

## Film Bulk Acoustic Wave Resonator for Bandpass Filter

金仁泰·박윤권·李始炯·李允熙·李銓國·金南帥·朱炳權  
 (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 wave Resonator (FBAR) using thin piezoelectric films can be made as monolithic integrated devices with compatibility to semiconductor process, leading to small size and low cost, high Q RF circuit elements with wide applications in communications area. This paper presents a MMIC compatible suspended FBAR using surface micromachining. Membrane is composed  $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$  multi-layer and air gap is about  $50\mu m$ . Firstly, We perform one dimensional simulation applying transmission line theorem to verify resonance characteristic of the FBAR. Process of the FBAR is used MEMS technology. Fabricated FBAR resonate at 2.4GHz,  $K_{eff}^2$  and Q are 4.1% and 1100.

**Key Words** :FBAR, Piezoelectric, Surface micromachining, MMIC

### 1. 서 론

최근 무선 통신 기기의 사용 주파수가 높아짐에 따라 삽입 손실, 소비 전력, 크기, MMIC에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 필터의 경우 기존의 유전체 필터나 표면 탄성파(SAW) 필터는 사용의 한계를 맞이하고 있다. 이러한 문제들에 압전박막 공진기(FBAR) 필터는 새로운 대안으로 떠오르고 있다. 일반적으로 압전박막 공진기는 브래그 반사 층이나 멤브레인을 이용하여 제작된다. 브래그 반사 층의 경우, 탄성 임피던스 차가 큰 물질을 번갈아 가며 증착하여야 한다는 공정의 복잡성과 각 박막의 두께가 정확해야 반사 층으로서의 역할을 하기 때문에 정확한 두께 조절이 필요하다[1]. 현재 많은 연구가 진행되고 있는 실리콘 뒷면 식각을 통한 멤브레인 형성은 실리콘의 결정성에 의해 식각면이 경사를 갖기 때문에 전체 소자가 차지하는 면적이 증가하는 점과, 식각시 소자를 보호해야 하는 어려움이 있다[2].

본 논문에서는 위에서 제시한 문제점들을 해결하고 보다 간단한 공정을 이루기 위해 표면 마이크로머시닝 공정을 이용한 멤브레인을 형성하고 공진기를 제작하는 방법을 제시하였다. 기존의 표면 마이크로머시닝 공정은 실리콘 기판 위에 희생층과 박막을 증착하고 소자를 제작한 후 희생층을 제거하는 방법으로 이루어졌기 때문에 희생층으로 사용된 박막의 stress와 roughness문제가 있다. 특히 FBAR에 사용되는 AlN는 증착 시 기판상태에 따라 압전계수 값에 많은 영향을

보이고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 희생층을 따로 증착하지 않고 실리콘 웨이퍼 자체를 희생층으로 사용함으로써 우수한 특성의 AlN박막을 얻을 수 있었다.

일반적으로 실리콘 질화막 ( $Si_3N_4$ )은 tensile stress를 갖고 실리콘 산화막 ( $SiO_2$ )은 compressive stress를 갖고 있기 때문에 단일 박막으로 멤브레인을 제작할 경우 멤브레인이 휘거나 찢어지기 쉽다. 이 문제를 해결하기 위해 멤브레인을 N/O/N( $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ )구조로 형성함으로써 각 박막이 갖고 있는 스트레스를 상쇄하였다.

### 2. 설계 및 제작

#### 2.1 설계

그림 1은 제안된 FBAR의 단면도를 보여주고 있다. 그림에서처럼 N/O/N 구조의 멤브레인 위에 압전체와 상하부전극을 형성함으로써 공진기를 제작할 수 있다.

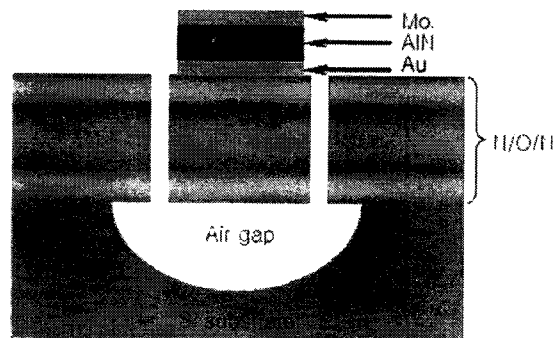


그림 1 제안된 FBAR의 단면도  
 Fig. 1 Proposed structure of the FBAR

\* 正 會 員 : KIST 마이크로시스템센터  
 \*\* 正 會 員 : 忠北大 半導體工學科  
 \*\*\* 正 會 員 : 高麗大 物理學科  
 接受日字 : 2002年 5月 21日  
 最終完了 : 2002年 10月 31日

제작에 앞서 전극, 압전체, 멤브레인에 의한 공진기의 임피던스 특성을 알아보기 위해 전송선로 이론을 적용한 시뮬레이션 수행하였다. 수식 1은 시뮬레이션시 사용된 FBAR의 임피던스 수식이다[3].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ 1 - \frac{K^2}{1 + K^2} \frac{\tan kh}{kh} \right. \\ \left. \frac{(z_{top} - z_{bot}) \cos^2(kh) + j \sin(2kh)}{(z_{top} - z_{bot}) \cos(2kh) + j(1 - z_{top} z_{bot}) \sin(2kh)} \right] \\ z_{bot} = Z_{mo} \left[ \frac{Z_{si} \cos(k_{mo} t_{mo}) - j Z_{mo} \sin(k_{mo} t_{mo})}{Z_{mo} \cos(k_{mo} t_{mo}) - j Z_{si} \sin(k_{mo} t_{mo})} \right] \\ z_{top} = Z_{mo} \left[ \frac{0 + j Z_{mo} \sin(k_{mo} t_{mo})}{Z_{mo} \cos(k_{mo} t_{mo}) + 0} \right] \quad (식 1)$$

여기서  $z_{bot}$ 와  $z_{top}$ 는 각각 상하부전극에서의 input acoustic impedance이다.  $k_{mo}$ 와  $t_{mo}$ 는 전극박막의 wave vector와 두께를 나타낸다.  $K^2$ 과  $2h$ 는 AIN의 전기기계결합 계수와 두께를 나타낸다.  $Z_{mo}$ 와  $Z_{si}$ 는 각 물질의 characteristic acoustic impedance이다.

그림 2는 본 논문에서 제시한 구조에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 때 멤브레인은 실리콘 질화막(0.5 $\mu$ m)/ 산화막(1 $\mu$ m)/ 질화막(0.5 $\mu$ m)으로 구성되었으며 하부전극(Au, 0.1 $\mu$ m) 압전체(AIN, 1.2 $\mu$ m), 상부전극(Mo, 0.1 $\mu$ m)의 두께를 가지며 공진기의 면적은 100 $\mu$ m $\times$ 100 $\mu$ m이다. 시뮬레이션 결과 1GHz, 2.4GHz, 3.5GHz, 5GHz 대역에서 공진이 일어났다. 여기서 2.4GHz 대역에서 발생한 공진이 직렬공진과 병렬공진 간격이 가장 큰 기본 공진이 되며 나머지는 멤브레인에 의한 하모닉 성분임을 알 수 있다[4].

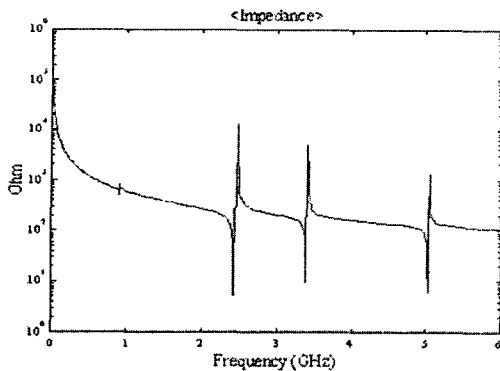


그림 2 멤브레인이 삽입된 경우 FBAR의 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 2 Simulation result of FBAR on the membrane

## 2.2 제작

그림 5는 FBAR의 제작 순서이다. 실리콘 웨이퍼에 실리콘 질화막과 산화막을 Chemical Vapor Deposition(CVD)장비를 이용하여 증착한 후 실리콘 식각을 위한 식각액을 Reactive Ion Etcher(RIE)를 이용하여 형성하였다.

기판 실리콘 식각은 일반적으로 사용되는 등방성 식각 용액인 HNA(HF : HNO<sub>3</sub> : CH<sub>3</sub>COOH=9:75:30) 용액을 사용하였

다. 압전체인 AIN은 RF 스퍼터를 이용하였으며 base pressure는 2 $\times$ 10<sup>-7</sup>Torr, 가스는 질소와 아르곤을 1:4비율(N<sub>2</sub>=4sccm, Ar=16sccm)로 흘려주었고, working pressure는 10mTorr, RF Power는 550W, 타겟과 기판의 거리는 8cm로 유지하였다.

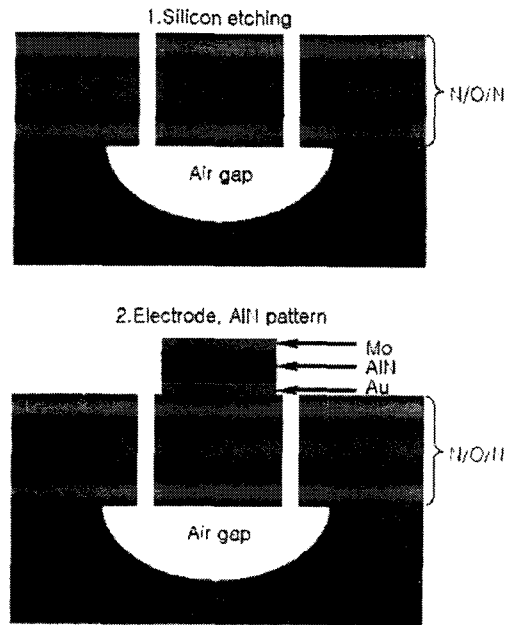


그림 3 FBAR의 제작 순서도

그림 3 Process flow of FBAR

증착된 AIN의 압전 특성을 확인하기 위해 XRD 측정을 한 결과 36에서 AIN의 (002) 피크의 강도는 3000, 반치폭은 0.25로 측정된 것으로 보아 c-축 성장이 잘 이루어진 것을 확인하였다. 그림 4는 AIN의 XRD 측정 자료이다. AIN의 식각액으로는 1.8wt%의 TMAH용액을 사용하였다.

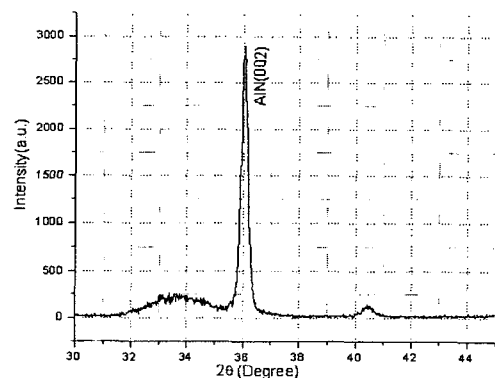


그림 4 AIN 박막의 XRD 측정 결과

Fig. 4 XRD analysis of the AIN

그림 5는 제작된 FBAR의 단면도와 측면도이다. 제작된 공진기는 그림에서처럼 100 $\mu$ m $\times$ 100 $\mu$ m의 면적을 갖고 멤브레인과 기판과의 약 50 $\mu$ m간격을 갖고 있다. 또한 단면사진에서처럼 멤브레인이 stress 없이 평행한 것을 확인하였다.

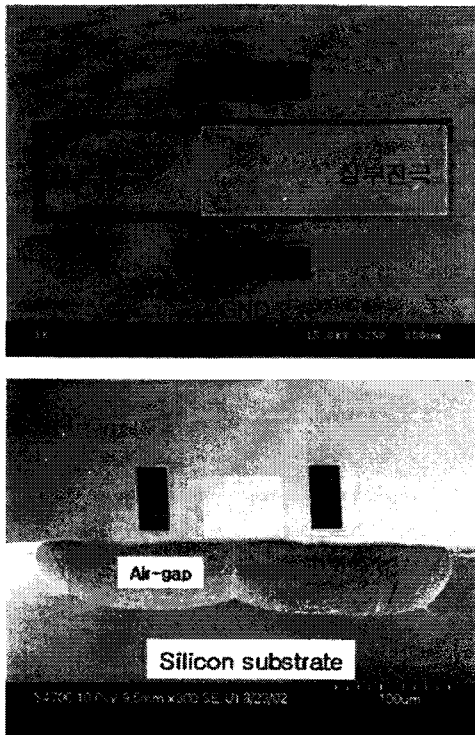


그림 5 제작된 FBAR의 평면도와 측면도  
Fig. 5 Fabricated FBAR

### 3. 측정 및 고찰

HP8510C network analyzer를 사용하여 30KHz-6GHz까지 S-파라메타를 측정하였다. 그림6은 측정된 S<sub>21</sub> 곡선을 나타내고 있다.

측정 결과 2.4GHz대역에서 최대 공진이 일어났고 시뮬레이션에서처럼1GHz, 3.5GHz, 5GHz 멤브레인에 의한 하모닉 성분의 공진이 일어나는 것을 확인하였다. 그림 7은 2GHz-6GHz까지 S<sub>21</sub> 을 측정한 결과이다.

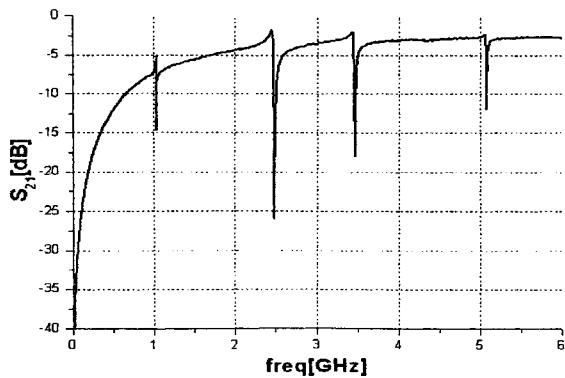


그림 6 전송 계수 (S21) 측정 결과[30KHz-6GHz]  
Fig. 6 Measured transmission coefficient[30KHz-6GHz]

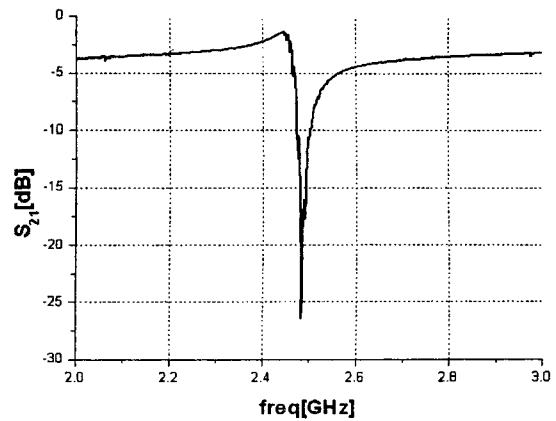


그림 7 전송 계수 (S21) 측정 결과[2GHz-3GHz]  
Fig. 7 Measured transmission coefficient[2GHz-3GHz]

측정 결과 삽입손실은 1.32dB임을 확인하였다. FBAR에서 추출하는 파라메타에는 두 가지가 있는데 하나는 유효전기기 계결합계수 ( $K_{eff}^2$ )와 Q-factor이다[5].  $K_{eff}^2$ 는 직렬공진과 병렬공진 주파수에 의존하며 Q값은 소자의 손실정도를 나타낸다.  $K_{eff}^2$ 과 Q값을 구하기 위해 임피던스 측정을 하였다. 그림 8은 2GHz-6GHz까지 Z<sub>in</sub> 을 측정한 결과이다.

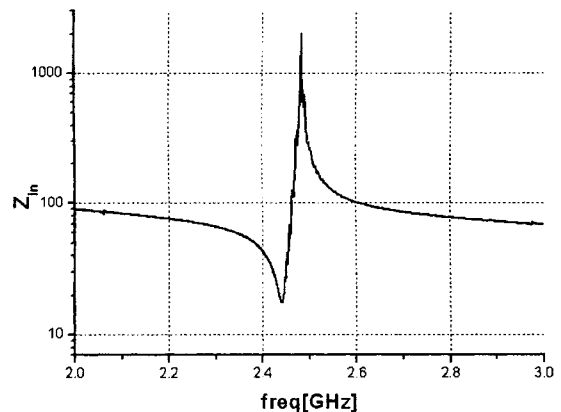


그림 8 입력 임피던스 (Zin) 측정 결과[2GHz-3GHz]  
Fig. 8 Measured input impedance[2GHz-3GHz]

임피던스 곡선에서 크기가 최소가 되는 점을 직렬공진 최대가 되는 점을 병렬공진이라 한다[5]. 측정결과 직렬공진 주파수는 2.439GHz, 병렬공진 주파수는 2.482GHz이고 이때 임피던스는 각각 17과 2026을 나타내었다.  $K_{eff}^2$ 과 Q값은 수식 (2)를 이용하여 계산하였다[5].

$$K_{eff}^2 = \frac{\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}\right)}, \quad Q = \frac{f}{2} \frac{\partial \angle Z}{\partial f} \dots\dots\dots(식 2)$$

계산된  $K_{eff}^2$  과 Q값은 각각 4.2%와 1100으로 계산되었다.

#### 4. 결 론

전송선로 이론을 적용한 임피던스 식을 이용하여 시뮬레이션 하여 FBAR의 공진 특성을 예측하고 실제 제작한 공진기의 임피던스 특성과 일치함을 확인하였다.

희생층을 따로 증착하지 않고 실리콘 웨이퍼 자체를 식각하여 멤브레인을 만듦으로서 공정의 간단화를 이룰 수 있었고 N/O/N구조의 멤브레인을 형성하여 단일 박막 멤브레인에서 발생하는 stress를 상쇄하여 더욱 견고한 멤브레인을 제작할 수 있었다. 제작된 소자는 2.4GHz 대역에서 가장 큰 공진이 일어났으며 삽입손실은 1.32dB,  $K^2_{eff}$ 과 Q값은 각각 4.2%와 1100으로 계산되었다.

#### 감사의 글

이 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대신기술사업인 차세대 무선통신용 트랜시버 시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] R. Ruby, P. Merchant, "Micromachined thin film bulk acoustic resonators", Frequency Control Symposium, 1994. 48<sup>th</sup>.
- [3] Joel F. Rosenbaum, "Bulk acoustic wave theory and devices", Artech house, Inc, 1988.
- [4] Giwan Yoon, Jae-Don Park "Fabrication of ZrO<sub>2</sub>-based film bulk acoustic resonator devices using W/SiO<sub>2</sub>/sub 2/ multilayer reflector", Electronics Letters, Volume: 36 Issue: 16, pp. 1435-1437, 3 Aug. 2000.
- [5] K. M. Lakin, G. R. Kline and K. T. Mccarron, "High-Q microwave acoustic resonators and filters", IEEE Trans. Microwave Theory & Techniques, vol. 41, no. 12, pp.2139-1993.Hayes, J.P., "Pseudo-Boolean Logic Circuits", IEEE Trans. Computers, vol. C-35, no. 7, pp. 602-612, July

#### 저 자 소 개



#### 김 인 태(金 仁 泰)

2001년 충북대 반도체공학과 졸업. 현재 KIST 마이크로시스템센터 위촉연구원.  
E-mail: kimit@kist.re.kr



#### 박 윤 권

현재 KIST 마이크로시스템센터 학생연구원.  
E-mail: ykp@kist.re.kr

#### 이 시 형(李 始 炯)

1999년 연세대 세라믹공학과 졸업(석사). 현재 KIST 박막 기술연구센터 학생연구원



#### 이 윤 희(李 允 熙)

1985년 고려대 물리학과 졸업. 1987년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 물리학과 졸업(이학). 현재 고려대 물리학과 부교수



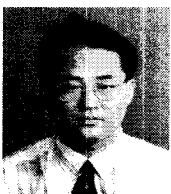
#### 이 전 국(李 鎭 國)

1991년 KIST 재료공학과 졸업(공학). 현재 KIST 박막기술연구센터 책임연구원



#### 김 남 수(金 南 帥)

1977 서울대학 학사. 1984 U. of Connecticut 이학 석사. 1988 U. of Connecticut 이학 박사. 1988-1991: 현대전자 반도체 연구소. 1992-현재: 충북대학 전기전자 공학부교수



#### 주 병 권(朱 炳 權)

1986년 서울시립대 전자공학과 졸업. 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년 고려대학교 전자공학과 졸업(공학). 1995년 3월 현재 KIST 마이크로시스템센터 책임연구원. 관심분야:FPD, MEMS, Packaging  
E-mail: jbk@kist.re.kr