

Microstructure and Electrical Properties of ZnO Thin Film for FBAR with Annealing Temperature

Bong-Seok Kim, Young-Hun Kang, Yu-Hyuk Cho, Eung-Kwon Kim,*
Jong-Joo Lee,* and Young-Sung Kim[†]

Advanced Material Process of Information Technology, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*Department of Information and Communication, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received October 21, 2005; Accepted November 28, 2005)

FBAR용 ZnO 박막의 열처리 온도변화에 따른 미세조직 및 전기적 특성

김봉석 · 강영훈 · 조유혁 · 김응권* · 이종주* · 김용성[†]

성균관대학교 정보통신용 신기능성 소재 및 공정연구센터

*성균관대학교 전자 전기 및 컴퓨터 공학과

(2005년 10월 21일 접수; 2005년 11월 28일 승인)

ABSTRACT

In this paper, we prepared high-quality ZnO thin films for application of FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) by using pulse DC magnetron sputtering. To prevent the formation of low dielectric layers between metal and piezoelectric layer, Ru film of 30 nm thickness was used as a buffer layer. In addition we investigated the influence of annealing condition with various temperatures. As the annealing temperature increased, the crystalline orientation with the preference of (002) c-axis and resistance properties improved. The single resonator which was fabricated at 500°C exhibited the resonance frequency and the return loss 0.99 GHz and 15 dB, respectively. This work demonstrates potential feasibility for the use of thin film Ru buffer layers and the optimization of annealing condition.

Key words : FBAR, ZnO thin film, Ru buffer layer, Pulse DC magnetron sputter

1. 서 론

최근 사용 주파수 대역 범위가 900 MHz~3 GHz인 개인 휴대 통신시스템을 이용하는 소비자의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 무선통신 시장이 커짐에 따라서 소비자의 욕구를 충족시키기 위한 경쟁이 더욱 가열되어지고 있으며 이러한 경쟁이 이동통신용 단말기의 다기능화, 경량화, 광대역화, 초소형화, 고품질화를 요구하고 있다. 하지만 RF 필터는 아직까지 집적화되지 못하고 외장소자로 구형되고 있어서 단말기의 경박단소화에 어려움을 야기한다. 이러한 요소들을 해결하기 위해서는 핵심부품들의 MMIC(Monolithic Microwave Intergrated Circuit)화가 필수적이다. FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)는 유전체 필터 및 집중 정수 필터보다 수백분의 1이하 크기로 초소형화가 가능하고 탄성파(SAW) 소자보다 삽입손실이 매우 적다는 특성을 가지고 있다. 따라서 FBAR 필터는 안

정성이 높고 고품질계수를 요구하는 MMIC에 사용이 가능하며 모든 면에서 차세대 무선이동통신용 필터에 가장 적합하다고 할 수 있다.¹⁾

ZnO는 육방정계의 wurtzite 구조인 II-VI족 화합물 반도체로서 다양한 분야에서 매우 광범위하게 연구되어 왔다. 특히 박막으로 제조할 경우 압전성(piezoelectric), 반도체성(semiconducting), 광 도전성(photo conducting)을 가지는 재료로, ZnO의 압전특성을 이용한 SAW 필터나 공진기로의 응용과 높은 투명성과 불순물 첨가에 따른 낮은 비저항을 이용한 투명 전도막으로의 응용 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다.²⁾

압전특성을 활용하기 위한 ZnO 박막은 유리, 실리콘, 금속 박막 등의 기판 상에 형성되는 c-축 다결정 배향막과 사파이어 등의 단결정 기판 상에 형성되는 단결정 막이 디바이스에 응용되고 있으며, ZnO가 갖는 결정 대칭성에 따라 다결정 박막이라도 그의 c-축 방향과 극성이 일치되어 있으면 단결정 박막과 등가인 압전성을 갖는다. ZnO를 FBAR 소자에 적용시키기 위해서는 우수한 c-축 배향성이 우선적으로 요구된다. 일반적으로 FBAR 제조 시에 Al 바닥전극 위에 ZnO를 성장시킬 때 Al의 결정구

[†]Corresponding author : Young-Sung Kim

E-mail : youngsk@skku.edu

Tel : +82-31-299-6702 Fax : +82-31-290-5644

조(FCC)와 ZnO의 결정구조(HCP) 차이로 격자변형이 발생하여 결정배향성이 감소된다. 본 실험에서는 바닥전극인 Al과 압전체인 ZnO 사이에 buffer layer로써 Ru를 사용하였다. Ru은 ZnO와 같은 HCP의 결정구조로 ZnO의 박막의 결정배향성을 향상시키고 높은 녹는점(2310°C) 때문에 화학반응에 대한 저항성을 높여준다.³⁾

ZnO가 FBAR 소자에 적용하기 위해서는 높은 비저항, 우수한 c축 배향성, 평탄한 표면 거칠기가 필수적이다. 이러한 요소들은 일반적으로 증착시의 기판온도나 공급 전력, 또는 진공도와 같은 증착조건들에 의해 결정된다. 본 실험에서는 후열처리온도의 변화에 따라 FBAR 소자에 적용을 위한 ZnO 박막의 미세조직 및 전기적 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

ZnO 박막을 제작하기 위한 공정에는 CVD(Chemical Vapor Deposition), PLD(Pulsed Laser Deposition), sputtering, implantation, MBE(Molecular Beam Epitaxy), Sol-Gel법 등의 다양한 방법이 있다. 그러나 산업적인 응용을 위해서는 높은 증착율을 가지면서 박막특성을 우수하게 제어할 수 있는 기술을 필요로 하는데, 최근에 이러한 기술로써 pulse DC magnetron sputtering 법이 주목을 받고 있다. 기존의 RF sputtering에 비하여 증착율이 높을 뿐만 아니라, 작업 중 타겟에 발생하는 아크 방전을 최소화하여 박막 제조시 안정적으로 박막을 제조할 수 있다.

본 실험에서는 pulse DC magnetron sputtering 법을 이용해 MIM(Metal-Insulator-Metal) 구조의 FBAR 소자를 제작하여 구조적, 전기적 특성을 분석하였다. 먼저 p-type Si(100) 웨이퍼에 500 nm 두께의 SiO₂를 성장시키고 evaporation법을 이용하여 300 nm 두께의 하부전극 Al을 증착시켰고, 30 nm 두께의 Ru를 RF 스퍼터링 장치를 이용해 증착시켰다. Al과 Ru 박막의 산화를 방지하기 위하여 상온에서 ZnO 박막을 DC 마그네트론 스퍼터링법으로 증착시킨 후 25~500°C에서 100°C 간격으로 열처리를 실시하고 온도에 따른 박막의 특성변화를 조사하였다. 증착조건은 Table 1과 같다.

증착된 ZnO 박막의 결정구조와 미세조직의 분석을 위해 X-ray diffractometer을 이용하였고, 박막의 표면형상과 거칠기 분석을 위해 각각 SEM(Scanning Electron Microscope)과 AFM(Atomic Force Microscope)을 사용하였다. 또한 박막의 최적조건을 가지고 공진기를 제작하여 주파수 특성분석을 수행하였다. 공진기의 제작과정은 그림에서 보는 것과 같이 실리콘 기판 세척을 각각 10분간 유기세정 후 열산화막을 0.5 μm의 두께로 성장시킨 후 DC 스퍼터링을 이용하여 Al과 Ru를 각각 300 nm와 30 nm를 증착하였다. 최적조건으로 선정된 압전층을 증착한 후 상

Table 1. Sputtering Condition of the ZnO Thin Films

Parameter	Value
Target	ZnO
Power mode	Asymmetric bipolar pulse DC
	Power : 200 W
	Frequency : 30 kHz
	Positive duty : 15% Negative duty : 35%
Base pressure	6×10 ⁻⁴ Pa
Working pressure	0.6 Pa
Ar gas flow rate	20 sccm
Substrate temperature	25°C
Substrate distance	60 mm

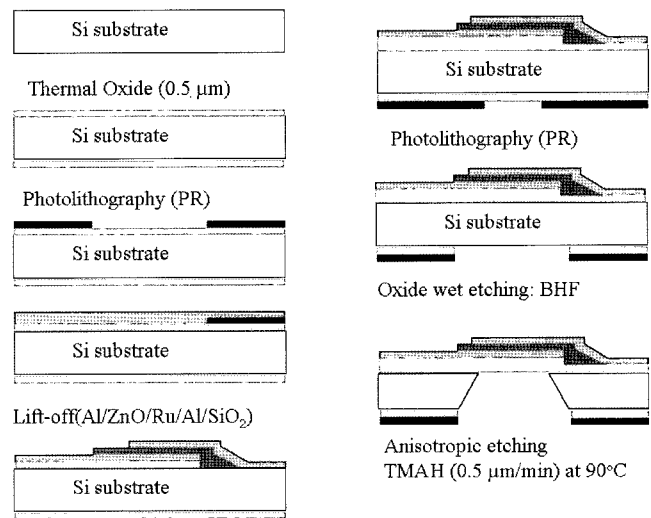


Fig. 1. The schematic diagram of single FBAR fabrication processing.

부패턴은 포토공정과 리프트 오프공정을 수행하고 후면 에칭은 25 wt%의 TMAH 용액을 이용하여 열라인된 200 × 200 μm의 캐비티를 이용하여 최종 공진기를 제작하였다. 주파수 특성분석은 네트워크 어날라이저(Network Analyzer)를 이용하여 반사계수(return loss)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. XRD 분석

Fig. 2는 열처리 온도에 따른 ZnO 압전 박막의 X선 회절분석 측정 결과의 변화를 나타내었다. 분석 조건은 인가전압과 전류값이 각각 30 kV, 100 mA이고, 분석각은 30~60°, 스캔 스피드는 6°/min로 하였다. FBAR 소자의 압전 재료로서 요구조건에는 우수한 결정 배향성과 큰 압전결합계수가 필수적이다. 실험결과 모든 시편에서 기판에 수직인 ZnO 박막의 (002)면에 대한 피크가 잘 나타나고 (100) 및 (101) 등의 기타 결정면이 발견되지 않은 것

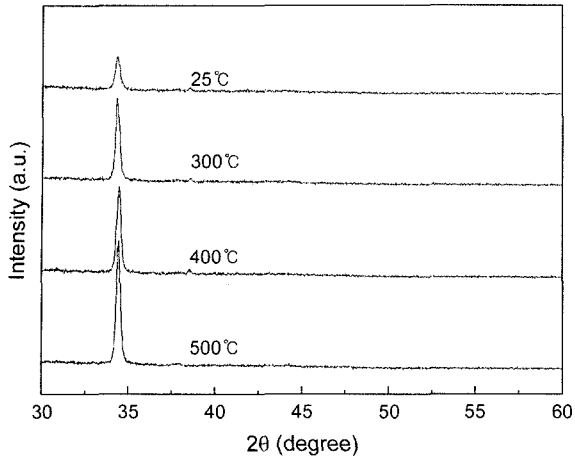


Fig. 2. The XRD patterns of ZnO films annealed at various temperatures.

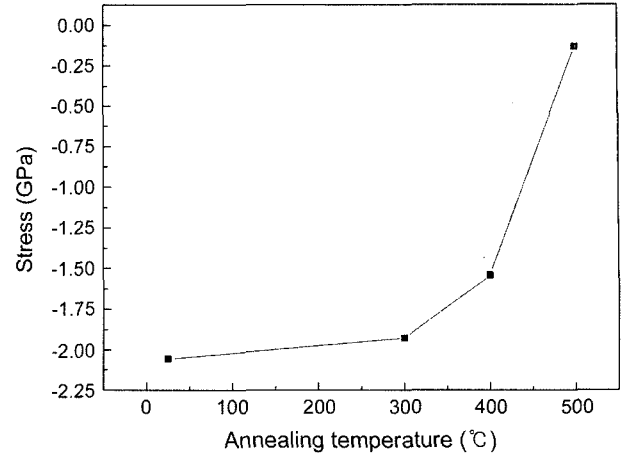


Fig. 3. The stress analysis of ZnO thin films annealed at various temperatures.

으로 보아 결정이 전체적으로 c-축 결정 배향성을 가짐을 확인할 수 있었다. 후열처리 온도가 300°C 이상 증가함에 따라 상대강도가 증가하는 것으로 보아 후열처리 온도의 증가가 결정배향성의 향상에 기여했음을 판단할 수 있었다. 이는 온도의 증가에 따라 원자의 유동성을 향상시킬 만한 충분한 에너지를 공급하여 기공을 줄이고 전체적으로 박막의 질을 향상시키기 때문이다.⁴⁾

응력의 크기는 ZnO 박막의 소자응용에 상당히 중요한 요소이다. 실제로 FBAR 소자에서 응력으로 인한 지연효

과가 발생하여 소자의 특성을 변화시키기도 하며 실제 소자에 치명적인 박막의 균열이나 구부러짐을 발생시키기도 한다. 응력의 원인으로는 높은 기판온도에서 증착 후 기판과 박막의 열팽창계수의 차이에 의해서(thermal stress) 또는 박막의 밀도와 박막 구조의 결정학적 결함에 의해서(intrinsic stress)에 의해서 발생한다. Fig. 3은 (002)면에 대한 응력의 크기를 나타내었다. 응력의 크기는 XRD 실험으로부터 측정된 c축 격자상수로부터 아래의 식을 이용하여 계산하였다.⁶⁾

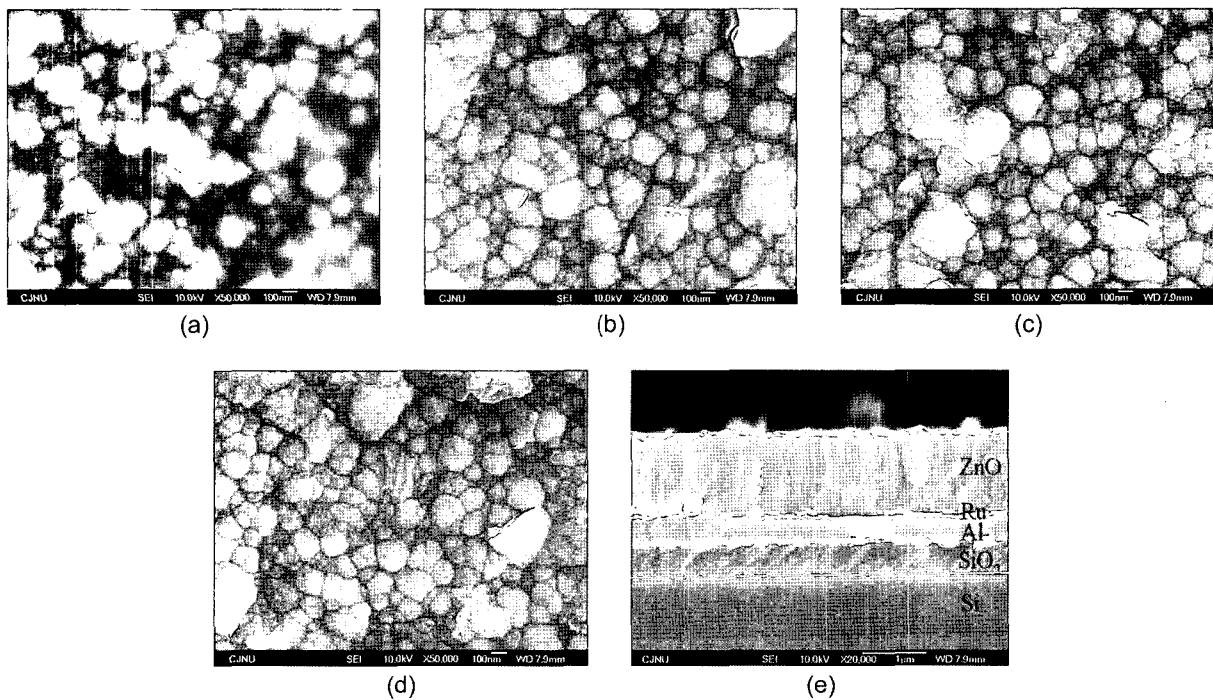


Fig. 4. Surface and cross-section SEM images of ZnO thin films annealed at various temperatures; (a) as grown, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 500°C, and (e) cross-section.

$$\sigma = -453.6 \times 10^9 ((c - c_0)/c_0)$$

여기서 c_0 는 변형이 없는 상태의 ZnO 분말 시료로부터 측정된 격자상수이다. 후열처리를 실시하지 않은 시편으로부터 열처리온도가 올라감에 따라 응력의 크기가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 열처리를 실시함에 따라 응력의 크기가 현저하게 줄어들었다. 또한 열처리온도가 올라감에 따라 응력의 크기가 줄어들어 500°C에서 0.13 GPa로 가장 작은 값을 보였다. 이것은 증착 후 열처리로 인해 박막 내의 결정이 성장하는 반면 결함으로 존재하는 결정립계가 감소되고 ZnO 결정의 우선배향성이 향상되기 때문이다.⁷⁾

3.2. SEM 분석

본 실험에서 열처리 온도를 변화하여 제조한 박막의 표면 형상을 관찰하기 위하여 SEM 측정을 행하였고, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 결정립들은 열처리 온도가 증가함에 따라 나노 입자 크기로 균일하고 치밀한 미세구조로 성장함을 보였으며, 표면 이미지의 결과는 앞서 언급한 XRD의 주피크 (002)의 성장 결과와 일치됨을 확인하였다. 또한 ZnO 박막의 증착된 두께를 확인하기 위해 파단면을 조사하였다. ZnO 박막 두께는 1.5 μm로 30 nm의 Ru 버퍼층 위에서 잘 성장됨을 SEM 측정을 통해 확인하였다.

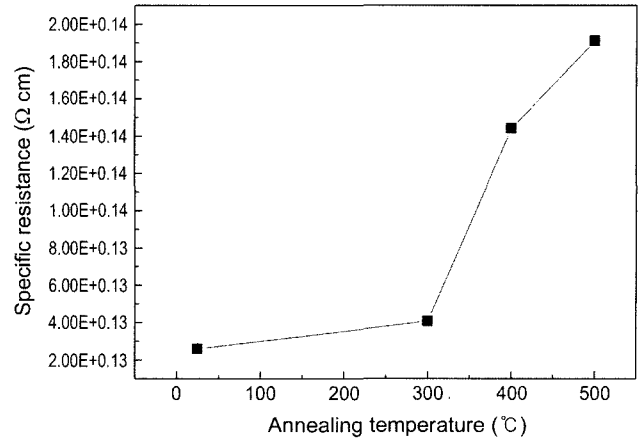


Fig. 5. Specific resistivity characteristics of ZnO thin films annealed at various temperatures.

3.3. Resistivity 분석

Fig. 5는 상·하부 전극을 통해 측정한 저항값을 나타내었다. FBAR 소자 적용을 위해서 압전체의 높은 저항값은 필수적이다. 전기저항은 격자 내부의 산소 공공에 의해 큰 영향을 받는데 열처리에 의한 고온에서는 산소가 격자 내부로 들어가 전도에 기여하는 침입형 아연과 산소 공공을 제거하여 저항을 높이는 역할을 한다.⁷⁾ 본 실험에서는 ZnO 박막의 저항을 높이기 위해 산소분위기에서 열처리를 실시하였다. 실험 결과 열처리 온도가 증

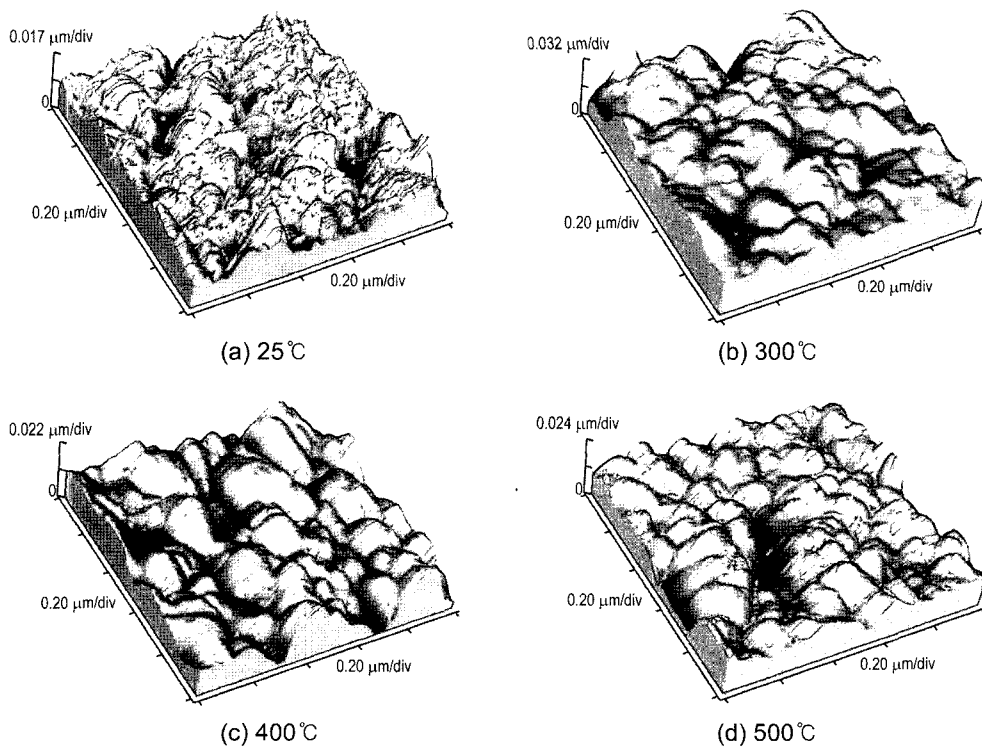


Fig. 6. AFM images of ZnO thin films annealed at various temperatures.

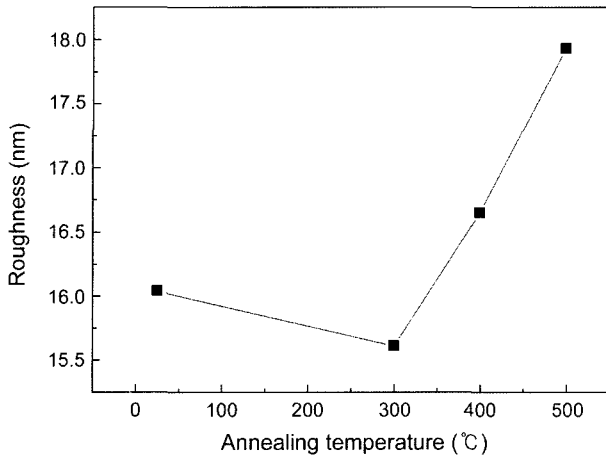


Fig. 7. Roughness of ZnO thin films annealed at various temperatures.

가할수록 산소의 치환 현상으로 인해 저항도가 증가하는 경향을 보였다.

3.4. AFM 분석

증착된 ZnO 박막의 표면 거칠기를 조사하기 위해 AFM 분석을 하였고 측정된 표면 이미지와 거칠기 RMS(Root-Mean-Square) 값을 Figs. 6과 7에 나타내었다. 일반적으로는 열처리온도가 높을수록 원자의 이동성이 향상되어 박막의 표면 거칠기는 감소한다. 하지만 특정온도까지는 결정립의 과성장으로 인하여 오히려 표면이 거칠어지는 경향을 보이는데⁸⁾ 본 실험 결과에서도 25°C에서 300°C까지는 표면 거칠기가 감소하고 이후 500°C까지 증가하는 경향을 보였으며, 열처리 온도에 의한 결정립의 과 성장 보고와 유사한 결과를 확인하였다. 또한 ZnO 박막의 두께가 1 μm에서 1.5 μm인 것을 고려하면 150 Å에서 180 Å의 값은 상당히 거친 값이며, 이는 하부전극 Al과 Ru의 morphology에 의한 영향이 클 것으로 판단된다.

Fig. 8은 열처리된 500°C의 샘플을 가지고 최종 공진기를 제작하여 주파수 특성을 나타내었다. ZnO 박막 1.5 μm의 두께와 알루미늄 전극 300 nm의 두께를 가지는 공진기의 공진주파수는 0.99 GHz였고, 반사계수 값은 15 dB의 값을 보였다. 그러나 1차 공진 외에도 각 모드에서 잔류의 하모닉 성분이 약간 씩 보였다. 이는 0.5 μm 두께를 가지는 지지층의 열 산화막의 성분에서 발생하는 것과 후면 실리콘 에칭시 잔여성분이 남아 있어서 발생된 것이라 사료된다.

4. 결 론

본 실험에서는 FBAR 소자 적용을 위한 ZnO 박막의 연구를 실시하였다. 양호한 압전성을 갖는 ZnO 박막을 DC 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 Ru/Al/SiO₂/Si 기판 위

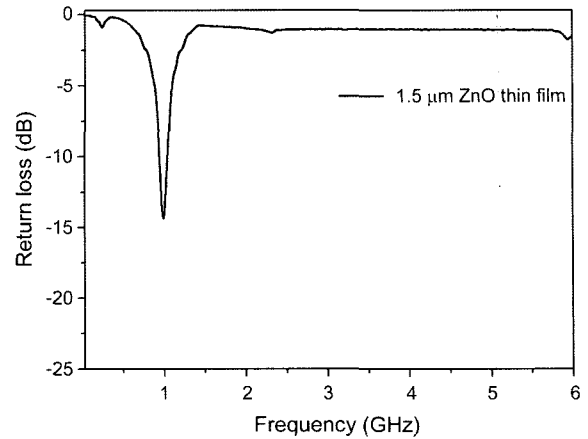


Fig. 8. The resonant frequency response measured by the sample of ZnO thin films annealed at 500°C for 30 min in as oxygen ambient.

에 증착하였고 열처리온도 변화에 따른 박막의 미세조직 및 전기적 특성변화를 조사하였다.

FBAR에 적합한 압전 재료로 사용되기 위해서는 우수한 c-축 우선배향성, 높은 비저항값, 그리고 평탄한 표면 특성이 요구된다. 실험 결과 전체적으로 우수한 c-축 배향성을 보였고 열처리온도가 증가할수록 결정의 회복단계의 영향으로 결정의 크기가 증가하고 또한 열처리온도에 의한 ZnO 박막의 응력 크기가 감소하는 경향을 보였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 FBAR 소자 제작시 응력을 고려한 박막의 열처리 조건을 본 실험을 통해 확보할 수 있었으며 또한 산소분위기에서의 열처리온도의 증가에 따라 높은 비저항값을 얻었고 열처리온도 500°C의 샘플을 이용하여 단일 공진기를 제작한 결과 공진주파수 0.99 GHz와 반사계수 15 dB의 양호한 주파수 특성을 얻었으며, 향후 버퍼층 활용과 비저항 특성을 향상시킬 수 있는 방법으로서 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

Acknowledgment

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-04) 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. K. M. Lakin, K. T. McCarron, J. Belsick, and J. F. McDonald, "Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonator and Filter Technology," *IEEE RAWCON*, 89-92 (2001).
2. D. Y. Lee, "A Study on Electrical Characteristics of ZnO Thin Film for SAW Filter," *Kor. Institute Electrical Electronic Mater. Eng.*, **13** [7] 617-24 (2000).
3. W. T. Lim and C. H. Lee, "Highly Oriented ZnO Thin Films Deposited on Ru/Si Substrate," *Thin Solid Films*, **353** 12-5

- (1999).
4. S. Y. Chu, W. Water, and J. T. Liaw, "Influence of Post-deposition Annealing on the Properties of ZnO Films Prepared by RF Magnetron Sputtering," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** 1593-98 (2003).
 5. M. K. Puchert, P. Y. Timbrell, and R. N. Lamb, "Post-Deposition Annealing of Radio Frequency Magnetron Sputtered ZnO Films," *J. Vac. Sci. Tech. A*, **14** [4] 2220-30.
 6. W. T. Lim and C. H. Lee, "Highly Oriented ZnO Thin Films Deposited on Ru/Si Substrates," *Thin Solid Films*, **353** 12-5 (1999).
 7. A. C. Su, N. M. van der Pers, T. H. de Keyser, A. Venema, and M. J. Vellekoop, "Stress Control of Piezoelectric ZnO Films on Silicon Substrates," *Smart Mat. and Structures*, **5** 744-50 (1996).
 8. D. H. Zhang and D. E. Brodie, "Effects of Annealing ZnO Films Prepared by Ion-Beam-Assisted Reactive Deposition," *Thin Solid Film*, **238** 95-100 (1994).
 9. W. Water and S. Y. Chu, "Physical and Structural Properties of ZnO Sputtered Films," *Mater. Lett.*, **55** 67-72 (2002).