

Flexible 마이크로시스템을 위한 압전 박막 공진기의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Film Bulk Acoustic Resonator for Flexible Microsystems

강유리¹⁾, 김용국²⁾, 김수원³⁾, 주병권⁴⁾

(Yu-Ri Kang¹⁾, Yong-Kook Kim²⁾, Su-Won Kim³⁾, and Byeong-Kwon Ju⁴⁾)

Abstract

This paper reports on the air-gap type thin film bulk acoustic wave resonator(FBAR) using ultra thin wafer with thickness of $50\mu\text{m}$. It was fabricated to realize a small size devices and integrated objects using MEMS technology for flexible microsystems. To reduce a error of experiment, MATLAB simulation was executed using material characteristic coefficient. Fabricated thin FBAR consisted of piezoelectric film sandwiched between metal electrodes. Used piezoelectric film was the aluminum nitride(AlN) and electrode was the molybdenum(Mo). Thin wafer was fabricated by wet etching and dry etching, and then handling wafer was used to prevent damage of FBAR. The series resonance frequency and the parallel frequency measured were 2.447GHz and 2.487GHz, respectively. Active area is $100\times 100\mu\text{m}^2$. Q-factor was 996.68 and K_{eff}^2 was 3.91%.

Key Words : FBAR, Flexible microsystems, Thin wafer

1. 서론

최근 무선 통신 산업의 획기적인 발전으로 개인용 통신기기뿐 아니라 무선 랩탑 컴퓨터와 같은 전자기기의 보급이 보편화되었다. 그 중 전자통신 기기는 초소형화된 기판에 다기능 시스템을 집적화해야 하므로, 마이크로 머신기술과 집적회로 기술이 접목된 MEMS 기술의 연구가 절실하다. 또한 인간의 몸과 같은 곡면에 부착할 수 있는 flexible 마이크로시스템을 구현하려면, 핵심 부품의 초소형화와 고기능화의 집적뿐 아니라 기판의 유연성도 함께 갖춰져야 한다.

현재 전자통신기기의 송수신 시스템을 구성하는

여러 부품들 중 가장 크고 두꺼운 부품 중 하나인 밴드패스 필터는 한정된 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 위한 수단이다[1]. 그러므로 flexible 마이크로시스템을 통신기기에 구현하려면 먼저 밴드패스 필터의 소형화와 유연성이 필요하다. 밴드패스 필터가 낮은 삽입 손실과 높은 스퀘트 특성을 유지하기 위해서는 현재 보편적으로 사용되고 있는 유전체 필터나 표면 탄성파(SAW)필터 외에 압전 박막 공진기를 이용한 필터 같은 다른 대체 수단이 필요하다. 압전 박막 공진기(Film Bulk Acoustic Resonator)는 전기적 에너지를 기계적 진동으로 바꿔준다는 점에서 표면 탄성파 소자와 동일한 동작 원리를 가진다. 그러나 입력된 에너지가 소자의 표면이 아닌 벌크 영역에 직접 전달되고 저온에서의 공정이 가능한 장점이 있다[2]. 또한 압전 박막 공진기는 전자기파공진이 아닌 징크 옥사이드(ZnO)나 알루미늄 나이트라이드(AlN)같은 압전 박막 자체의 음향 또는 기계적 공진 현상을 이용하기 때문에, 전자파와 같은 주파수일 때 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 배 정도의 낮은 전파 속도로 인한 파장의 감소로

* : 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

(서울시 성북구 하월곡동 39-1,

Fax : 02-958-5692

Corresponding Author : remoneid@kist.re.kr)

** : 고려대학교 전자컴퓨터공학과

2003년 9월 25일 접수, 2003년 10월 27일 1차 심사완료,

2003년 11월 6일 최종 심사완료

수 μm 까지 소형화된 소자를 제작할 수 있다[3]. 특히 압전 박막 공진기로 필터를 제작할 경우 표면 탄성과 필터보다 소형이면서 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)화가 가능하고 유전체 필터의 저 삽입손실, 높은 유전율, 고온에서의 안정성 등의 장점을 모두 갖출 수 있다는 이점이 있다[4,5]. 이러한 압전 박막 공진기를 제작하는 방법에는 브래그 반사층을 이용한 적층형의 공진기와 벌크 마이크로 머시닝을 이용하여 실리콘 뒷면을 식각하는 공진기가 있다. 이 중 브래그 반사층을 이용한 공진기의 경우 각 박막의 특성이 우수해야 하고 정밀한 두께의 제어가 필요하며 여러번 박막을 증착해야 하는 어려움이 있다. 또한 실리콘 뒷면 식각을 하는 경우 식각해야 할 뒷면의 면적이 증가하기 때문에 집적화에 용이하지 못한 단점이 있다.

본 논문에서는 50 μm 이하의 얇은 실리콘 기판위에 압전 박막 공진기를 제작함으로써 flexible 마이크로시스템으로의 가능성을 제시하였으며 표면 마이크로 머시닝 기술을 이용한 멤브레인을 제작한 이후 그 위에 공진기를 제작했기 때문에 공정의 단순화와 재현성을 높일 수 있었다.

제작된 압전 박막 공진기의 특성을 평가한 결과 직렬 공진 주파수(fs)와 병렬공진 주파수(fp)는 각각 2.447GHz와 2.487GHz였고 그때의 삽입 손실은 1.368dB와 26.123dB로 나타났으며 Q-factor 값은 최대 996.68, K^2_{eff} 값은 약 3.91%로 나타났다.

2. 실험

2.1 압전 박막 공진기 설계

이상적인 압전 박막 공진기의 경우 전극의 저항이 없고 상, 하부 전극 모두 공기와 접하고 있는 상태이므로 외부로의 전달 매체가 없어서 압전 박막에서 발생된 탄성파가 박막의 경계면에서 전반사를 한다[6]. 따라서 처음에 입력된 바이어스로 인한 전계가 압전 현상을 계속 유지할 수 있기 때문에 에너지 면에서 전혀 손실이 없는 이상적인 소자가 된다. 반면에 본 논문에서 제시한 압전 박막 공진기의 구조에서는 다층($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) 멤브레인이 존재하므로 공진 주파수가 클수록 멤브레인에 의한 삽입 손실과 탄성파 손실이 야기된다[7]. 이는 전극이나 압전체에서 발생한 손실과 함께 압전 박막 공진기 특성 저하의 원인이 된다. 결국 이러한 문제점을 최소한으로 줄이기 위해서는

가능한 멤브레인의 두께를 최소로 제작하는 과정이 필요하며 각 박막이 평탄한 표면, 낮은 잔류응력 그리고 높은 밀도를 가져야 한다. 실제 실험에서 형성된 멤브레인 층은 $\text{Si}_3\text{N}_4(2500 \text{ \AA})/\text{SiO}_2(5000 \text{ \AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(2500 \text{ \AA})$ 로 총 두께가 1 μm 로 형성되었다. 다층 박막의 멤브레인을 제작한 이유는 실리콘 나이트라이드(Si_3N_4)나 실리콘 옥사이드(SiO_2) 같은 단일 박막만을 사용했을 경우 발생할 수 있는 스트레스를 완화하기 위함이다. 실험에서 사용된 실리콘 나이트라이드의 경우 인장 응력을 가지고 있고, 실리콘 옥사이드는 압축 응력을 가진다. 따라서 멤브레인 형성시 휘어지거나 쉽게 부서지는 현상이 나타났다. 또한 멤브레인 형성 후 전극과 압전체를 증착하게 되는데 일반적으로 금속의 경우 압축 응력이 작용하는 경우가 많고, 실험에서 증착된 압전체 역시 압축 응력을 가졌기 때문에 각 박막의 스트레스를 보상해야 할 필요가 있었다.

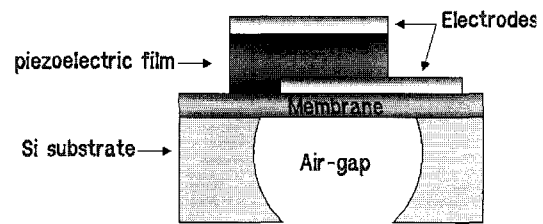


그림 1. 제안된 압전 박막 공진기의 구조.

Fig. 1. Structure of proposed FBAR.

그림 1은 설계된 압전 박막 공진기의 단면도이고 멤브레인 이외에 상, 하부 전극은 몰리브덴(Mo), 압전체는 알루미늄 나이트라이드(AlN)로 이루어진다.

그림 1에서 제안된 구조로 소자를 제작하기 전에 압전 박막 공진기 제작에 응용될 변수들과 각 박막의 재료 특성 지수를 사용해 MATLAB으로 시뮬레이션을 했다. 이 때 사용된 물질 상수는 표 1에 나타났다. 그림 2는 그림 1에서 제안한 압전 박막 공진기 구조의 시뮬레이션 결과이고 사용된 식(1)은 이하에 나타낸 전송 선로 이론을 적용한 임피던스 수식이다.

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

$$z_{top} = Z_{top} \left[\frac{0 + jZ_{mo} \sin(k_{mo} t_{mo})}{Z_{mo} \cos(k_{mo} t_{mo}) + 0} \right]$$

$$z_{bot} = Z_{mo} \left[\frac{Z_{si} \cos(k_{mo} t_{mo}) - jZ_{mo} \sin(k_{mo} t_{mo})}{Z_{mo} \cos(k_{mo} t_{mo}) - jZ_{si} \sin(k_{mo} t_{mo})} \right] \quad (1)$$

$$K^2 = \frac{e^2}{c^2 E^s} \quad (2)$$

$$k = w \sqrt{\frac{\rho_m}{cD}} \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{\epsilon^2 A}{h} \quad (4)$$

여기서 식(2)와 식(3)에 기술한 K^2 과 k 는 압전체의 전기기계결합상수(electromechanical coupling constant)와 wave vector를 나타내고 식(1)의 z_{top} 과 z_{bot} 은 각각 상하부 전극의 입력 탄성 임피던스이다. 또한 h 는 압전체의 두께, 식(4)의 C_0 은 전기용량, A 는 공진기의 면적을 나타낸다.

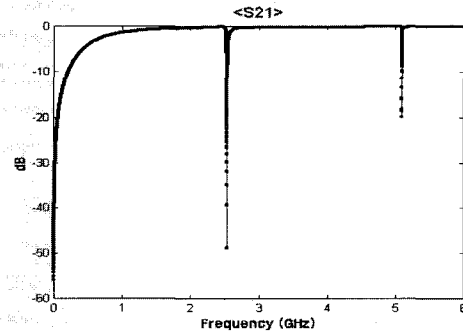
표 1. 물질 상수.

Table 1. Material coefficient.

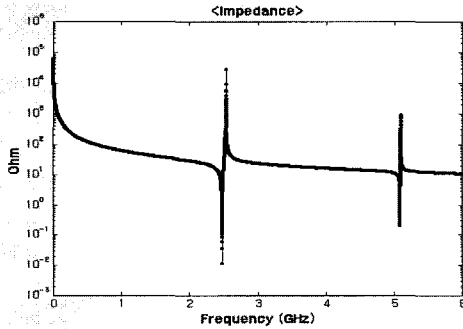
	stiffness (Gpa)	유전율 (const. T)	1 GHz당 감쇠율 (dB/cm)	밀도(kg/m ³)
AlN	373~409	8.812	57.5	3260
Si ₃ N ₄	295~246	7.6		3440~3380
SiO ₂	45	4	63	2200
Mo	460			10190

그림 2(a)는 1의 N/O/N 멤브레인이 있는 압전 박막 공진기의 S_{21} 삽입손실 그래프이고 그림 2(b)는 동일한 소자의 입력 임피던스 특성이다. 시뮬레이션 결과 직렬 공진과 병렬 공진의 간격이 가장 큰 기본 공진은 2.48GHz에서 일어났으며 5GHz 대역에서 멤브레인 영향에 의한 하모닉 공진이 발생했다. 일반적으로 멤브레인 두께가 증가할수록 하모닉 공진의 수가 늘어나며 S파라미터에서도 삽입손실이 증가하게 되는 현상이 발생한다. 또한 압전체의 두께가 증가할수록 공진 주파수는 감소하고 박막층의 수가 늘어날수록 삽입손실이 커지며 주파수가 이동하는 현상이 발생한다[8]. 따라서 이와

같은 MATLAB 시뮬레이션으로 압전 박막 공진기의 공진 특성을 예측하여 실험의 오차를 줄이고 정확한 박막 두께 제어를 위한 지표를 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

그림 2. 압전 박막 공진기의 시뮬레이션 결과 (a) S_{21} (b) 입력 임피던스.

Fig. 2. Simulation result of the FBAR (a) S_{21} (b) input impedance.

2.2 실리콘 웨이퍼 식각

Flexible 마이크로시스템에 압전 박막 공진기를 적용하기 위해서는 소자 뿐 아니라 기판에서도 탄력성을 지닌 재료를 사용하여 두께를 제어해야 한다. 이러한 요건을 만족시키기 위해 본 논문에서는 유연성을 가진 50 μ m이하 두께의 실리콘 웨이퍼위에 압전 박막 공진기를 구현하였다.

실리콘 웨이퍼의 식각은 4인치 P-type 실리콘 웨이퍼를 CMP(Chemical Mechanical Polishing)로 150 μ m이하까지 식각 후 KOH(등방성 식각)로 50 μ m이하까지 식각하게 된다. 식각되기 전 실리콘 웨이퍼의 평균 두께는 530 μ m로서 처음부터 습식 식각

을 진행할 경우 웨이퍼의 표면이 고르지 않은 문제가 있었다. 또한 CMP만으로 식각하는 경우에는 내구력의 약화와 핸들링 문제가 겹쳐서 웨이퍼가 파괴되는 현상이 일어난다. 따라서 실험에서는 CMP를 이용하여 실리콘 뒷면을 연마한 후 실리콘 표면의 스트레스나 결함을 줄이기 위해 공정이 단순하고 비용이 적게 드는 KOH 습식 식각을 사용하게 되었다. 이 때 사용된 KOH의 온도는 79° C 이고, 농도는 20wt%로서 분당 식각율은 1.4 μ m로 측정되었다. 그림 3은 식각된 50 μ m 두께를 가지는 실리콘 웨이퍼의 유통적인 모습을 보여주고 있다.

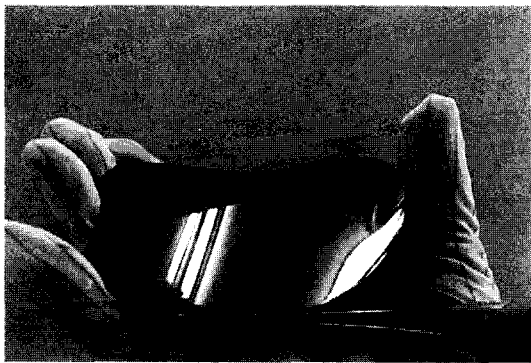


그림 3. 제작된 박막 웨이퍼.
Fig. 3. Fabricated thin wafer.

2.3 압전 박막 공진기 제작

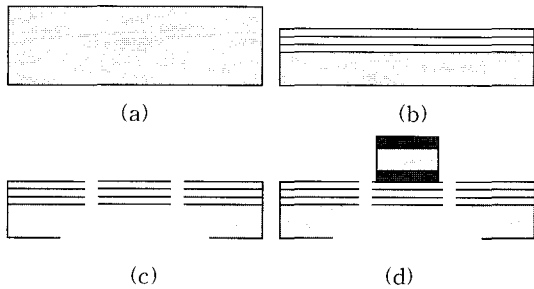


그림 4. 압전 박막 공진기 제작 순서도 ; (a) 일반 웨이퍼, (b) 박막 웨이퍼 형성 후 N/O/N 증착, (c) 멤브레인 형성, (d) 전극과 압전체 증착.

Fig. 4. Process flow of the FBAR : (a) general wafer, (b) N/O/N film deposition after making thin wafer, (c) formation of membrane, (d) deposition of electrodes and piezoelectric material.

그림 4는 압전 박막 공진기의 제작 순서도를 나타낸다. 그림 4(a)처럼 박막 실리콘 웨이퍼를 제작한 후 그림 4(b)처럼 웨이퍼 위에 멤브레인 층이 되는 Si₃N₄(2500 Å)/SiO₂(5000 Å)/ Si₃N₄(2500 Å) 박막을 CVD 방법을 이용하여 증착한다. 증착된 N/O/N박막의 특성 측정은 AFM 성분 분석을 이용했다. 그림 2의 시뮬레이션 결과처럼 공진 주파수 이외의 하모닉 성분은 멤브레인 층이 되는 N/O/N박막의 표면 고르지와 두께가 결정하므로 N/O/N 박막의 특성 제어는 압전 박막 공진기 제작의 중요한 변수가 된다.

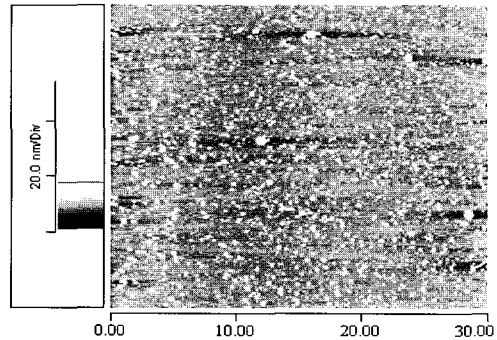
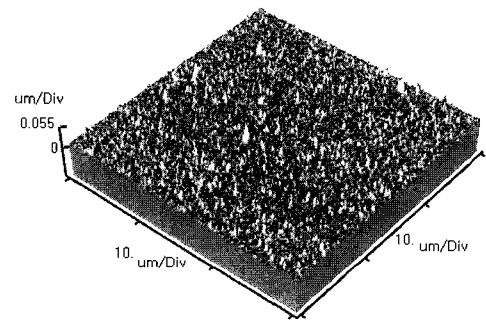


그림 5. Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄의 AFM 측정 데이터.
Fig. 5. Measured AFM data of Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ film.

그림 5는 N/O/N 박막의 AFM 분석으로 측정된 피크 값은 550 Å, RMS roughness 값은 28.47 Å, Ave roughness는 16.94 Å로서 매우 고른 평탄 기울기를 가져 전극과 압전체의 시드 층이 되기 적합한 것으로 나타났다.

그림 4(c)는 증착된 N/O/N 박막 위에 멤브레인 형성을 위한 식각을 RIE(Reactive Ion Etching)로 제작하는 과정을 나타낸다. 건식 식각을 진행하

는 동안 N/O/N 박막의 손상을 최소화하기 위해 크롬(Cr)을 보호층으로 이용하였고 챔버의 진공은 60mTorr, RF파워는 300W, 가스는 CHF₃(50sccm)와 O₂(10sccm)를 유지했다. 식각장 형성 후 공기층이 되는 실리콘의 식각은 HNA(HF:HNO₃:CH₃COOH=1:3:2)로 등방성 습식 식각을 진행했다. 이렇게 제작된 멤브레인은 식각장 아래로 약 50 μ m 이상의 공기층을 포함하고 있다.

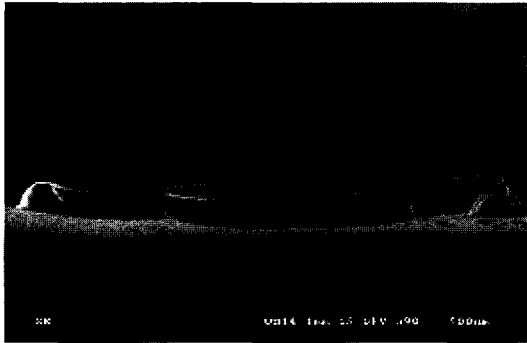


그림 6. N/O/N 멤브레인의 SEM 사진.
Fig. 6. SEM picture of N/O/N membrane.

그림 6은 형성된 멤브레인의 SEM 분석 사진을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 HNA를 이용한 단시간의 습식 식각으로 멤브레인의 응력이 거의 작용하지 않아 박막이 휘거나 깨지는 현상이 거의 없음을 알 수 있다. 또한 박막 웨이퍼 위에 멤브레인을 제작하였기 때문에 HNA식각 이후 표면 장력의 작용이 없어 건조시 나타날 수 있는 접착 문제가 발생하지 않아서 멤브레인의 형태가 그대로 유지되었음을 알 수 있었다.

제작된 멤브레인 위에 하부 전극으로 몰리브덴(Mo)을 1000Å 증착하고 압전체는 RF magnetron sputtering 방법을 사용하여 1.2 μ m 두께로 증착하였다(그림 4(d)). 증착 시 base pressure는 $>5 \times 10^{-7}$ torr, 가스는 질소(N₂)를 16sccm, 아르곤(Ar)을 20sccm만큼 흘려주었다. 챔버내의 증착 압력은 10mtorr, RF power는 550W, 타겟과 기판 사이의 거리는 6 cm였다.

그림 7은 몰리브덴(Mo)위에 증착된 알루미늄 나이트라이드(AlN)의 XRD 측정 데이터이다. 알루미늄 나이트라이드의 경우 36.04°를 가지는 (002) 방향으로 성장했을 때 가장 우수한 압전 특성을 가진다. 그림 7의 데이터의 경우는 36°로서 박막

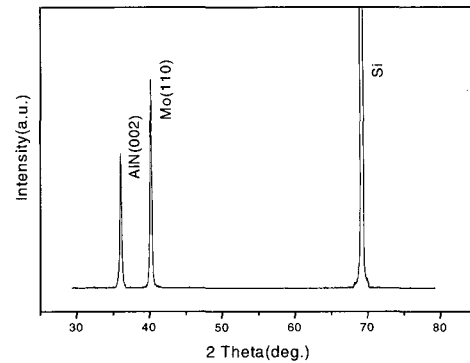


그림 7. AlN/Mo의 XRD 데이터.
Fig. 7. XRD data of AlN on Mo.

에 약간의 압축 응력이 작용했음을 알 수 있다. 이는 XRD 피크가 나타나는 원리가 브래그(Bragg) 회절 때문인 것에 기인한다. 박막이 성장했을 때 어떠한 영향도 받지 않은 순수한 경우에 나타난 XRD 회절 피크값을 기준으로 했다면 박막에 응력이 가해져 격자구조가 달라졌을 때는 XRD 피크 값이 이동할 하게 된다. 다시 말해서 박막에 응력이 작용하면 뒤튼어진 격자 구조에 의해 변간 거리가 증가하거나 감소하게 되는데 일반적인 큐빅 구조의 경우 인장 응력일 때 기준 피크 값보다 높은 각에서 XRD 피크 값이 나타나고, 압축 응력일 때는 반대가 된다. 따라서 그림 7의 데이터는 압축 응력으로 인해 0.04°의 차이를 나타내지만 측정 환경에 따라 약간의 피크 이동이 발생할 수도 있는 점을 감안하면 우수한 결정질의 알루미늄 나이트라이드라고 할 수 있다.

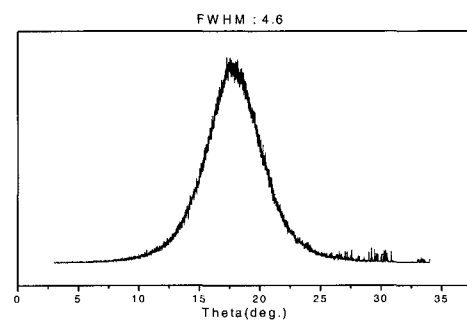


그림 8. AlN의 rocking curve.
Fig. 8. Rocking curve of AlN.

그림 8은 동일한 알루미늄 나이트라이드의 XRD rocking curve를 표시한 그림이고, 측정된 반치폭은 4.6° 로 나타났다. 반치폭의 크기가 작을수록 (002)방향의 C축 배향과 강도가 우수한 박막이므로 실험에서 증착된 알루미늄 나이트라이드의 경우 특성이 좋은 압전 박막 공진기를 제작할 수 있었다. 그림 4(c)에서 나타낸 것처럼 하부 전극과 압전체를 증착한 후 상부 전극(Mo, 1000 Å)을 증착한다. 증착시 환경은 하부 전극 증착과 동일하게 유지시키고 압력은 10mtorr, DC power는 400W이고, 가스는 아르곤(Ar)을 30sccm만큼 흘려주었다.

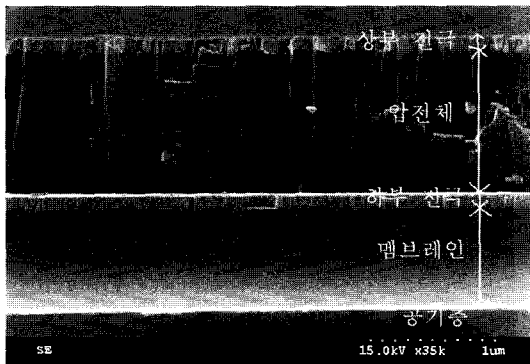


그림 9. 제작된 압전 박막 공진기의 전극/압전체 단면 SEM 사진.

Fig. 9. SEM picture of cross section of electrode/piezoelectric film.

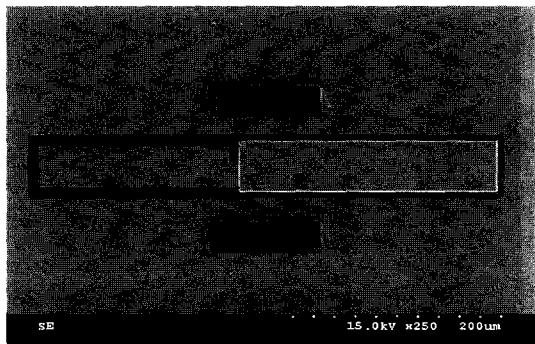


그림 10. 제작된 압전 박막 공진기의 SEM 사진.

Fig. 10. SEM picture of fabricated FBAR.

그림 9는 1의 N/O/N 멤브레인 위에 제작된 압전 박막 공진기의 전극과 압전체의 단면 SEM 분석 사진이다. 그림에서 알루미늄 나이트라이드가 우수한 (002)방향 배향성을 가지는데 이는 시드 층으로 작용한 몰리브덴 층의 표면이 평탄하고 밀도가 높기 때문이다. 또한 알루미늄 나이트라이드의 증착 속도 증가로 알루미늄 분자가 산소와의 결합을 지연하고 질소와 결합하여 우선 성장 면인 (002)축을 중심으로 증착됐기 때문이다.

그림 10은 제작이 완료된 압전 박막 공진기의 평면 SEM 분석 사진이다. 압전체의 공진 면적은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이고 위아래로 멤브레인 형성을 위한 식각창이 있으며 접지면과 전극은 N/O/N박막으로 절연시켰다. 본 논문에서는 초박막 웨이퍼로 멤브레인을 형성한 후 그 위에 압전 박막 공진기를 제작하였고 이때 박막 웨이퍼는 두꺼운 PR을 이용하여 핸들링용 웨이퍼를 부착한 후 공정을 진행하였다. 특히, 멤브레인 아래가 완전히 공기층으로 되어있어 공정 중 남아있는 용액으로 인해 발생할 수 있는 스틱션 문제가 발생하지 않아 재현성을 높일 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

완성된 압전 박막 공진기는 HP8753ES 벡터 네트워크 어빌라이저를 사용하여 현대역에서 S 파라미터와 임피던스를 측정하였다.

그림 11은 2-3GHz대역에서 측정한 S_{21} 곡선과 임피던스 곡선을 나타내며 그림 11(b)에서 나타낸 곡선의 임피던스 크기 값이 최소가 될 때를 직렬 공진, 최대가 될 때를 병렬 공진이라고 한다[9]. 측정된 직렬 공진 주파수(fs)와 병렬공진 주파수(fp)는 그림 11(a)에서 각각 m1과 m2로 표시하였고, 해당 지표 값은 2.447GHz와 2.487GHz였다. 또한 이때의 삽입 손실은 1.368dB와 26.123dB의 값을 나타냈다. 삽입 손실은 압전 박막 공진기에 바이어스를 걸었을 때 진동하게 되는 음향 탄성파를 감소시키는 정도를 의미한다. 즉, 이상적인 압전 박막 공진기에서 고려되지 않은 전극의 저항 성분과 압전체의 C축 배향성의 불완전성으로 인한 음향 정재파의 왜곡이 전체 소자에 손실을 가져다 준 것이다. 또한 압전 박막 공진기가 공기와 직접 접하지 않고 멤브레인을 통과하기 때문에 음향 탄성파의 전반사가 일어나지 않고 반사 계수만큼 신호의 감쇠가 일어나 삽입 손실이 발생한다.

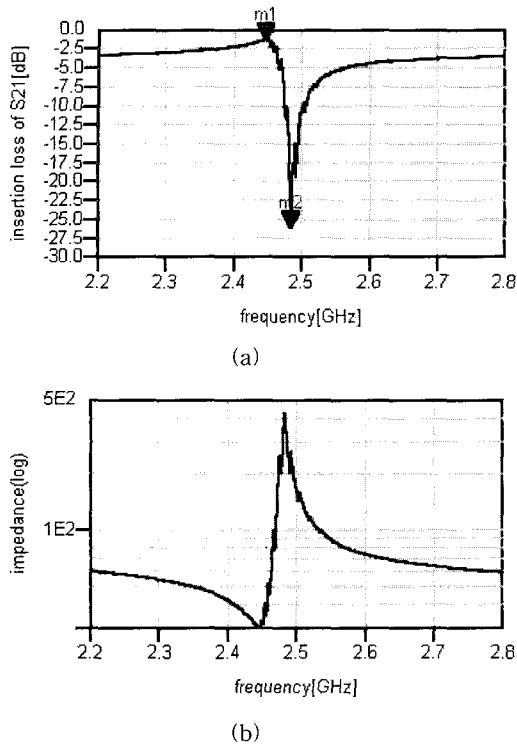


그림 11. 측정된 압전 박막 공진기의 S parameter.
Fig. 11. S parameter of measured FBAR.

압전 박막 공진기의 특성을 평가하는 또 다른 변수는 유효 전기 기계 결합 계수(K_{eff}^2)와 Q-factor가 있다. 는 직렬 공진과 병렬 공진 주파수의 절대 간격에 의존하게 되고 이상적인 공진기에서는 전기 기계 결합 상수가 같다. Q-factor는 소자의 손실이 일어난 정도를 의미한다[10]. 각각의 변수 값은 측정된 S_{21} 곡선을 이용해 Agilent Technology사의 ADS(Advanced Design System)로 해석했고 그 결과 Q-factor 값은 최대 996.68, K_{eff}^2 값은 약 3.91%로 나타났다. 이 때 사용된 수식은 다음과 같다.

$$K_{eff}^2 = \frac{\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}\right)} \quad (5)$$

$$Q_{s/r} = \frac{fx}{2} \frac{d \angle Z_{in}}{df} \Big|_{f=f_r} \quad (6)$$

위의 측정 결과를 그림 2의 시뮬레이션 결과와

비교하면 공진 주파수가 다소 낮아진 것을 알 수 있는데 이는 소자 제작 시 박막 두께가 시뮬레이션 변수와 비교해 약간 두꺼워졌거나 각 박막 간에 작용한 스트레스의 영향으로 주파수 이동 현상을 보인 것으로 사료된다. 또한 이상적인 압전 박막 공진기와 달리 삽입 손실이 나타나게 된 원인은 멤브레인으로 형성된 공기층에서의 반사파로 인한 손실과 압전체의 압전 계수가 이상적이지 않기 때문이다.

제작된 압전 박막 공진기는 lumped elements를 가진 등가회로로 변형할 수 있다. 이 때 사용되는 R, L, C값은 필터로 구현할 때 기준이 되는 값이다. R, L, C값은 그림 11(b)의 임피던스 곡선을 이용하여 수식 9에 대입하여 구한다[11].

$$r = \frac{C_o}{C_1}, \quad u_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

$$\left(\frac{u_p}{u_s}\right)^2 = 1 + \frac{1}{r},$$

$$\frac{1}{Q_s} = u_s R_1 C_1, \quad \frac{1}{Q_r} = \frac{u_s R_0 C_o}{r},$$

$$\frac{1}{Q_{so}} = \frac{1}{Q_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_1}\right) - \frac{1}{Q_{po}} = \left(\frac{u_p}{u_s}\right) \left(\frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_r}\right) \quad (7)$$

여기서 Q_s, Q_r 는 직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수를 나타내고 Q_{so}, Q_{po} 는 각각 직렬 공진에서의 Q-factor와 loaded Q-factor를 나타낸다. 와 는 직렬 공진과 병렬 공진에서 3dB만큼 임피던스가 줄어들 때의 간격을 말한다.

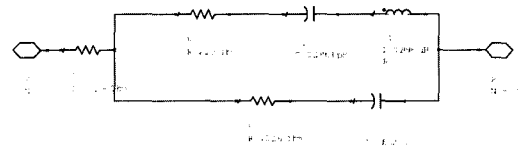


그림 12. Thin FBAR의 등가회로.
Fig. 12. Equivalent circuit of thin FBAR.

그림 12는 식 7을 이용하여 추출해낸 등가회로를 보여준다. 그림 12에서 R_s 와 R_0 는 각각 물리브덴 전극에 의한 손실 저항과 유전 손실을 나타내고 R_1 은 압전체의 손실을 나타낸다.

4. 결 론

초고주파 시스템을 소형화, 경량화, 집적화하고 유연성을 추가하기 위하여 고주파 회로용 필터에 적용 가능한 압전 박막 공진기를 박막 웨이퍼를 이용하여 설계 및 제작하였다. 압전 박막 공진기는 50 μ m 이하의 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하여 유연한 성질을 보였으며 1 μ m의 Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 박막을 이용하여 멤브레인을 제작하였다. 다층 구조의 멤브레인으로 전극과 압전체의 스트레스를 보상하여 소자의 손실 변수를 제거하였고 표면 마이크로 머시닝 공정을 이용하여 제작하였기 때문에 공정의 단순화를 이룰 수 있었다. 제작된 압전 박막 공진기는 2.447GHz와 2.487GHz에서 각각 직렬 공진과 병렬 공진이 측정되었으며 삽입 손실은 1.368dB, K²_{eff}값은 약 3.91%, Q값은 996.68을 나타내어 일반 웨이퍼 위에 제작한 공진기들과 비교해서도 좋은 특성을 얻었음을 알 수 있다.

본 연구에서는 박막 웨이퍼를 이용하여 우수한 특성을 가지는 압전 박막 공진기를 제작하였다. 이러한 압전 박막 공진기는 필터나 듀플렉서 등의 초고주파 소자들에 응용될 수 있을 뿐 아니라 초박막 웨이퍼를 이용함으로써 전기적 이동 경로를 줄여 전력 손실을 줄이고 flexible한 특성을 이용하여 소자의 부피와 무게를 줄이고 유연성을 확보하여 wearable한 마이크로시스템에 응용이 가능할 것이다.

참고 문헌

[1] J. J. Lutsky, "A sealed cavity thin-film acoustic resonator process for RF bandpass filters", Ph. D Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, 1997.

[2] R. C. Ruby, P. Bradley(SM), Y. Oshmyansky, and A. Chien, "Thin film bulk acoustic resonators(FBAR) for wireless applications", IEEE ultrasonics symposium, p. 813, 2001.

[3] V. M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices", John Wiley & Sons, p. 117, 1983.

[4] S. V. Krishnaswamy, J. F. Rosenbaum, S. S. Horwitz, and R. A. Moore, "Film bulk acoustic wave resonator and filter

technology", Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, 1992.

- [5] K. M. Lakin, G. R. Kline, and K. T. McCarron, "High-Q microwave acoustic resonators and filters", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 41, p. 2139, 1993.
- [6] K. M. Lakin, K. T. McCarron, J. Belsick, and J. F. McDonald, "Thin film bulk acoustic resonator and filter technology", 2001 Radio and Wireless Conf., RAWCON of IEEE, p. 89, 2001.
- [7] H. Kanbara, H. Kobayashi, and K. Nakamura, "Analysis of piezoelectric thin film resonators with acoustic quarter-wave multilayers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, p. 3049, 2000.
- [8] 김인태, 박윤권, 이시형, 이윤희, 이진국, 김남수, 주병권, "센서 기능성 박막 : SOI 웨이퍼를 이용한 압전박막공진기 제작", 전기전자재료학회논문지, 15권, 12호, p. 1039, 2002.
- [9] R. Ruby, P. Bradley, J. Larson, Y. Oshmyansky, and D. Figueredo, "Ultra-miniature high-Q filters and duplexers using FBAR technology", 2001 Solid State circuits Conf., IEEE International, p. 120, 2001.
- [10] M. Ylilammi J. Ella, M. Partanen, and J. Kaitila, "Thin film bulk acoustic wave filter", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Vol. 49, p. 535, 2002.
- [11] J. D. Larson, P. D. Bradley, S. Wartenberg, and R. C. Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system", IEEE, Ultrasonics Symposium, Vol. 1, p. 863, 2000.