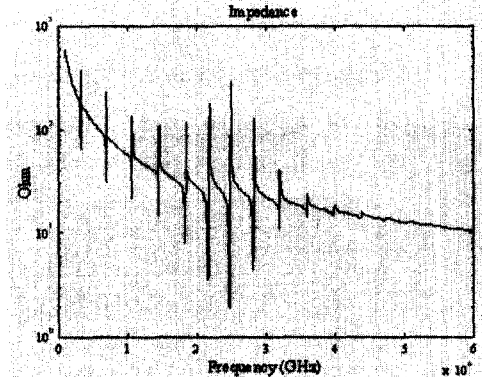


그림 4. 실리콘 멤브레인이 삽입된 경우 임피던스 곡선.
Fig. 4. Simulated impedance curve of the FBAR on 12 μm silicon membrane.

시리즈 공진과 패러럴 공진 주파수의 간격은 압전 계수와 비례하며 압전 계수가 가장 큰 곳을 압전체 두께에 의한 기본 공진 모드로 볼 수 있다 [3]. 여기서 시리즈 공진일 때 임피던스는 1에 가깝고 패러럴 공진일 때 임피던스는 300 정도가 나왔다. 또한 3GHz 이후로는 공진 현상이 급격히 줄어들어 특성을 보여 주고 있다. 이 때 FBAR의 구조는 하부전극(Au)=1000 Å, 압전체(AIN)=1.2 μm , 상부전극(Cr)=0.25 μm , 면적=200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 실리콘 멤브레인 12 μm 이다.

3. 제작 및 측정

3.1 제작

1-port형 FBAR의 제작 공정은 그림 5와 같다. 멤브레인 형성은 SOI웨이퍼의 상부 실리콘에 식각창을 형성한 후 중간 산화막을 제거함으로써 만들 수 있다. 먼저 상부 실리콘에 식각 창 형성을 위해 열산화막을 2000Å 성장 시킨 후 식각 창 패턴을 형성한 후 상부 실리콘을 TMAH 용액을 사용하여

여 식각하였다. SOI 웨이퍼의 중간 산화막은 HF 용액을 이용하여 제거하였다. 이 때 산화막이 제거되면서 Air-gap 사이에 액체가 들어가게 되는데 이로 인해 멤브레인에 흡착이 발생하게 된다. 일반적으로 흡착 문제는 메탄올 린즈, 초임계 건조, 승화 건조 등으로 해결하며 최근에는 HF 가스를 이용한 방법도 이루어지고 있다. 여기서는 비교적 저렴하고 수율이 우수한 승화 건조법을 사용하였다[7].

1. Formation of the membrane



2. AlN and electrodes deposition



3. Top electrode and AlN etching

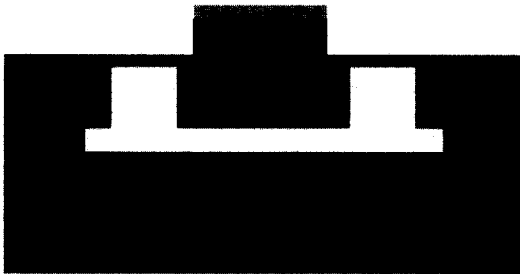


그림 5. FBAR의 제작 공정도.

Fig. 5. Process flow of the FBAR.

승화 건조법은 멤브레인의 Air-gap에 승화가 잘 이루어지는 물질을 채운 후 액체 상태를 거치지 않고 승화시키는 방법으로 액체의 응력을 제거하는 방법이다. 일반적으로 사용되는 승화 물질은 P-dichlorobenzene이다. 이 물질은 녹는점(56°C)이 낮고 상온에서도 승화가 잘 이루어진다. 그림 6은

승화 건조법으로 제작된 멤브레인 단면의 SEM 사진이다. SEM 사진에서 볼 수 있듯이 1 μm의 Air-gap을 가진 12 μm의 단결정 실리콘 멤브레인을 제작하였다. 제작된 실리콘 멤브레인 위에 하부전극(Au)의 adhesion layer로 Cr을 300Å 스퍼터링 방법으로 증착 한 후 하부전극으로 Au를 1000 Å 증착 하였다. AlN은 load lock 장치가 있는 스퍼터를 이용하여 base pressure를 2×10⁻⁷ torr까지 형성 후 Ar(16sccm)과 N₂(4sccm) 분위기에서 Al 타겟을 이용하여 증착하였다.

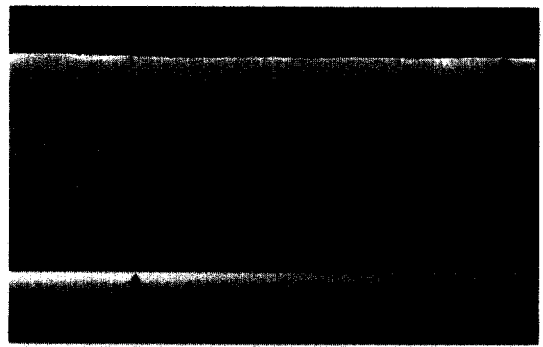


그림 6. 실리콘 멤브레인 단면도.

Fig. 6. Cross sectional view of the silicon membrane.

증착시 압력은 10mTorr, RF 파워는550W, 타겟과 기판의 거리는8cm를 유지하였다. 증착된 AlN의 압전 특성을 확인하기 위해 XRD 분석을 하였다. 그림7은 증착된 AlN의 XRD 자료이다. 그림에서 보듯이 36°에서 AlN의 (002), 38°에서 Au의 (111) 피크가 나온 것으로 보아 AlN의 C축 성장이 잘 되었음을 알 수 있다.

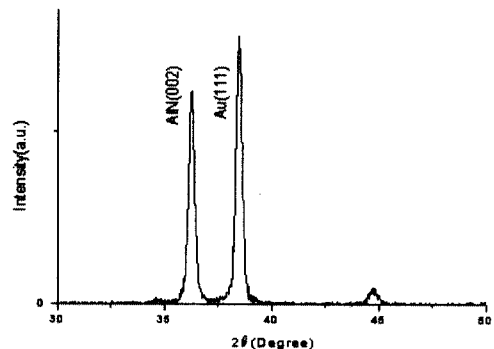


그림 7. AlN막의 XRD 측정 데이터.

Fig. 7. XRD analysis of deposited AlN.

다음으로 상부 전극인 Cr을 2500Å 증착 하였다. 마지막으로 상부전극과 AlN을 식각 함으로서 1-port 형 FBAR를 제작하였다. AlN의 식각 액으로는 1.8wt%의 TMAH용액을 사용하였다. 그림 8은 제작된 FBAR의 SEM 사진이다.

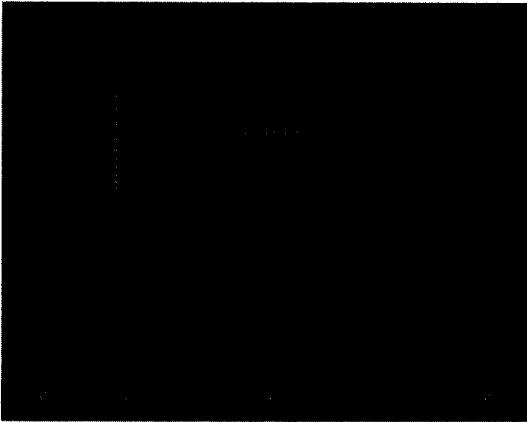


그림 8. 제작된 FBAR의 SEM 사진.
Fig. 8. SEM view of the fabricated FBAR.

3.2 측정

HP8753ES vector network analyzer를 사용하여 30KHz-6GHz까지 S₁₁과 입력 임피던스를 측정하였다. 그림 9는 측정된 S₁₁ 곡선을 나타내고 있다.

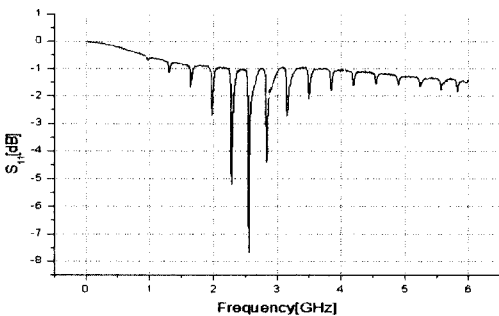


그림 9. 측정된 반사계수 곡선[30KHz-6GHz].
Fig. 9. Reflection coefficient of the FBAR.

측정 결과 2.5GHz대역에서 압전체 두께에 의한 기본 공진이 일어났고 약300MHz간격으로 실리콘 기판에 의한 하모닉 성분의 공진이 일어나는 것을 확인하였다. 필터로 구현 될 경우 최대 공진이 일어나는 주파수 대역만 이용하기 때문에 최대 공진이 일어나는 부분을 자세히 측정하였다. 그림 10은

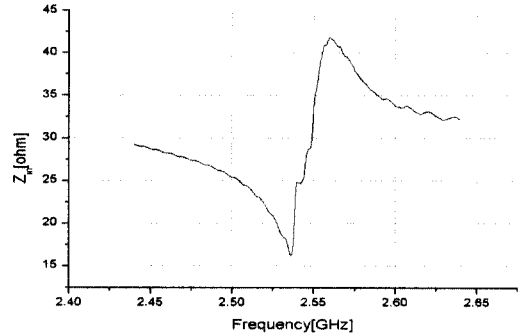


그림 10. 측정된 입력 임피던스[2.4GHz-2.6GHz].
Fig. 10. Input impedance of the FBAR.

2.44-2.64GHz대역에서 측정한 임피던스 곡선이다. 그림에서 임피던스가 가장 작은 점인 시리즈 공진 주파수(f_s)는 2.536GHz, 임피던스가 가장 큰 점인 패러럴 공진 주파수(f_p)는 2.560GHz임을 알 수 있다. 공진 주파수 간격(Δf)은 24MHz로 측정되었다. 공진 주파수를 식 2에 대입하여 K_{eff}^2 값을 계산한 결과 약 2.29%로 나타났다[5].

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

Q 값은 측정된 임피던스를 식3에 대입하여 구하였으며 시리즈 공진일 때는 220, 패러럴 공진시 는 160으로 계산되었다[5].

$$Q = \frac{f}{2} \frac{\partial Z}{\partial f} \quad (3)$$

4. 결론

FBAR에 대한 임피던스 식을 이용하여 2.4GHz대역에서 공진이 일어나는 조건을 확인하였다. 시뮬레이션은 각 물질의 물질 상수 값들을 고정시키고 각 박막의 두께와 면적을 변화시키면서 실행하였다. 시뮬레이션 결과 하부전극(Au)=1000 Å, 압전체체(AlN)=1.2 μm, 상부전극(Cr)=0.25 μm, 면적=200 μm × 200 μm, 실리콘 멤브레인 12 μm일 경우 2.4 GHz대역에서 시리즈 공진과 패러럴 공진 간격이

가장 큰 기본 공진이 일어나는 것을 확인하고 이를 바탕으로 실제 소자를 제작하였다. 제작된 소자의 공진 주파수는 2.5GHz대역에서 기본 공진이 일어났고 약300MHz간격으로 실리콘 기판에 의한 하모닉 성분의 공진이 일어나는 것을 확인 하였다. 시뮬레이션시 압전체 두께가 1.2 μm 일 때 2.4GHz대역에서 최대 공진이 일어날 것으로 예상되었으나 측정결과 2.5GHz대역에서 최대 공진이 생긴 이유는 압전체 두께가 1.2 μm 보다 작게 증착 됨으로서 주파수 이동이 생긴 것으로 사료된다. 압전체 증착시 두께 조절을 좀더 세밀히 할 경우 주파수 이동은 없을 것으로 사료된다. 임피던스 값에서의 오차는 시뮬레이션시 사용된 물질 상수 값이 실제로 제작된 박막의 물질 상수 값과의 오차에서 비롯된 것이라 생각된다. 특히 압전체의 감쇄 계수인 viscosity(η)를 0으로 놓고 시뮬레이션 했기 때문에 측정치와 오차가 크게 나타난 것으로 보인다. 또한 압전체의 압전 계수 값은 증착시 여러 가지 변수에 의해 크게 영향을 받게 되며 이상적인 값과 많은 오차를 보이는데 이에 대한 연구는 계속 진행중이다. 현재 실제 제작된 박막의 물질 상수 값을 측정하여 시뮬레이션에 적용하는 방법에 대한 연구도 진행 중이다. 그리고 고주파 회로에서 발생하는 실리콘 기판으로의 유전손실로 인해 전체적인 손실이 증가한 것으로 보인다[6]. 현재 산화막과 질화막을 이용한 멤브레인을 제작함으로써 실리콘 기판의 유전 손실을 줄이는 연구가 진행중이다. SOI웨이퍼를 이용하여 멤브레인을 제작함으로써 단결정 실리콘 멤브레인의 제작을 기존의 방법보다 쉽게 만들 수 있었다. 또한 현재 사용되는 반도체 공정을 이용하였기 때문에 MMIC화의 가능성을 보여 주었으며 SOI기판은 MMIC화 할 경우 능동소자의 기판 손실이 감소하여 더욱 큰 이점으로 작용할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대신기술 사업인 차세대 무선통신용 트랜시버 시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업인 지능형마이크로시스템개발사업(<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었음 ; 과제협약번호 MS-02-325-01

참고 문헌

- [1] Krishnaswamy. S. V, "Film bulk acoustic wave resonator technology", Ultrasonic Symposium, p. 529, 1990.
- [2] Ruby. R., "Micromachined cellular filters", IEEE MTT-S International, p. 1149, 1996.
- [3] G.D. Kino, "Acoustic wave device, imaging, and analog signal processing", Prentice-Hall, Inc, 1987.
- [4] R. S. Naik, "Bragg reflector thin-film resonators for miniature PCS bandpass filters", Ph. D. Thesis, Dept. of Material science and engineering, Massachusetts institute of technology, Cambridge MA, 1998.
- [5] Ruby, R. and Merchant, P, "Micromachined thin film bulk acoustic resonators", 48th Frequency control symposium, p. 135, 1994.
- [6] Demeus, L, "Advanced SOI CMOS technology for RF applications", Signals, Systems, and electronics, p. 134, 1998.
- [7] J. Y. Kim, "Comparative study of various release methods for polysilicon surface micromachining", MEMS'97, Proceedings, IEEE, Tenth Annual international workshop on, p. 442, 1997.