

## 체적탄성과 공진기 브라그 반사층 적용을 위한 텅스텐 박막의 미세구조 조절에 대한 연구

강성철\*\*\* · 이시형\* · 박종완\*\* · 이전국\*†

\*한국과학기술연구원 박막재료연구센터

\*\*한양대학교 재료공학과

(2003년 2월 19일 접수; 2003년 3월 10일 승인)

## Microstructure Control of Tungsten Film for Bragg Reflectors of Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonators

SungChul Kang,\*\*\* Si-Hyung Lee,\* Jong-Wan Park,\*\* and Jeon-Kook Lee\*†

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

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

(Received February 19, 2003; Accepted March 10, 2003)

### 초 록

직류 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 증착압력과 기판온도변화에 따른 텅스텐 박막의 미세구조 변화에 대하여 연구하였다. 기판온도 400°C에서 증착 압력의 감소에 따라 텅스텐 박막의 미세구조가 zone I에서 zone T로 변화하였다. 텅스텐 박막의 미세구조 비저항과 결정배향성은 상관관계를 보였으며, 미세구조가 zone T 영역에서 낮은 비저항( $10 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ )과 99%의 (110)면 우선 배향성을 나타내었다. zone T 영역에 해당하는 미세구조를 지니는 텅스텐 박막을 이용한 박막형 공진기는 텅스텐 박막의 높은 탄성저항과 매끈한 표면으로 인해 494의  $Q_s$ 와 5.50%의  $K_{\text{eff}}^2$  값의 우수한 공진특성을 보였다.

### ABSTRACT

The microstructures of tungsten films were controlled by changing the sputtering pressure and substrate temperatures during D.C. sputter deposition. As the sputtering pressures were decreased, the sputtered models of the tungsten films were changed from the zone I model to zone T model. The tungsten film having zone T model microstructure shows a resistivity of  $10 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$  and (110) preferred orientation. FBAR with Bragg reflector composed of  $\text{SiO}_2$  and tungsten films having zone T model microstructure shows quality factor,  $Q_s$ , of 494 and  $K_{\text{eff}}^2$  of 5.5% due to the high acoustic impedance and the smooth surface.

**Key words :** Tungsten, Microstructure, FBAR, Resonator, Resistivity, D.C. magnetron sputtering

### 1. 서 론

텅스텐 박막은 X-ray mask의 흡수층, 박막회로의 전극과 브라그 반사층형 박막형 공진기(Film Bulk Acoustic wave Resonator; FBAR)에 적용된다. Bragg reflector형 FBAR는 높은 탄성과 저항을 갖는 재료와 낮은 탄성과 저항을 갖는 재료의 적층으로 형성되는 탄성과 반사층을 이용한다. 이중 높은 탄성과 저항을 갖는 층으로 큰 밀도를 갖는 텅스텐 박막이 사용된다.<sup>1)</sup> 반사층내의 텅스텐 박막이 가지는 탄성과 저항은 밀도와 탄성파 속도에 의존하기 때문에 높은 탄성과 반사효율을 지니기 위해서는 텅

스텐 박막은 높은 밀도를 가져야 한다.<sup>2)</sup> 텅스텐 박막은 높은 경도를 갖는 재료로써 다층박막의 형성 시 박막내의 잔류응력이 문제가 되며, 표면 거칠기에 의한 탄성과 산란의 발생으로 공진 특성의 저하를 가져오게 된다.<sup>3)</sup> 그러므로 텅스텐 박막은 낮은 잔류응력과 높은 밀도 그리고 평탄한 표면을 지니는 특성의 박막이 요구된다. 여러 연구자들의 보고에 의하면 스퍼터링법에 의해 성장된 텅스텐 박막은 미세구조와 상에 따라서 내부응력, 비저항과 밀도가 크게 차이를 나타낸다. 그리고 텅스텐 박막의 미세구조와 상은 스퍼터링법의 증착압력과 기판온도에 의해 조절된다. Thornton이 제안한 zone model<sup>4)</sup>에 의하면 Fig. 1에서와 같이 미세구조는 기판온도에 따라 zone I에서 zone III으로 변하며, 증착압력이 낮을수록 텅스텐 박막의 결정립은 작아지며 일정 온도 구간에서 압력이 작아질수록 zone I에서 zone T로 변한다.

†Corresponding author : Jeon-Kook Lee

E-mail : jkleemc@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-5563 Fax : +82-2-958-6851

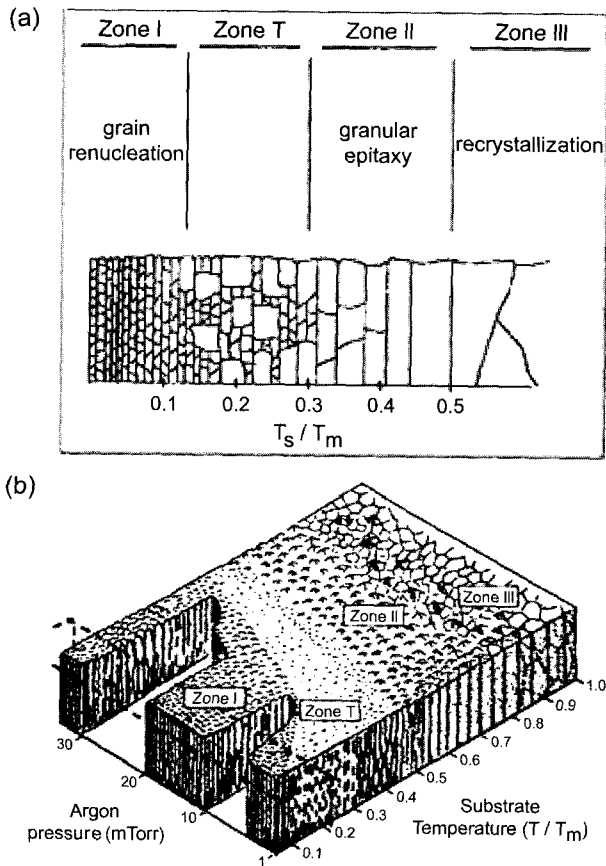


Fig. 1. Thornton's structure zone diagram for magnetron sputtered films.<sup>4)</sup> (a) as a function of the homologous temperature  $T_s/T_m$  and (b) zone diagram.

본 연구에서는 증착압력과 기판온도 변화에 따른 텅스텐 박막의 미세구조와 상, 결정배향성, 비저항과의 상관관계를 평가하여 FBAR 브라그 반사층의 특성을 개선하였다. FBAR 소자의 공진 특성을 확인하기 위해 W-SiO<sub>2</sub> 다층박막으로 형성된 탄성과 반사층을 이용하여 FBAR 공진 특성을 확인하였다.

## 2. 실험방법

텅스텐 박막은 4 인치 크기의 순도 99.95%의 텅스텐 타겟으로부터 직류 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 기판으로는 p-type Si(100)과 SiO<sub>2</sub>/Si(100)를 이용하였다. 챔버의 초기압력은  $5 \times 10^{-6}$  Torr이하로 유지하였고, 텅스텐 박막의 증착압력은 1 mTorr에서 30 mTorr, 기판의 온도는 실온에서 400°C까지 변화 시켰다. 인가된 직류 파워는 200 W이며 타겟과 기판 사이의 거리는 6.5 cm으로 유지하였다. 기판 크기는 1.5 cm×1.5 cm으로, 텅스텐 박막의 두께는 700 nm에서 800 nm로 유지하였다. 증착된 텅스텐 박막의 미세구조 및 두께를 측정하기 위해  $\alpha$ -step과 SEM을 통해 분석하였다. 박막의 결정상과 우선 배향성은 XRD로 평가 하였다. 비저항(resistivity)을 측정하기 위해 4-point probe를 이용 하였다. 브라그 반사형 FBAR 제작을 위해 이용된 압전체와 전극으로는 각각 AlN과 Mo를 이용하였다. 공진기는 1 port 패턴으로 제작하였으며 패턴형성과 식각법은 각각 photolithography 법과 wet 에칭법을 이용하였다. 제작된 FBAR의 공진 특성을 확인하기 위해 Network analyzer(HP 8753ES)를 사용하였다.

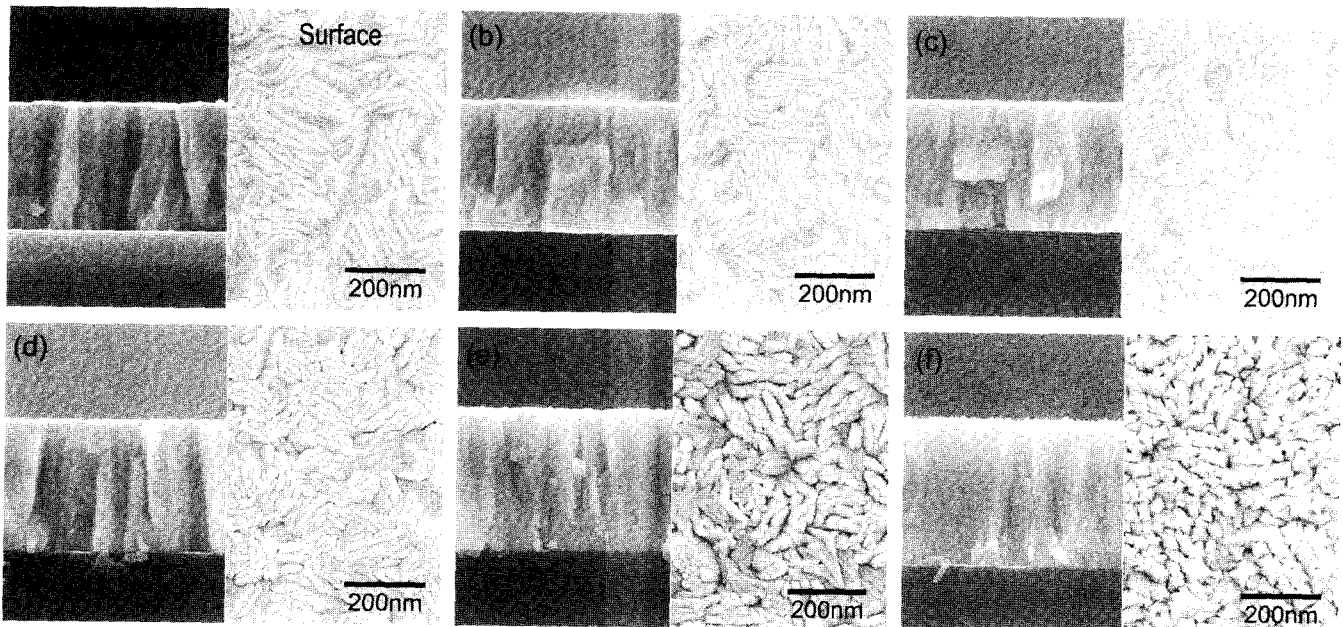


Fig. 2. SEM images of the deposited W films with various working pressure of (a) 5 mTorr, (b) 10 mTorr, (c) 15 mTorr, (d) 20 mTorr, (e) 30 mTorr, and (f) 50 mTorr (on Si(100), substrate temperature 400°C).

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세구조 및 결정구조

기판의 온도 400°C에서 증착된 텅스텐 박막의 증착압력에 따른 미세구조를 Fig. 2에 나타내었다. 증착압력이 50 mTorr에서 5 mTorr으로 감소함에 따라 표면이 평탄해진다. 스퍼터링법에 의해 형성된 텅스텐 박막의 미세구조는 columnar구조를 지니며 zone model을 따르며 증착압력과 기판온도에 의존한다. 증착 압력의 변화에 따라 산란에 의해 sputtered particles가 가지는 에너지는 변한다. sputtered particles가 충분한 에너지를 가지고 성장하고 있는 텅스텐 박막에 충돌하면 표면은 평탄해지며, 밀도 상승의 효과를 가져 오게 된다. 하지만 sputtered particles의 충돌 에너지가 너무 작으면 다공질의 박막을 형성하게 되고, 너무 크다면 박막내 잔류응력 및 불순물등의 결합밀도가 증가하여 박막의 특성이 저하된다.<sup>6,7)</sup> Fig. 2에서 관찰되는 증착압력에 따른 미세구조의 변화는 증착압력이 감소할수록 mean free path가 증가하여 기판에 도달하는 sputtered particles이 충분한 에너지를 가지고 기판에 충돌하기 때문이다. 이러한 결과는 Thornton이 제안한 zone diagram의 zone I 구역부터 zone T 구역에서의 증착압력에 따른 미세구조의 변화를 따르고 있다.

Fig. 3에서 증착압력 10 mTorr인 경우 기판온도의 변화에 따른 텅스텐 박막의 미세구조의 변화를 나타내었다. 기판의 온도가 증가할수록 텅스텐 원자는 충분한 확산에너지를 가진다.<sup>4,5)</sup> 그러나 Fig. 3과 Fig. 2(b)를 보면 기판 온도가 증가함에 따라 텅스텐 박막의 미세구조의 변화는 큰 차이를 보이지 않았으며, 모두 zone diagram에서 큰 결정립 크기를 지니는 zone T구역에 해당하는 미세구조를 지녔다. 즉, 텅스텐 박막의 미세구조의 변화는 기판온도보다 증착압력에 크게 의존하였다.

증착압력의 변화에 따른 텅스텐 박막의 XRD 패턴을 Fig. 4에 나타내었다. Table 1에는 텅스텐 박막의 α-W (110), (200), (210)면의 상대적인 X선 회절강도 및 (110)면의 배향성을 나타내었다. 텅스텐 박막의 α-W 결정상은 BCC(Body-Centered Cubic) 구조로 큰 결정립 크기를 지니며 낮은 잔류응력, 낮은 비저항 값을 지니고, β-W 결정상은 A15 구조로 작은 결정립 크기를 지니며 높은 잔류응력, 높은 비저항 값을 지닌다. 텅스텐 박막의 결정상은 증착압력이 낮을수록, 온도가 높을수록 α-W 결정상을 가지게 된다.<sup>5)</sup> 본 연구의 경우 텅스텐 박막을 XRD로 분석한 결과 β-W 결정상의 존재는 확인 할 수 없었고, α-W 결정상의 단일 상만이 텅스텐 박막내에 존재 하는 것

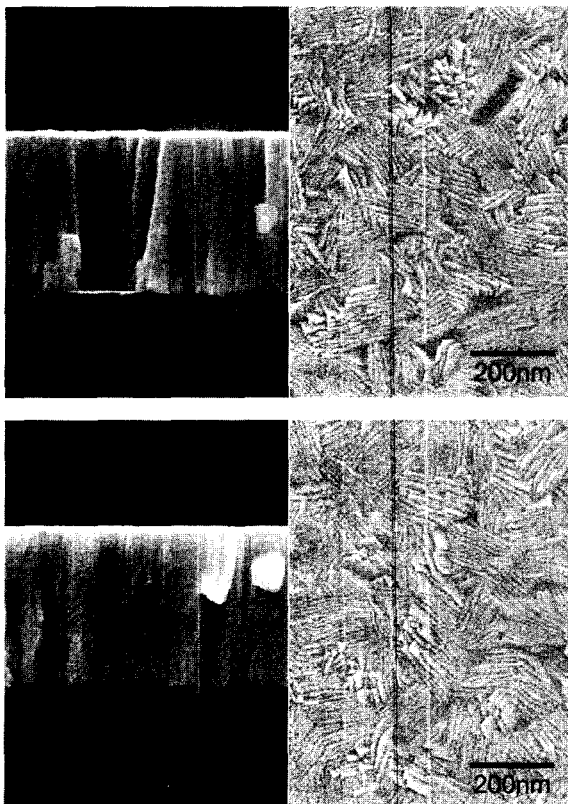


Fig. 3. SEM images of the deposited W films with various substrate temperature of (a) R.T. and (b) 200°C (on Si(100), 10 mTorr).

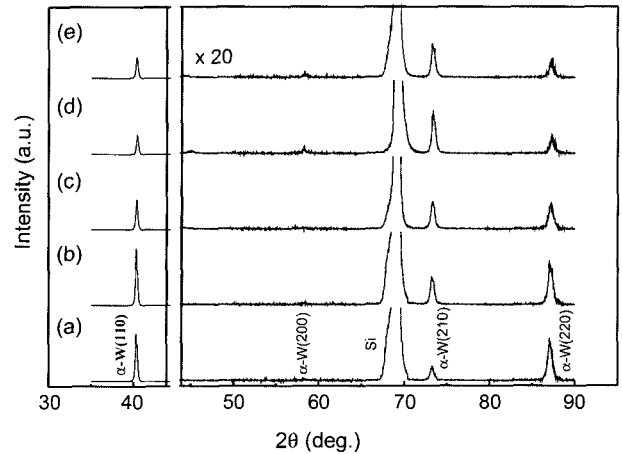


Fig. 4. XRD patterns of W films deposited on Si(100) at 400°C with (a) 5 mTorr, (b) 10 mTorr, (c) 15 mTorr, (d) 20 mTorr, and (e) 30 mTorr.

Table 1. XRD Relative Intensity of W Films Deposited on Si(110)

Working pressure (mTorr)	α-W(110) intensity (I/I <sub>0</sub> )	α-W(200) intensity (I/I <sub>0</sub> )	α-W(210) intensity (I/I <sub>0</sub> )	Ratio of α-W (110) [(110)/((200)+(210)+(110))]
30	100	0.5	8.3	0.92
20	100	1.1	11.6	0.89
15	100	0.1	4.7	0.95
10	100	0	2.6	0.97
5	100	0	1.4	0.99

으로 나타났다. BCC 구조를 갖는  $\alpha$ -W 결정상의 열역학적으로 가장 안정한 면은 (110)면으로 텅스텐 박막의 성장시 (110)면의 우선 배향성이 클수록 텅스텐 박막의 특성은 bulk 텅스텐과 동일해 질 수 있다. Table 1을 보면 증착압력이 20 mTorr에서 5 mTorr으로 감소할수록 (110)면의 배향성은 89%에서 99%으로 증가한다. 그리고 15 mTorr 이상의 압력에서는 (200)면이 존재하였지만 증착압력이 10 mTorr 이하일 때는 (200)면은 나타나지않았다. 이 결과는 증착압력이 감소할수록 sputtered particles의 에너지가 증가하여 텅스텐 박막내의 텅스텐 원자가 충분한 확산에너지를 가지기 때문인 것으로 사료되며, zone T 구역의 미세구조 형태의 큰 결정립을 지닐 때 높은 (110)면 우선 배향성을 나타내었다.

3.2. 비저항

증착압력에 따른 비저항값의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 증착압력이 증가할수록 비저항 값은 30 mTorr 까지는 약  $10 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 로 거의 변화가 없다가 증착압력이 더욱 증가하면 비저항은 선형적으로 증가하여 50 mTorr에는  $94 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 의 값을 나타내었다. 상온에서의 순수한 Bulk 텅스텐의 비저항은  $4.89 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 이다. 텅스텐 박막의 비저항은 전자 산란이론으로 설명되며, 텅스텐 박막의 표면 상태, 결정립계, 전위, 불순물, 박막의 밀도등이 주요 인자이다.  $\alpha$ -W 단일상일 때는 결정립계나 불순물, 전위보다 텅스텐 박막의 밀도와 표면 상태에 영향을 크게 받게 된다.<sup>5)</sup> Fig. 2에서 zone T 구역에 해당하는 5 mTorr에서 20 mTorr의 비저항은  $10 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 으로 거의 동일한 값을 가지지며, zone I 구역에 해당하는 30 mTorr와 50 mTorr는 상대적으로 높은 비저항값( $20 \sim 94 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ )을 보였다. 이러한 비저항변화는 표면 미세구조의 결과와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있으며, 박막의 밀도와 불순물등의 영향도

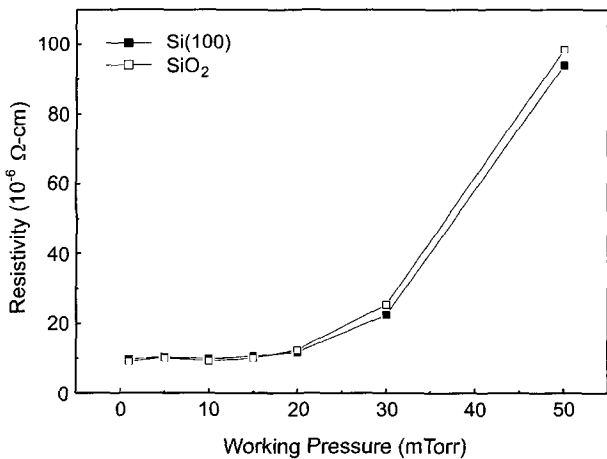


Fig. 5. Resistivity of W films deposited on Si(110) and sputtered SiO<sub>2</sub> substrate at various working pressures.

큰 것으로 사료된다. 그리고 상온에서 400°C까지 기판온도 상승에 따른 비저항 값의 변화는  $10 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ 으로 동일하게 나타났다. 이는 온도변화에 따른 미세구조의 변화가 미미한 결과를 반영하는 결과라 사료된다. 브래그 반사형 FBAR의 탄성과 반사층에 적용하기 위하여, SiO<sub>2</sub>/Si(100) 기판위에 증착된 텅스텐 박막의 비저항은 Si(100)을 이용한 텅스텐 박막의 비저항과 큰 차이를 보이지 않으며, 증착압력 변화에 따라 Si(100) 기판위에 증착된 텅스텐 박막의 결과와 동일한 경향을 나타내었다.

3.3. FBAR의 공진특성

FBAR의 반사층으로 사용된 텅스텐 박막은 zone T의 미세구조를 가지는 증착조건을 이용하여 제작되었다. 1.8 GHz의 중심 주파수를 가지고 W-SiO<sub>2</sub>의 7층의 반사층으로 구성된 브래그 반사형 FBAR의 미세구조와 XRD 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(b)를 보면 실제 적용된 텅스텐 박막의 증착조건에서 높은  $\alpha$ -W(110)면으로의 우선 배향성을 확인할 수 있었고, 공진 특성에 중요한 영향

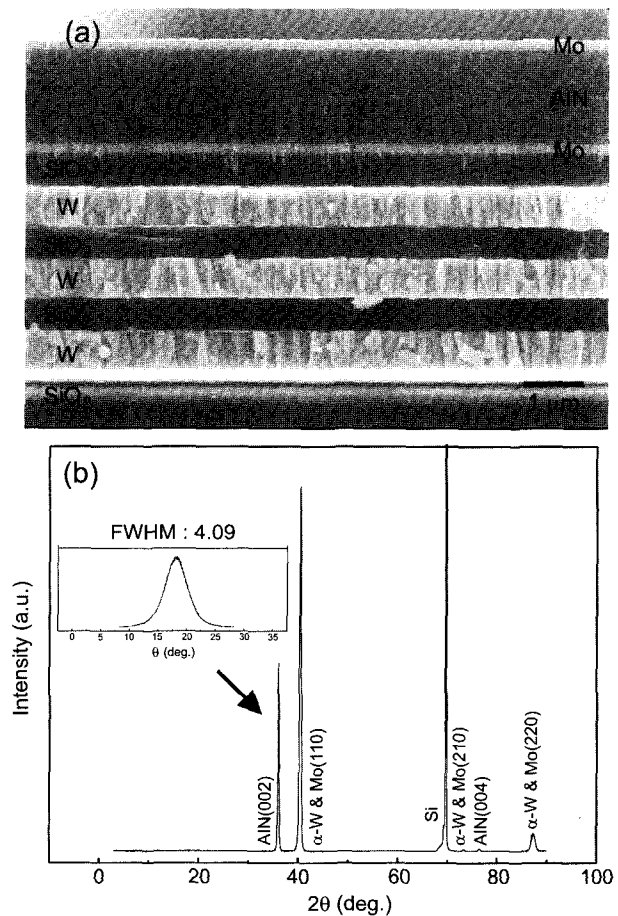


Fig. 6. Fracture cross sectional macrograph (a) and  $\theta$ - $2\theta$  XRD pattern (b) of Bragg reflector type FBAR consist of high quality W films deposited at 5 mTorr, and 400°C.

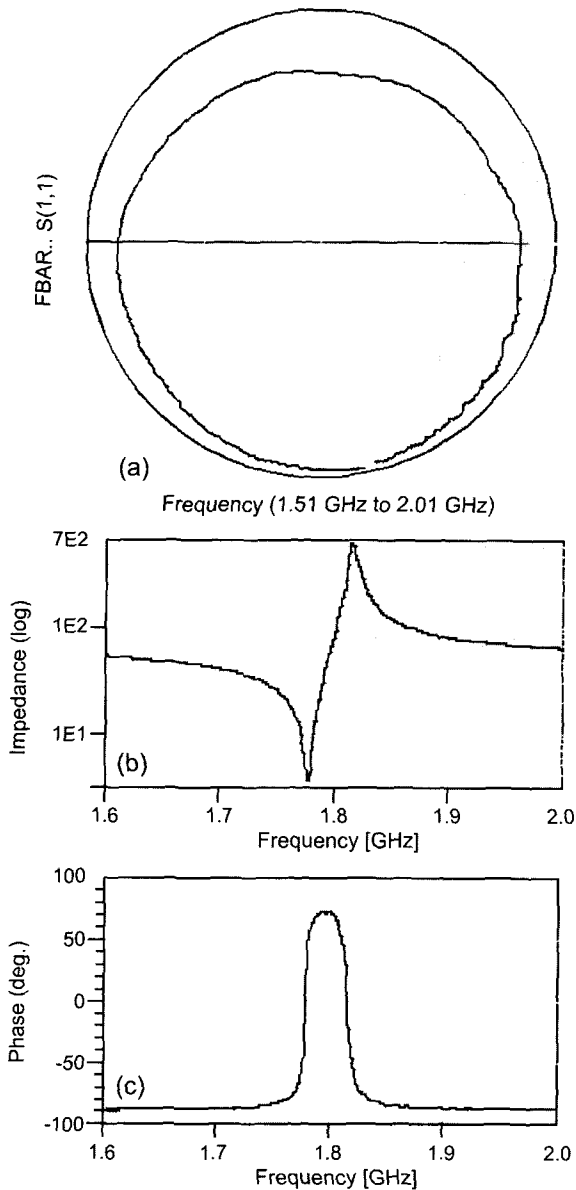


Fig. 7. Resonance properties of bragg reflector type FBAR consisted of high quality W films deposited at 5 mTorr, and 400°C. (a) smith chart of  $S_{11}$ . (b) impedance and (c) phase of 1-port FBAR.

을 미치는 AlN 박막의 C축 배향성을 나타내는 AlN(002) 면의 XRD rocking curve의 FWHM이 4.09°으로 우수한 C축 배향성을 가지는 AlN 박막의 성장이 이루어진 것을 확인할 수 있었다.<sup>1)</sup> 공진특성을 평가한 1 port 공진기의 스미스차트와 임피던스, 결정상을 Fig. 7에 각각 나타내었다. FBAR의 공진 특성을 평가하는 척도로는 Quality factor (Q)값과 전기 기계 결합상수  $K_{eff}^2$ (%) 값을 사용한다.<sup>1,2)</sup> 제작된 FBAR의 Q값은 직렬( $Q_s$ ), 병렬( $Q_p$ )공진에서 각각 494와 229으로 측정되었고, 공진기의 전기 기계 결합상수  $K_{eff}^2$ (%) 값은 5.30으로 우수한 공진 특성을 보였다.

#### 4. 결 론

직류 마그네트론 스퍼터링법을 이용한 텅스텐 박막의 특성에 영향을 미치는 스퍼터링 조건 중 증착압력, 기판 온도와 기판의 영향에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기판온도 400°C에서 증착압력이 감소할수록 zone I에서 zone T로 변화했다. 증착압력 10 mTorr에서 기판온도가 상승할수록 미세구조에 큰 차이를 보이지 않았으며, zone T 구역에 해당하는 미세구조를 가졌다.

2. 텅스텐 박막에서는  $\beta$ -W 결정상의 존재를 확인할 수 없었고, 상대적으로 높은 특성을 지니는  $\alpha$ -W 단일상으로 존재하였다.  $\alpha$ -W 박막의 (110)면의 우선 배향성은 증착압력이 감소할수록 증가하며, zone T의 미세구조를 지나고 큰 결정립을 지닐 때 큰 (110)면의 우선 배향성을 나타내었다.

3. 증착압력이 낮을수록 비저항 값은 감소하였고, zone T의 미세구조를 가질 때 낮은 비저항값을 가졌다. 기판온도가 증가함에 따라 비저항값의 변화는 확인할 수 없었다.

4. 높은 quality factor를 가지는 텅스텐 박막을 이용하여 제작된 W-SiO<sub>2</sub> 다층박막의 반사층위에 형성된 FBAR는 494의 Q<sub>s</sub> 값과 5.30의  $K_{eff}^2$ (%)값을 나타내어 탄성파 반사층으로의 사용가능성을 확인하였다.

#### REFERENCES

1. S.-H. Lee, J.-H. Kim, G. D. Mansfeld, K. H. Yoon, and J.-K. Lee, "Influence of Electrodes and Bragg Reflector on the Quality of Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonators," *IEEE International Frequency Control and PDA Exhibition*, 45-9 (2002).
2. T. R. Sliker and D. A. Roberts, "A Thin-film CdS-quartz Composite Resonator," *J. Appl. Phys.*, **36** [5] 2350-59 (1967).
3. A. K. Vashishth and P. Khurana, "Inhomogeneous Waves in Anisotropic Porous Layer Overlying Solid Bedrock," *J. Sound and Vibration*, **258** [4] 577-94 (2002).
4. J. A. Thornton, "Influence of Apparatus Geometry and Deposition Conditions on the Structure and Topography of Thick Sputtered Coatings," *J. Vac. Sci. Technol.*, **11** [4] 666-70 (1974).
5. P. Petroff, T. T. Sheng, A. K. Sinha, G. A. Rozgonyi, and F. B. Alexander, "Microstructure, Growth, Resistivity, and Stress in the Tungsten Films Deposited by RF Sputtering," *J. Appl. Phys.*, **44** [6] (1973).
6. R. D. Bland, G. J. Kominiak, and D. M. Mattox, "Effect of Ion Bombardment During Deposition on Thick Metal and Ceramic Deposits," *J. Vac. Sci. Technol.*, **11** [4] 671-74 (1974).
7. C. A. Davis, "A Simple Model for the Formation of Compressive Stress in the Thin Films by Ion Bombardment," *Thin Solid Films*, **226** 30-4 (1993).