

수치적 계산을 이용한 Bragg Reflector형 체적 탄성과 공진기의 특성 분석

김주형*** · 이시형* · 안진호** · 주병권 · 이진국*†

한국과학기술연구원 정보재료 소자연구센터

*한국과학기술연구원 박막기술연구센터

**한양대학교 재료공학과

(2001년 8월 2일 접수; 2001년 10월 22일 승인)

Numerical Analysis of Bragg Reflector Type Film Bulk Acoustic Wave Resonator

Ju-Hyung Kim***, Si-Hyung Lee*, Jin-Ho Ahn**, Byeong Kwon Ju and Jeon-Kook Lee*†

Electronics Materials & Device Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

*Thin Film Technology Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

**Department of Material Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received August 2, 2001; Accepted October 22, 2001)

초 록

5.2 GHz 중심 주파수를 갖는 Bragg reflector형 FBAR를 제작하여 주파수 응답 특성을 측정하고, 공진기 구조에서 각 층의 탄성 손실(acoustic loss)을 고려한 주파수 응답의 수치적 계산을 통해서 그 특성을 분석하였다. W과 SiO₂ 쌍을 선택하여 RF sputtering법으로 총 9층의 Bragg reflector를 제작하였고, 공진기의 압전층으로는 pulsed dc 전원에 의한 sputtering법으로 AlN과 Al 전극을 증착하여 제작하였다. 제작된 공진기의 반사손실(S₁₁)은 중심 주파수 5.38 GHz에서 12 dB이었고 직렬 공진 주파수(f_s)는 5.376 GHz, 병렬 공진 주파수(f_p)는 5.3865 GHz로 관찰되었다. 공진기의 성능지수인 유효 전기기계결합계수(K_{eff}²) 값이 약 0.48%, 품질계수(Q_s) 값이 411이었다. 수치적으로 계산된 주파수 응답 특성으로 부터 AlN 박막의 acoustic 상수들과 Bragg reflector의 반사계수를 도출한 결과 AlN 박막의 material acoustic impedance와 wave velocity는 AlN 고유의 값보다 감소되었으며, AlN 박막의 전기기계 결합계수(K²)값은 c축 배향성 저하에 의해 매우 작은 값(0.49%)을 가졌다. 중심 주파수 대역에서 Bragg reflector의 반사계수는 약 0.99966으로 계산되었으며 약 2.5 GHz에서 9.5 GHz까지의 넓은 반사대역을 나타내었다.

ABSTRACT

Bragg reflector type FBAR was fabricated on the Si(100) substrate. We measured a frequency response of the resonator at 5.2 GHz and analyzed it by numerical calculation considering actual acoustic losses of each layer in the structure. We fabricated nine layer Bragg reflector of W-SiO₂ pairs using r.f. sputtering method and fabricated AlN piezoelectric and Al electrodes using pulsed dc sputtering. The return loss(S₁₁) of the fabricated Bragg reflector type FBAR was 12 dB at 5.38 GHz and the series resonance frequency(f_s) was 5.376 GHz and the parallel resonance frequency(f_p) was 5.3865 GHz. Effective electro-mechanical coupling constant (K_{eff}²) and Quality factor(Q_s), the Figures of Merit of the resonator, were about 0.48% and 411, respectively. We extracted acoustic parameters of AlN piezoelectric and reflection coefficient of the Bragg reflector by numerical calculation. We could know that material acoustic impedance and wave velocity of AlN piezoelectric decreased for intrinsic value and the electromechanical coupling constant(K₂) value was very low owing to the poor quality of the AlN piezoelectric. Reflection coefficient of Bragg reflector was 0.99966 and reflection band was very wide from 2.5 to 9.5 GHz.

Key words : Bragg reflector, FBAR, AlN, Pulsed dc

1. 서 론

최근 정보통신 산업의 급속한 발전과 더불어 정보를 전달할 수 있는 통신장비의 수요가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이 때문에 이동 통신용 시스템 및 휴대용 단말기의 RF 핵심 부품들에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그

러나, 안테나, 전력증폭기, 믹서 등과 같은 RF 핵심부품과는 달리 필터의 경우에는 아직까지 on-chip화가 되지 못하고 외장 소자로 구현되고 있어서 단말기의 소형 경량화의 장애로 남아 있는 실정이다. 수동소자인 필터가 능동소자와 함께 집적화가 가능해 지면 수 GHz의 고주파대역에서의 낮은 전력 소모와 낮은 삽입 손실 그리고 주파수 선택도가 큰 고품질의 필터 구현이 가능해 질 것이다. 현재에는 유전체 공진기와 표면 탄성파(SAW) 공진기를 이용한 필터가 이용

†Corresponding author : jkleemc@kist.re.kr

되고 있다. 그러나, 유전체 공진기의 크기와 비용, 그리고 표면 탄성과 필터의 전극 패턴 형성의 제약에 의한 초고주파 대역 필터의 한계와 높은 가격의 단결정 압전 기판의 요구 및 능동 부품과의 집적화의 불가능으로 인해 단말기의 저 비용 및 소형화 추세를 만족시켜 주기 어려운 실정이다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 압전 박막에서 두께 방향으로의 체적탄성파를 이용한 박막형 공진기인 FBAR(Film Bulk Acoustic wave Resonator)의 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.^{1,2)}

FBAR의 기본 구조는 전극-압전 박막-전극으로 이루어지며 압전 특성으로 인한 전기기계결합(electromechanical coupling)에 의해 압전층 내에서 정재파(standing wave)가 형성된다. 그러나 압전층 내에 정재파가 형성되기 위해서는 압전층의 상하표면이 완전한 반사를 제공하는 공기 또는 진공과 경계 면을 이루어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 지금까지의 많은 FBAR 관련 연구는 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 공정의 발전에 따라 membrane을 이용한 공진기 제조에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근에는 견고한 소자의 형성, 동일 면적에 따른 생산성 차이, 공정의 간략화 등의 이유로 인해 $\lambda/4$ 두께의 material acoustic impedance 차이가 큰 재료들을 격층으로 증착하여 기판으로 향하는 acoustic impedance를 변화시킴으로 탄성파를 반사시켜 acoustic 에너지가 압전층 내에 모이게 하는 Bragg reflector를 이용한 FBAR의 연구가 많은 관심을 끌고 있다.³⁾ 그러나, Bragg reflector형 FBAR의 공진 특성 분석에 관한 연구는 아직 부족한 상태이다.

본 연구에서는 5.2 GHz의 중심 주파수를 갖는 Bragg reflector형 FBAR를 제작하고 그 주파수 응답 특성을 측정하였고 공진기의 성능지수인 전기기계결합계수와 품질계수를 구하였다. 공진기를 이루는 각 층의 실제적인 탄성 손실(acoustic loss)을 고려하여 주파수 응답 특성을 수치적으로 계산하였고 압전 박막의 acoustic 상수들과 Bragg reflector의 반사특성을 분석하였다.

2. 실험방법

Bragg reflector형 FBAR의 제작과정은 W과 SiO₂로 이루어진 다층박막의 제조, 압전층으로 이용될 AIN 박막 및 Al 전극의 제조와 전극의 패턴 형성 공정으로 구분된다. Bragg reflector 제작을 위해 W과 SiO₂ 박막을 RF sputtering 방법으로 Si(100) 기판 위에 장비의 진공을 깨지 않고 연속적으로 증착하여 9층의 박막을 제조하였다. 압전층 형성을 위해 AIN 박막과 Al 박막을 pulsed dc 전원에 의한 sputtering 방법을 이용하여 Si(100)기판 위에 제작된 Bragg reflector 위에서 상온 증착하였다. 각 박막의 증착 조건을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Al 상부전극의 패턴 형성을 위해 photo-lithography 공정을 이용하여 PR 패턴을 형성한 후

Table 1. Deposition Conditions of W and SiO₂ Thin Films by RF Magnetron Sputtering System

Parameters	Conditions	
	W	SiO ₂
Target Material/Size	W/4"	SiO ₂ /4"
Base Pressure	>5.0 × 10 ⁻⁶ Torr	>5.0 × 10 ⁻⁶ Torr
Working Pressure	1 mTorr	1 mTorr
Gas Flow Rate	Ar=30 sccm	Ar/O ₂ =36/4 sccm
RF Power	150 W	250 W
Distance between Target and Substrate	6.5 cm	6.5 cm
Substrate Temperature	300°C	RT

Table 2. Deposition Conditions of Al and AlN Thin Films by Pulsed DC Sputtering

Parameters	Conditions	
	Al	AlN
Target Material/Size	Al/2"	
Base Pressure	>5.0 × 10 ⁻⁷ Torr	>5.0 × 10 ⁻⁷ Torr
Working Pressure	5 mTorr	3 mTorr
Gas Flow Rate	Ar=10 sccm	Ar/N ₂ =8/2 sccm
Pulsed DC Power	30 W	150 W
Duty Cycle	90%	90%
Pulse Frequency	100 kHz	100 kHz
Distance between Target and Substrate	6 cm	6 cm
Substrate Temperature	RT	RT

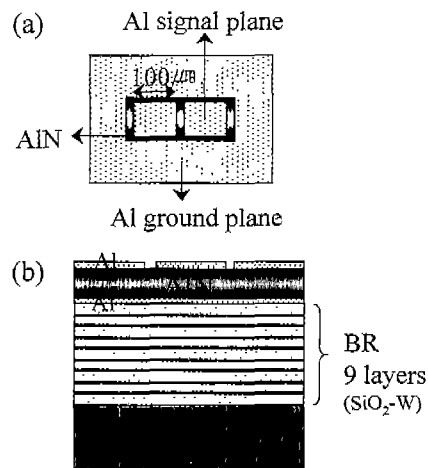


Fig. 1. Schematic representation of the Bragg reflector FBAR structure: (a) Top view and (b) Cross sectional view.

lift-off 공정을 이용하여 Al 상부 전극의 패턴을 형성하였다. Fig. 1에 Bragg reflector형 FBAR의 구조를 도식적으로 나타내었다. 압전층은 $\lambda/2$ 두께, 반사층은 각 $\lambda/4$ 두께로, 5.2

Table 3. Acoustic Parameters of Each Material in the Structure Used in the Design of the Bragg Reflector FBAR⁴⁾

	Stiffness, c (GPa)	Density, ρ (kg/m^3)	Acoustic wave velocity, v_t (m/s)	Material acoustic impedance, Z ($10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$)
AlN	395	3260	11007	36
Al	110	2700	6382	17
W	526	19400	5207	101
SiO ₂ (Fused)	45	2250	4472	10

GHz의 중심 주파수에 맞게 설계되었다. Al 상부 전극 패턴은 1-port 측정을 위하여 Ground-Signal-Ground 형태로 제작되었고 선폭은 20 μm , Signal plane의 면적은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 로 제작되었다. 설계에 이용된 각 물질의 acoustic 상수들을 Table 3에 나타내었다.

제작된 Bragg reflector FBAR를 구성하는 각 층의 특성을 분석하였다. 먼저 각 층의 결정 구조를 분석하기 위해 Rigaku사의 Cu-K α X-Ray Diffractometer(XRD)를 이용하였고, 미세 조직과 두께를 관찰하기 위해 Hitachi사의 Field Emission Scanning Electron Microscopy(FESEM)와 α -step (Tencor Inc)을 이용하였다.

HP사의 HP 8753D, HP 8510C Network Analyzer와 G-S-G Pico probe(GGB Inc.)를 이용하여 narrow band와 wide band의 S_{11} parameter를 측정하였다. 측정 전에 Pico probe와 Network Analyzer는 calibration substrate를 이용하여 open, short, load에 대해 calibration되었다. Bragg reflector FBAR의 input electrical impedance는 측정된 반사 손실(return loss: S_{11})로부터 다음 식(1)에 의해 계산되었다.

$$Z_{in,e} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (1)$$

여기서, Z_0 는 50 Ω 이다. 그리고, Bragg reflector형 FBAR의 주파수 응답 특성을 수치적으로 계산하기 위해 Matlab 프로그램을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 Bragg reflector형 FBAR의 결정구조와 미세 조직을 Fig. 2에 나타내었다. 압전층으로 이용된 AlN 박막의 경우 XRD 패턴에서 (002) 피크만이 관찰되어 c 축 성장된 것을 알 수 있었고 SEM morphology로부터 치밀한 주상 구조로 성장한 것을 알 수 있었다. Bragg reflector의 경우 W 박막은 거의 bcc phase(α -W)로 형성되었으며 뚜렷한 주상 성장을 하였고 SiO₂ 박막은 비정질 구조로 형성되었다.

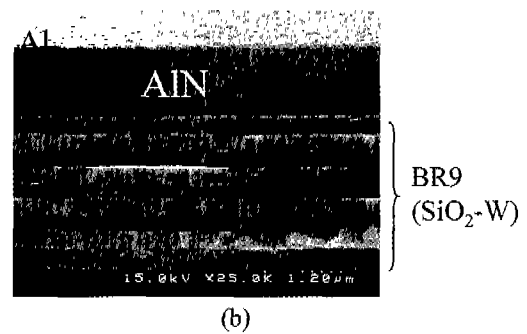
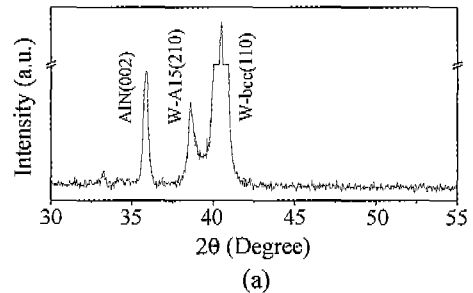


Fig. 2. Crystal structure and microstructure of the Bragg reflector FBAR fabricated on Si(100) substrate: (a) X-ray diffraction pattern and (b) Cross-sectional SEM micrograph.

Stress에 의한 crack 및 각 계면에서 박리가 발생하지 않았고 9층까지 증착되었다.

Bragg reflector형 FBAR의 narrow band와 wide band에서의 측정된 반사 손실(return loss: S_{11})을 Fig. 3에 나타내었다. 기본 모드(fundamental mode)의 공진 주파수에서 반사 손실(S_{11})이 감소되는 것을 알 수 있다. 반사 손실(S_{11})의 크기는 중심 주파수 5.382 GHz에서 12 dB였다. 제조된 AlN 박막이 중심 주파수 5.2 GHz에 대한 두께 보다 더 얇게 증착되어 중심 주파수는 다소 증가되었다. Wide band response로부터 기본 모드의 공진을 확인할 수 있었고 다른 기생 모드는 발생하지 않았다.

측정된 반사 손실(S_{11})로부터 식(1)에 의해 input electrical impedance($Z_{in,e}$)를 계산하여 narrow band와 wide band에서의 input electrical impedance를 Fig. 4에 나타내었다. Bragg reflector형 FBAR의 기본 모드에서 직렬 공진 주파수(f_s)는 5.376 GHz, 병렬 공진 주파수(f_p)는 5.3865 GHz이었다. 압전층으로 이용된 AlN 박막의 유전특성으로 인해 주파수 증가에 따른 input electrical impedance($Z_{in,e}$)의 감소가 wide band response에 나타나 있다.

Bragg reflector형 FBAR를 이루는 각 층은 물질 고유특성과 제조 공정에 의존하는 박막 특성에 의해 실제적인 탄성 손실을 갖게되며 이러한 탄성 손실은 주파수 증가에 따라 주파수의 자승에 비례하여 증가하며 공진기의 주파수 응답 특성에 영향을 미친다.⁵⁾ 따라서, 측정된 Bragg reflector형 FBAR의 주파수 응답 특성을 분석하기 위해 증착 되어

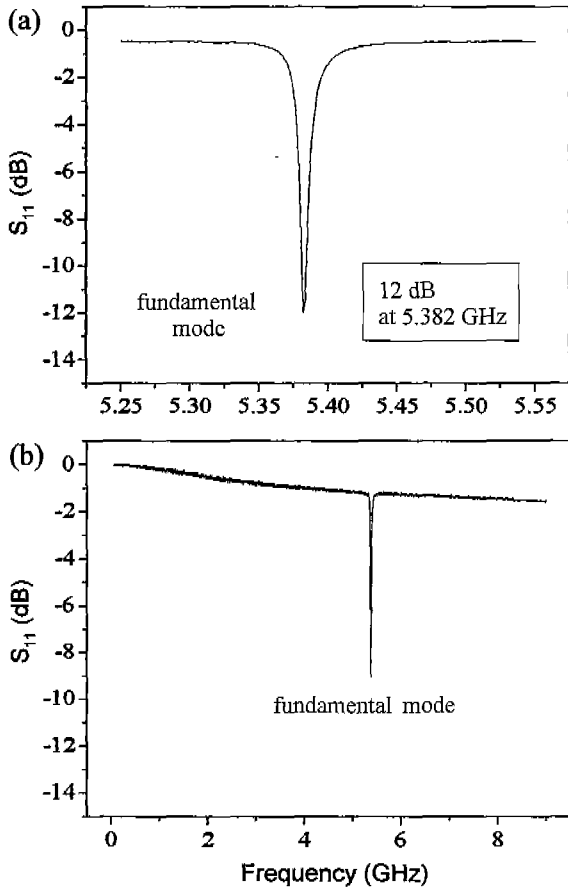


Fig. 3. The measured return loss (S_{11}) of Bragg reflector FBAR: (a) Narrow band response and (b) Wide band response.

진 각 층의 탄성 손실을 고려한 수치적 계산을 실행하여 Bragg reflector형 FBAR의 input electrical impedance를 계산하였다.

Bragg reflector형 FBAR의 구조에서 input electrical impedance($Z_{in,e}$)는 탄성파에 대한 압전층 상하부 계면에서의 경계조건을 이용하여 다음의 식(2)로 유도되어진다.⁶⁾

$$Z_{in,e} = \frac{1}{i\omega C_0} \left[1 + \frac{K^2}{1+K^2} \frac{1}{bl} \times \frac{i(Z_t + Z_b)Z_p \sin bl - 2Z_p^2(1 - \cos bl)}{(Z_p^2 + Z_t Z_b) \sin bl - i(Z_t + Z_b)Z_p \cos bl} \right] \quad (2)$$

여기서 Z_t 와 Z_b 는 각각 상부 전극과 하부 전극에서의 input acoustic impedance이다. 그리고 하부 전극의 input acoustic impedance는 기관 위에 위치한 다층의 반사층에 의해 부하를 받는다. K 는 압전 물질의 전기기계결합상수 (electromechanical coupling constant)이며 C_0 는 electrical capacitance, b 는 complex wave vector, Z_p 는 압전 물질의 material acoustic impedance, l 은 압전 박막의 두께이다. 공

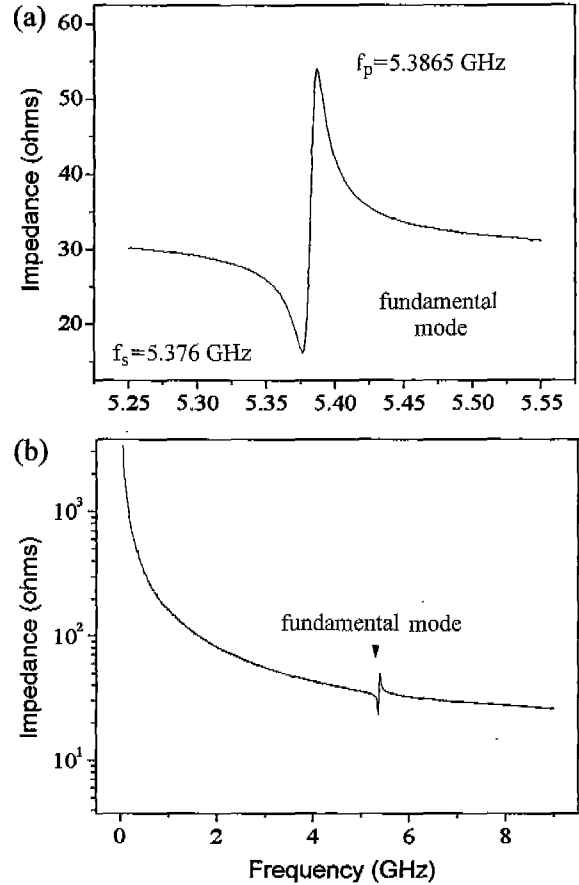


Fig. 4. The input electrical impedance of the Bragg reflector FBAR: (a) Narrow band response and (b) Wide band response.

진기 구조에서 모든 비압전층에서의 input acoustic impedance는 전송 선로 이론을 통해 다음의 식(3)을 통해 알 수 있다.^{7,8)}

$$Z_{in}^{(i)} = Z_c^{(i)} \frac{Z_{in}^{(i-1)} \cos b_i l_i + i Z_c^{(i)} \sin b_i l_i}{Z_{in}^{(i)} \cos b_i l_i + i Z_c^{(i-1)} \sin b_i l_i} \quad (3)$$

여기서 $Z_c^{(i)}$ 는 i 번째 층의 material acoustic impedance이며, $Z_{in}^{(i-1)}$ 는 $i-1$ 번째 층의 input acoustic impedance 이다. b_i 와 l_i 는 각각 i 번째 층의 complex wave vector와 그 층의 두께이다. $Z_{in}^{(0)} = Z_s$, 그리고 $i = 0, 1, \dots, n$ 이다. Complex wave vector(b_i)는 탄성 손실을 고려하여 아래 식(4)에 의해 표현된다.⁶⁾

$$b_i = q - i\alpha \quad (4)$$

여기에서 q 는 phase constant($2\pi/\lambda$), α 는 탄성 손실을 의미하는 감쇄 상수(attenuation constant)이다.

각 물질의 주파수 변화에 따른 고유의 탄성 손실을 고려하여 감쇄 상수(α)를 그 물질 층의 complex wave vector에 식(4)를 이용하여 포함시켰다. Table 4에 각 물질의 감

Table 4. Attenuation Constant (α) of Each Layer in the Structure Used in Calculation of the Input Impedance of the Bragg Reflector FBAR⁴⁾

	Attenuation Constant, α [dB/ μ s], at 1 GHz
AlN	5
Al	13.63
W	0.14
SiO ₂	43.86

쇄 상수(α)를 나타내었다. 그리고 분석되어진 각 층의 재료적 특성 및 박막의 두께 그리고 상부 전극 패턴 등을 토대로 수식의 각 변수들을 정하고 식(2)와 (3)을 이용하여 Bragg reflector형 FBAR의 input electrical impedance ($Z_{in,e}$)와 phase를 계산하였다.

Fig. 5에 narrow band에서 input electrical impedance ($Z_{in,e}$)와 phase를 측정된 결과와 수식에 의해 계산된 결과를 비교하여 나타내었다. 측정된 결과와 수식에 의해 계산된 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

먼저, 측정되어진 narrow band에서 input electrical impe-

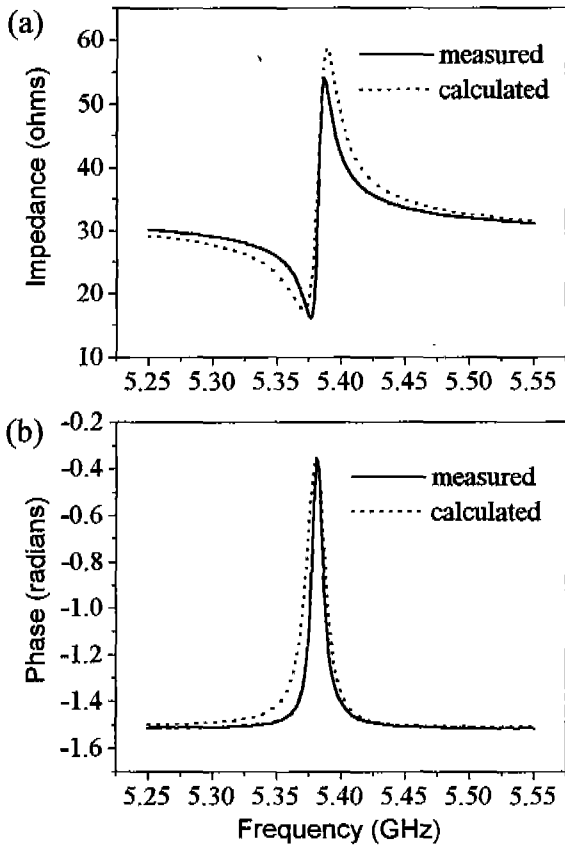


Fig. 5. Measured and calculated frequency response of the Bragg reflector FBAR: (a) Input electrical impedance and (b) Phase of input electrical impedance.

Table 5. Comparison of Acoustic Parameters of the Piezoelectric AlN between Bulk Value and Calculated Value

	Bulk values	Calculated values
Material Acoustic Impedance (Z_p)	$36 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$33.4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Acoustic Wave Velocity (v_p)	11007 m/s	10210 m/s
Dielectric Constant (ϵ_e)	8.5~12	9.56
Electromechanical Coupling Constant (K^2)	6.4%	0.49%

dance($Z_{in,e}$)와 phase 특성으로 부터 공진기의 성능지수인 유효 전기기계 결합계수(K_{eff}^2)와 품질계수(Q_s)를 다음 식(5)와 (6)에 의하여 계산하였다.

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

$$Q_{s,p} = \frac{f_s d < Z_{in} }{2 \frac{df}{df} \Big|_{f_s=f_{s,p}}} \quad (6)$$

제작된 Bragg reflector형 FBAR의 유효 전기기계 결합계수(K_{eff}^2) 값은 약 0.48%로 매우 낮은 값을 나타내었고, 품질계수(Q_s) 값은 411로 5 GHz 대역에서의 탄성 손실을 고려하면 우수한 값을 나타내었다.

수식에 의해 계산된 Bragg reflector형 FBAR의 주파수 응답 특성으로 부터 도출되어진 AlN 압전 박막의 acoustic 상수들을 Table 5에 나타내었다. AlN 박막의 material acoustic impedance와 wave velocity는 AlN 고유의 값보다 감소되었고 유전상수는 비슷한 값을 보였지만 전기기계 결합계수(K^2) 값은 이상적인 값에 비해 상당히 감소되었다. AlN 박막의 전기기계 결합계수(K^2)는 그 물질의 압전 상수에 비례하며 압전 상수의 값은 박막의 c축 배향성에 의존한

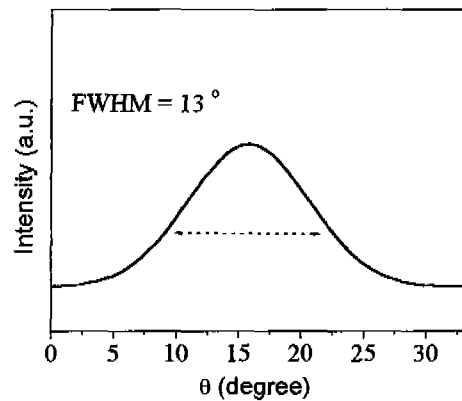


Fig. 6. Rocking curve of AlN (002) peak fitted with Gaussian function.

다.⁹⁾ AlN 박막의 c축 배향성을 알아보기 위해 측정된 rocking curve 결과를 Fig. 6에 나타내었다. FWHM이 약 13°로 매우 낮은 c축 배향성을 나타내었다. 공진기의 대역폭을 결정짓는 유효 전기기계 결합계수(K_{eff}^2) 값은 압전체로 이용된 박막의 압전 특성에 의해 결정된다. 결국, 매우 낮은 유효 전기기계 결합계수(K_{eff}^2) 값은 압전층으로 이용된 AlN 박막의 c축 배향성 저하에 의한 것으로 분석된다.

한편, Bragg reflector의 narrow band와 wide band에서의 반사 특성을 식(7)에 의해 계산하여 Fig. 7에 나타내었다.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_p}{Z_{in} + Z_p} \quad (7)$$

여기서 Z_{in} 은 식(3)에 의해 계산된 반사층의 input acoustic impedance이고 Z_p 는 AlN 압전 박막의 material acoustic impedance이다.

중심 주파수 대역에서 Bragg reflector의 반사계수는 약 0.99966으로 우수한 반사 특성을 나타내었고 wide band response로 부터 약 2.5 GHz에서 9.5 GHz까지의 넓은 반사 대역을 갖는 것을 알 수 있었다.

Bragg reflector의 input acoustic impedance가 0 또는 ∞ 에 접근할 경우 압전층에서 발생한 탄성파에 대한 반사층

의 반사 계수는 식(7)에 의해 -1 또는 1에 가까운 값을 갖게되어 압전층에서 발생한 탄성파는 이상적인 경우 공기와 의 계면에서처럼 완전한 반사에 의해 압전층내에서 정재파를 형성하게 된다. 하지만 반사되지 않은 탄성파는 그 만큼의 손실된 acoustic 에너지에 포함되며 공진기의 품질계수 (Q_s) 값을 감소시킨다. 이러한 Bragg reflector의 반사 계수는 반사층의 층수가 증가할수록, 반사층을 이루는 두 물질 간의 material acoustic impedance 차이가 클수록 높은 반사 효율을 나타낸다. 따라서 제작된 Bragg reflector형 FBAR의 우수한 품질계수(Q_s)는 acoustic impedance 차이가 매우 큰 W과 SiO₂ 쌍으로 이루어진 총 9층의 Bragg reflector의 높은 반사 효율에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

R.F. sputtering법을 이용하여 W과 SiO₂의 쌍으로 이루어진 총 9층의 Bragg reflector를 제작하였고 r.f. 및 pulsed dc 전원에 의한 sputtering법으로 AlN과 Al 전극을 증착하여 5.2 GHz 대역에서의 Bragg reflector형 FBAR를 제작하였다. Bragg reflector형 FBAR의 반사손실(S_{11})은 중심 주파수 5.38 GHz에서 12 dB이었고 직렬 공진 주파수(f_s)는 5.376 GHz, 병렬 공진 주파수(f_p)는 5.3865 GHz로 관찰되었다. 공진기의 성능지수인 유효 전기기계결합계수(K_{eff}^2) 값이 약 0.48%, 품질계수(Q_s) 값이 411이었다. 공진기 구조에서 각 층의 acoustic loss를 고려한 주파수 응답 특성의 수치적 계산을 통해서 실제 증착된 AlN 박막의 acoustic 상수들과 Bragg reflector의 반사계수를 도출할 수 있었다. AlN 박막의 유전상수는 고유의 값과 비슷한 값을 보였으며 material acoustic impedance와 wave velocity는 AlN 고유의 값보다 약간 감소되었고 AlN 박막의 c축 배향성 저하에 의해 전기 기계 결합계수(K_2) 값은 이상적인 값(6.4%)에 비해 매우 작은 값(0.49%)을 나타내었다. 중심 주파수 대역에서 Bragg reflector의 반사계수는 약 0.99966으로 계산되었으며 약 2.5 GHz에서 9.5 GHz까지의 넓은 반사대역을 나타내었다. 5 GHz 대역에서 우수한 Q_s 값은 acoustic impedance 차이가 큰 W과 SiO₂의 쌍으로 이루어진 총 9층의 다층구조 형성에 따른 높은 반사 계수를 갖는 Bragg reflector 구현에 의한 결과로 판단된다.

REFERENCES

1. S. V. Krishnaswamy and J. Rosenbaum, "Compact FBAR Filters Offer Low Loss Performance," *Microwaves & RF*, Sep., 127-135 (1991).
2. S. H. Lee and J-K. Lee, "AlN-Si Thin Film Bulk Acoustic Over-moded Resonator," *J. Kor. Ceram. Soc.*, 37(12), 1198-1203 (2000).
3. W. E. Newell, "Face-mounted Piezoelectric Resonators," *Proc.*

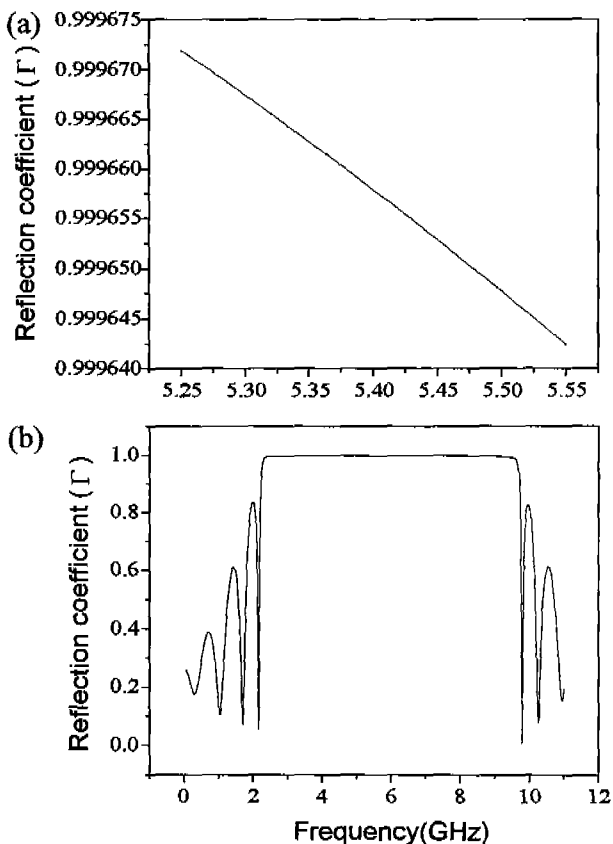


Fig. 7. Calculated reflection coefficient of Bragg reflector: (a) Narrow band and (b) Wide band.

- IEEE*, **53**, 575-581 (1965).
4. G. D. Kino, "Acoustic Waves Devices, Imaging, and Analog Signal Processing," Prentice-Hall, Inc., (1987).
 5. B. A. Auld, in "Acoustic Fields and Waves in solids," vol.I I. Malabar, FL: Krieger Publishing, 365-386 (1990).
 6. G. D. Mansfeld, "Mode Selection for a Piezoelectric Layer in a Bulk-acoustic-wave Composite Acoustic Resonator," *Tech. Phys. Lett.*, **23**(10), 750-752 (1997).
 7. G. D. Mansfeld and S. G. Alekseev, "Theory and Numerical Analysis of Bulk Acoustic Wave Multilayer Composite Resonator Structure," *Ultrasonics, Ferroelectrics, And frequency of control society*, 69-72 (1999).
 8. G. D. Mansfeld, S. G. Alekseev and I. M. Kotelyanskii, "Bulk Acoustic Wave Microwave Composite Resonators and Filters with Acoustic Isolation of Resonating Layers," *1998 IEEE Ultrasonics Symposium*, 963-967 (1998).
 9. R. S. Naik, "Bragg Reflector Thin-film Resonators for Miniature PCS Bandpass Filters", Ph. D. Thesis, Dept. of Material Science and Engineering, Masachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, (1998).