

Bragg 반사층을 이용한 IMT-2000 대역통과필터용 체적 탄성파 공진기

Film Bulk Acoustic Resonator(FBAR) using Bragg Reflector for IMT-2000 Bandpass Filter

김상희* · 김종현* · 박희대** · 이시형*** · 이진국****

(Sang-Hee Kim*, Jong-Heon Kim*, Hee-Dae Park**, Si-Hyung Lee***, Jeon-Kook Lee****)

Abstract

Film bulk acoustic resonator (FBAR) using AlN reactively sputtered at room temperature was fabricated. The FBAR is composed of a piezoelectric aluminium nitride thin film, top electrode of Al and bottom electrode of Au connected by a short (200 μ m) transmission line on both sides and reflector layers of SiO₂ - W pair. The active areas of Al and Au were patterned using 150 μ m diameter shadow mask. The series resonance frequency (fs) and the parallel resonance frequency (fp) were measured at 1.976 GHz and 2.005 GHz, respectively. The minimum insertion loss and return loss were 6.1 dB and 37.19 dB, and the quality factor (Q) was 4261.

Key Wards(중요용어) : FBAR, aluminium nitride, series resonance frequency, parallel resonance frequency, insertion loss, return loss, quality factor

1. 서 론

통신산업의 급속한 발전과 정보화 시대에 부응하여 세계적으로 이동 통신 서비스의 수요가 폭증하게 되었고 이 때문에 이동 통신용 시스템 및 휴대용 단말기의 RF 핵심 부품들에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 무엇보다도 지난 수 십년 동안 Si이나 GaAs 회로 기술의 개발은 회로 크기의 소형화 측면에서 크게 진보 되어왔다. 그러나 안테나, 전력 증폭기, 믹서 등과 같은 RF 핵심 부품과는 달리 필

터의 경우에는 휴대용 단말기에 내장되는 부품 중에서 아직까지도 다른 RF 부품들과 집적화 되지 못하고 외장 소자로 구현되고 있어서 휴대용 단말기의 소형, 경량화를 추구하는데 장애가 되고 있다. 현재 휴대용 단말기용 필터로 사용되고 있는 유전체 공진기 필터와 SAW(Surface Acoustic Wave)필터는 우수한 삽입손실과 감쇄특성을 갖고는 있으나 다른 주요 RF 부품과의 집적화가 불가능하므로 차세대 필터 소자로서 한계를 갖고 있다. 때문에 유전체 공진기 필터의 삽입손실 보다 우수하고, SAW 필터의 감쇄특성 보다 뛰어나면서 RF 능동 소자들과의 집적화가 가능하고 초경량 및 초소형으로 대량생산이 가능한 필터의 개발이 요구되어지고 이러한 요구에 부합되는 것이 체적 탄성파 공진기(FBAR)라 할 수 있다. FBAR 필터는 기존의 반도체 기판을 사용하므로 다른 RF 능동소자들과 통합이 가능하여 RF 시스템의 전단부를 단일 칩으로 구현 할 수 있으며 특히

* : 광운대학교 전자공학과
(서울특별시 노원구 월계동 447-1, Fax : 02-916-8014, E-mail : jhkim@daisy.kwangwoon.ac.kr)
** : Advanced New Technology 기술개발연구소
*** : 연세대학교 세라믹공학과
**** : 한국과학기술연구원 박막기술연구센터

기존의 필터에 비하여 크거나 제조 단가가 1/10 밖에는 되지 않아 차세대 이동 통신용 필터로 활용될 전망이 밝다.

본 연구에서는 상온에서 증착한 질화알루미늄(AIN)을 압전 박막으로 사용하고 텅스텐(W)과 이산화규소(SiO₂)를 격층으로 위치시킨 Bragg 반사층을 이용한 FBAR 제작에 필요한 재료들의 최적 증착 조건을 설정하고 이를 바탕으로 제작한 2-port FBAR의 초고주파 특성을 조사하여 그 응용 가능성을 평가해 보고자 한다.

2. 이 론

FBAR은 전극에 전기적 에너지를 인가하면 압전 층내에 시간적으로 변화하는 전계가 유기되고 이 전계는 압전 결합이 잘 이루어지도록 c축으로 우선배향된 압전 박막 내에서 두께 진동 방향과 동일한 방향으로 체적 탄성파(bulk acoustic wave)를 발생시키는 원리를 이용한 것이다. FBAR은 상·하부 전극층과 실질적인 공진 현상이 발생하는 압전층 및 체적 탄성파가 기판 쪽으로 전달되지 못하도록 막의 표면에서 반사시켜 에너지를 압전층에 모으는 반사층 부분으로 구성되어 있다. Bragg 반사층은 높은 acoustic 임피던스와 낮은 acoustic 임피던스를 갖는 서로 다른 물질을 격층으로 위치시키며 원하는 공진 주파수의 $\lambda/4$ 두께를 이용하여 반사율을 높이고 기판 쪽의 임피던스를 감소시킨다. FBAR을 구성하는 각 층들은 전기적 전송 선로의 해석과 비슷하게 탄성파(acoustic wave)에 대한 특성 임피던스와 위상 속도를 갖기 때문에 acoustic 전송 선로로 해석할 수 있다. 전기적 전송 선로 방정식에 의한 매질내의 임피던스를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$Z_i = Z_a \left[\frac{Z_s \cos \theta + j Z_a \sin \theta}{Z_a \cos \theta + j Z_s \sin \theta} \right] \quad (1)$$

Z_i , Z_a , Z_s 는 입력 임피던스와 특성 임피던스, 부하 임피던스를 각각 나타내며 θ 는 acoustic 위상을 나타낸다. 반사층의 두께를 $\lambda/4$ 로 할 경우, $\theta = \pi/2$ 이고 전기적 입력 임피던스는

$$Z_i = \frac{Z_a^2}{Z_s} \quad (2)$$

가 된다. 식 (2)로부터 압전층에서 기판을 바라본 입력 임피던스(Z_{ip})와 압전층을 포함한 Bragg 반사층

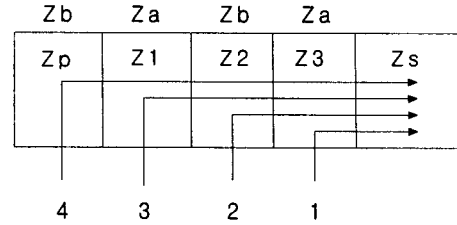


그림 1. Bragg 반사층을 이용한 FBAR의 기본 구조
Fig. 1. Basic configuration of Bragg reflector FBAR

의 정규화된 입력 임피던스(z)를 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$Z_{i(4)} = \left(\frac{Z_p}{Z_1} \right)^2 \left(\frac{Z_2}{Z_3} \right)^2 Z_s = Z_{ip} \quad (3)$$

$$z = \frac{Z_p}{Z_{ip}} = \left(\frac{Z_1}{Z_p} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \left(\frac{Z_3}{Z_2} \right) \left(\frac{Z_3}{Z_s} \right) \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{z-1}{z+1} \quad (5)$$

여기서 Z_p 는 압전층의 특성 임피던스, Z_{ip} 는 압전층에서의 입력 임피던스를 나타내며 Z_1 , Z_2 , Z_3 는 각 층의 acoustic 특성 임피던스이고 Γ 는 반사계수를 각각 나타낸다.

표 1. 다양한 반사층 구성 물질에 대한 층수에 따른 전체 반사계수

Table 1. Reflection coefficient of various Bragg reflector layers

	SiO ₂ /W	SiO ₂ /AlN	Al/W	Al/AlN
1-layer	-0.511	-0.511	-0.423	-0.423
2-layer	-0.972	-0.781	-0.966	-0.733
3-layer	-0.985	-0.878	-0.977	-0.816
4-layer	-0.999	-0.952	-0.999	-0.9257
5-layer	-0.9997	-0.9745	-0.9993	-0.9506
6-layer	-0.99998	-0.9902	-0.99997	-0.9809

상대적으로 임피던스 차가 큰 물질을 격층으로 증착할 경우 위 식은 층수가 증가할수록 입력 임피던스가 0에 접근하게되며 이때 반사계수는 -1에 가깝게 된다. 즉, 압전층을 통과한 탄성파에너지가 기판 방향으로 전달되지 못하고 반사층에서 모두 반사되어 압전층에 모이게됨으로서 효율적인 공진을 발생시킬

수 있다. 표 1은 식 (4)와 (5)를 이용하여 acoustic 임피던스차가 큰 서로 다른 물질에 대하여 층수에 따른 반사계수를 이론적으로 계산한 것이다.

3. 실험

FBAR의 기본 구조는 그림 2와 같다. 상부 전극은 Al, 하부 전극은 Au, 압전 박막은 AlN, 반사층으로 SiO₂와 W, 기판으로 Si를 사용하였으며 실험을 통한 최적의 증착조건을 표 2에 정리하였다. AlN 박막은 높은 경도와 열전도도, 열적·화학적 안정성과 함께 실리콘과 GaAs와 거의 유사한 열팽창율을 가지기 때문에 반도체 소자 분야에서 유망한 재료이며, 넓은 에너지 밴드갭을 가지므로 GaAs, InP등의 반도체 기판을 사용한 전자부품의 절연재료로서 매우 적합하여 선택하게 되었다.

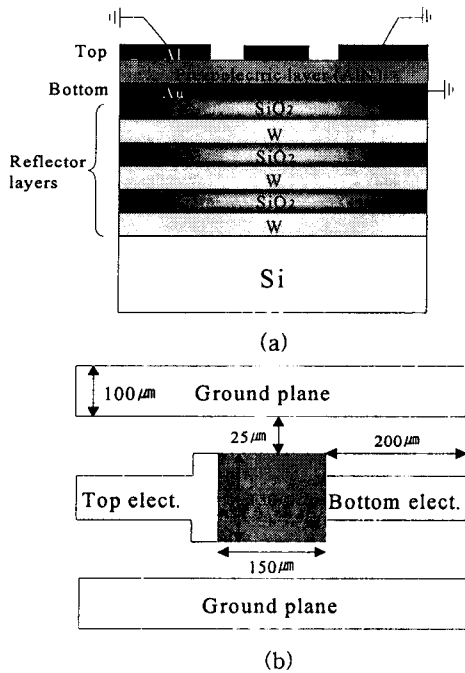


그림 2. Bragg 반사층을 이용한 FBAR의 구조 : (a) FBAR의 단면 구조 (b) FBAR의 평면 구조

Fig. 2. Schematic illustration of FBAR : (a) Cross-sectional view and (b) Top view of Bragg reflector FBAR

세정된 기판 위에 공진 주파수의 $\lambda/4$ 두께를 갖는

SiO₂와 W 박막을 교대로 6층을 증착하여 반사층을 제작하였다. 기판 쪽의 임피던스를 감소시켜 공기의 acoustic 임피던스처럼 만들어 주기 위해서 홀수층에는 SiO₂를, 짝수층에는 W를 위치시켰으며 증착 시 같은 챔버의 타겟 홀더에 W와 SiO₂를 각각 장착하여 진공이 유지된 상태에서 연속적으로 공정을 진행하였다. 이렇게 제작된 반사층 위에 Au 전극을 증착한 후, HMDS 처리를 하여 표면의 습기를 제거하였다. 그리고 PR을 도포하고 85 °C에서 1분 30초간 베이킹, 패턴노광, 습식 에칭 및 PR 제거과정 등을 통하여 하부 전극을 만들었으며 그 위에 AlN 박막을 원하는 공진 주파수의 $\lambda/2$ 두께로 증착하고 다시 Al 상부전극을 하부전극과 동일한 방법으로 제작하였다. 금속 전극의 두께에 따라 공진 특성이 변할 수 있으므로 각 전극의 두께는 1300Å 이하의 두께로 증착하였다.

표 2. AlN, W, SiO₂, Al, Au 박막들의 증착 조건
Table 2. Deposition conditions of AlN, W, SiO₂, Al and Au thin films

Film	AlN	W	SiO ₂	Au, Al
Dep. System	RF magnetron sputter			e-beam
Pressure(mTorr)	5	7.1		
Power(W)	200	150	300	3000
Gas flow rate	Ar+N ₂	Ar		
Distance(cm)	6	7.6		40
Dep. Time (min)	260	100	30	30

4. 결과 및 논의

다른 모든 조건들을 고정시키고 다양한 증착 압력의 변화에 따른 AlN 박막의 표면과 단면 형상을 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer)와 주사 전자현미경(scanning electron microscopy)을 이용하여 관찰하였다. 그림 3과 같이 증착 압력 5 mTorr에서 가장 결정성이 우수한 AlN 박막을 얻을 수 있었으며 낮은 증착 압력에서는 미세한 입자와 평탄한 표면 결정이 형성되었으나 높은 증착 압력에서는 빠른 증착 속도로 인해 입자크기가 크고 거칠기가 나쁜 표면결정이 형성됨을 관찰하였다. AlN 박막은 상온에서 5 mTorr의 압력, 200 W 전력, Ar과 N₂ 조성비 16:4, 기판과 타겟의 간격을 6 cm로 이격 시킨 후 260분간 증착하였다. 이렇게 증착된 AlN 박막의 단면과 표면 형상을 그림 4에서 보여주고 있다. SiO₂와 W 박막은 동일한 Ar 분위기에서 7.1 mTorr 증착 압력으로 150 W과 300 W의 전력, 100분과 30분

간 각각 증착하였다. Al과 Au 박막은 6 kV와 0.5 A로 기판을 15 rpm으로 회전시키면서 30분간 증착하였다. 그림 5는 제작된 FBAR의 전체 단면 형상과 반사층의 XRD 결과를 보여주고 있다. SiO₂는 비정질이므로 결정질인 W만이 40°에서 결정성을 나타내고 있다.

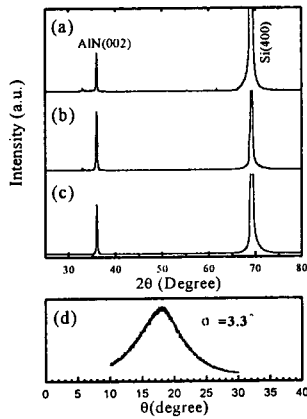


그림 3. 증착 압력 변화에 따른 AlN 박막의 X-선 회절 분석과 rocking curve
(a) 1mTorr, (b) 5mTorr (c) 10mTorr (d) 5 mTorr에서의 rocking curve
Fig. 3. XRD patterns and rocking curve of AlN films with various deposition pressure.
(a) 1mTorr, (b) 5mTorr (c) 10mTorr (d) rocking curve at 5 mTorr

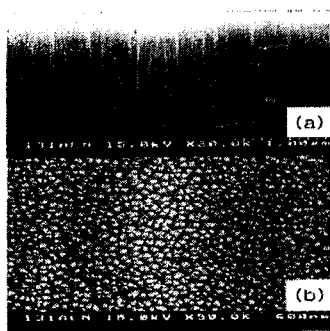


그림 4. AlN 박막의 단면 (a)과 표면 (b) SEM사진
Fig. 4. (a) Cross-section and (b) surface of SEM photographs of AlN thin film

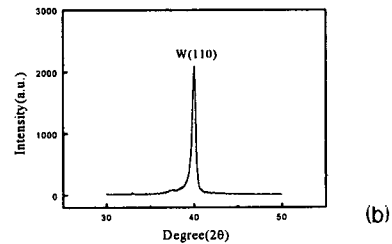
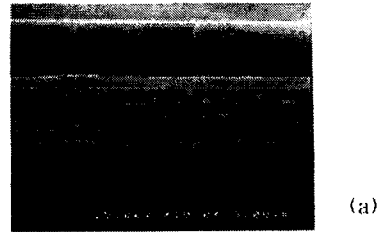


그림 5. (a) 제작된 FBAR의 전체 단면 (b) 반사층의 XRD 분석
Fig. 5. (a) Cross-section view of FBAR (b) XRD patterns of reflector layers

실험에 의한 최적의 증착 조건을 이용하여 그림 6과 같이 150 μ m \times 150 μ m의 공진 면적을 갖는 2-port FBAR을 제작하였으며 초고주파 특성은 HP 8753E 네트워크 분석기와 접지-신호-접지 구조의 CASCADE wafer probe station을 사용하여 그림 7과 같이 제작된 소자의 S₁₁(input reflection coefficient) 특성과 S₂₁(forward transmission coefficient) 특성을 측정하였다. 측정결과 중심 주파수 1.983 GHz에서 반사 손실은 37.19 dB이며 직렬 공진 주파수(f_s)는 1.976 GHz이고 병렬 공진 주파수(f_p)는 2.005 GHz에서 관찰되었다. 전기기계적 결합계수 (k_{eff}^2)는 3.529%이다. 전기기계적 결합계수는 직렬·병렬 공진 주파수의 상대적 주파수 차이를 결정함과 동시에 공극적으로 필터 제작 시 통과대역폭을 결정짓는 요소이기도 하다. 제작된 소자의 전극층과 압전층 표면에 시 발생한 난반사와 전극에 의한 부하 효과, 예칭 후 남겨진 기생성분들로 인해 삽입손실은 6.13 dB로 약간 크게 측정되었으며 중심 주파수가 2 GHz에서 24 MHz 정도 벗어난 것은 정확하고 균일한 두께로 압전 박막을 증착하지 못했기 때문으로 사료된다. S₁₁에서의 품질계수(Q-factor) Q값은 4261로 측정되어 단일 공진기로서는 우수한 특성을 나타내었으며 또한 스미스 도표를 이용하여 제작된 소자가 충분한 상하이

이루어졌음을 확인하였다.

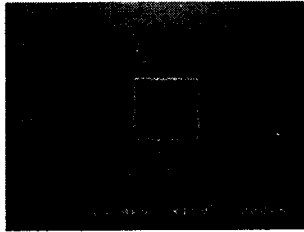
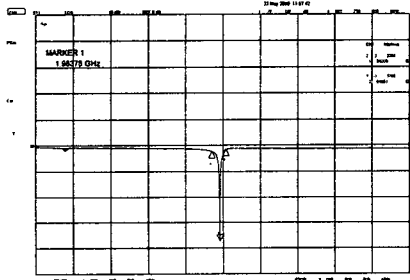
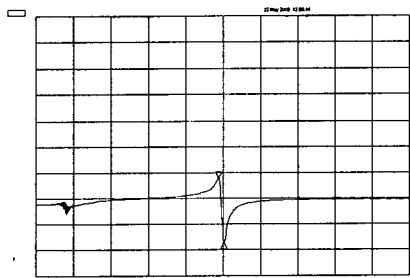


그림 6. 제작된 2-port FBAR의 평면 구조
Fig. 6. plane view of 2-port FBAR



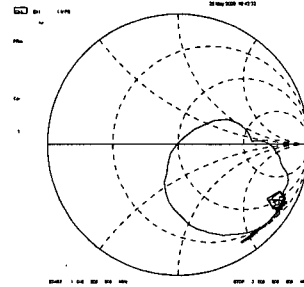
(a)



(b)

5. 결 론

본 연구에서는 Al, Au 박막과 AlN 박막으로 구성된 공진기 구조 하부에 SiO₂와 W를 조합한 6층의 반사층을 위치시킴으로서 acoustic wave를 효율적으로 압전층에 모아 공진을 발생시키는 체적 탄성과 공진기를 제작하여 재료적 특성 및 초고주파 특성을 측정·분석하였다.



(c)

그림 7. 측정된 FBAR의 주파수 특성 : (a) S₁₁ (b) S₂₁ (c) 스미스 도표

Fig. 7. Measured frequency characteristic of FBAR under frequency variation (from 1 GHz to 3 GHz) : (a) S₁₁ (input reflection coefficient) (b) S₂₁ (forward transmission coefficient) (c) Smith chart

AlN 박막은 상온에서 5 mTorr의 증착 압력, 전력 200W, Ar과 N₂비 16:4로 기판과 타겟의 간격을 6 cm로 이격 시킨 후 260분간 증착하였다. SiO₂와 W 박막은 동일한 Ar 분위기에서 7.1 mTorr 증착 압력으로 150 W와 300 W의 전력, 100분과 30분간 각각 증착하였다. Al과 Au 박막은 6 kV와 0.5 A로 기판을 15 rpm으로 회전시키면서 30분간 증착하였다. 제작된 소자는 중심 주파수 1.983 GHz에서 반사 손실은 37.19 dB이며 Q=4261로 측정되었다. 직렬 공진 주파수(f_s)는 1.976 GHz이고 병렬 공진 주파수(f_p)는 2.005 GHz에서 관찰되었으며 직렬·병렬 공진 주파수의 상대적 주파수 차이를 결정하는 전기기계적 결합계수 (k^2)는 3.529 % 이다. 삽입손실은 6.13 dB로 측정되었다.

위와 같은 결과로 박막의 정확한 두께 조절과 표면의 평탄도, 압전 박막의 우선배양성 등을 개선한다면 차세대 이동통신 IMT-2000 부품 중 특히 대역통과필터와 VCO용 공진기로 충분히 사용가능 하리라 예상된다.

참고 문헌

[1]. J. F. Rosenbaum, "Bulk Acoustic Wave Theory and Devices", Artech House, pp. 411-448, 1988

- [2]. 이재빈 외, "반사층을 이용한 FBAR(SMR)의 제조", 한국재료학회지, 9권 12호, pp. 1263-1269, 1999.
- [3]. 서병철, "Acoustic Bragg Reflector형 FBAR", 정보통신대학원 학위 논문, pp. 7-9, 1999.
- [4]. G. D. Mansfeld, "Bulk Acoustic Wave Microwave Composite Resonators and filters with Acoustic Isolation of Resonating Layers", IEEE Ultrasonic Symposium Proceeding, 1998.
- [5]. G. D. Mansfeld, "Theory and Numerical Analysis of Bulk Acoustic Wave Multilayer Composite Resonator Structure", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1997.
- [6]. K. M. Lakin, "Development of Miniature Filters for Wireless Applications", IEEE Trans. Microwave Theory. Tech. vol.43, no.12, pp. 2933-2939, 1995.
- [7]. K. M. Lakin, "Modeling of Thin Film Resonators and Filters," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 149-152, 1992
- [8]. K. M. Lakin, G.R. Kline and K.T. McCarron, "High-Q Microwave Acoustic Resonators and Filters," IEEE Trans. Microwave Theory. Tech. vol.41, no.12, pp. 2139-2146, 1993
- [9]. R. B. Stokes and J.D. Crawford, "X-band Thin Film Acoustic Filters on GaAs," IEEE Trans. Microwave Theory. Tech. vol.41, no.6/7, pp. 1075-1080, 1993