

논문 16-8-11

FBAR 응용을 위한 ZnO 압전 박막의 증착 특성에 관한 연구

A Study on the Deposition Characteristics of ZnO Piezoelectric Thin Film Bulk Acoustic Resonator

최승혁, 김종성*

(Seung Hyuk Choi and Jong Sung Kim)

Abstract

ZnO thin films were deposited on Al and Pt electrodes by an RF reactive sputtering system for the fabrication of FBAR (film bulk acoustic wave resonator), and the effect of thermal treatment temperature on their c-axis preferred orientation was investigated. SEM experiments show that columnar structure of ZnO thin films were grown with c-axis normal to electrode material, and XRD experiments show that both ZnO films were grown with (002) plane preferred orientation, but larger diffraction peak was observed with Pt electrode. The peak intensity increased with higher thermal treatment temperature, but c-axis preferred orientation was diminished. The surface roughness of Al thin film was higher than that of Pt, and these affect the surface roughness of ZnO film deposited on the electrode. Though the preferred orientation with respect to Pt(111) plane was improved with higher thermal treatment temperature, this could not improve the c-axis orientation of ZnO film.

Key Words : FBAR, ZnO, Preferred orientation, Surface roughness

1. 서론

체적과 박막형 공진기소자는 일반적으로 동작주파수가 500 MHz ~ 10 GHz이며, 유전체 세라믹 소자의 장점과 SAW 소자의 장점을 동시에 갖고 있고, 특히 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)화가 가능한 차세대 고주파 수동 소자로 주목 받고 있다[1].

FBAR 소자를 이용하면 공진기, 대역통과 필터, 듀플렉서 필터, VCO(Voltage Controlled Oscillator) 등의 제조가 가능하다[2]. FBAR 필터의 경우 유전체 필터나 SAW 필터에 비해 부피가 매우 작고, 삽입 손실도 SAW 필터에 비해 작다. 또한 수정

단결정 두께 가공기술의 한계 때문에 GHz 대의 고주파수에서의 동작이 불가능하다[3].

FBAR 소자는 전극막 사이에 압전 박막을 수직으로 형성하여, 양 전극에 가해진 교류 전원을 통해 압전 박막에 시변 전기장을 가하면, 압전체 내 쌍극자 분극의 크기가 변화되어 인가된 시변 신호의 임피던스를 변화시켜, 인가된 시변 신호의 주파수 변화에 따라 임피던스가 최대 최소로 되는 공진 현상을 이용한 것이다.

공진 특성은 압전 물질의 종류, 두께, 결정 상태, 전극의 두께와 면적 등 여러 가지 변수에 의해 결정되는데, 우수한 FBAR의 특성을 갖기 위해서는 압전 박막의 c-축 우선 배향성과 음파 에너지의 손실을 최소화하기 위한 구조체 제작이 필요하다[4-6]. FBAR에 사용될 수 있는 압전 박막 물질은 대면적의 소자를 제공할 수 있어야 하고, 우선 배향성이 가능해야 하며, 비저항과 파괴강도가 높고, 박막 증착의 재현성이 우수해야 하는데, ZnO, AlN, LiNbO₃, PZT 등이 주로 사용된다[7].

* : 경원대학교 화학공학과
(경기도 성남시 수정구 복정동 산 65번지,
Fax : 031-750-5363
Corresponding Author : jskim@kyungwon.ac.kr)
2003년 3월 4일 접수, 2003년 4월 7일 1차 심사완료,
2003년 5월 12일 최종 심사완료

ZnO 는 hexagonal wurtzite 결정 구조를 가지며, 높은 압전성, 전기기계상수, 광도전성을 지녀 센서, 발광다이오드, 필터, 투명 전도막 등 그 활용 영역이 매우 다양하다[8].

ZnO 박막은 sputtering, CVD (chemical vapor deposition) 등으로 제조되는데, 아르곤과 산소 혼합 가스를 사용한 RF 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하면 다결정 형태이지만 c-축 우선 배향성을 지녀 단결정의 특성에 가까운 양질의 박막을 제조할 수 있다. c-축 우선 배향성에 영향을 미치는 것으로는 증착 중 기판의 온도와 산소/아르곤(O₂/Ar) 가스 비, 스퍼터링 압력, 기판과 타겟 사이의 거리 등이 있다[9]. 하지만 FBAR 소자를 비롯한, ZnO박막을 사용하는 대부분의 소자들의 경우 Si이나 glass기판상의 전극막 위에 ZnO를 증착하여 제조되므로, c-축 배향성에 대한 전극막의 영향을 평가하는 것이 매우 중요하다. 또한 ZnO 박막의 증착시 기판 온도 변화에 따른 ZnO 박막의 c-축 배향성은 많이 연구 되었지만, 전극 상에 증착 후, 열처리 공정에 의한 ZnO 박막의 결정 구조 변화에 관한 연구는 충분하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 전극막으로 Al과 Pt를 사용하여, ZnO 박막을 그 위에 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착한 후, 열처리 온도에 따른 결정화 양상 및 표면 조도 변화를 XRD(X-ray diffraction), SEM(Scanning Electron Microscope), SPM(Scanning Probe Microscope)으로 분석하여 조사하였다. 또한 Al과 Pt 전극막 자체에 대한 결정 성장 관찰을 통하여, 전극막 결정 구조의 ZnO 박막의 c-축 우선 배향성에 대한 영향을 조사하였다.

2. 실험

2.1 전극막과 ZnO 박막 증착

Si(100) 기판의 양면에 LPCVD법으로 1 μm의 Si₃N₄ (low stress)박막을 증착시키고 그 위에 Al과 Pt를 전극막으로 증착하였다. Si₃N₄는 FBAR 제작 시 실리콘 기판의 에치스톱으로 사용된다. 기판은 acetone, isopropyl alcohol, DI water로 초음파 세척 후 N₂로 건조하여 사용하였다.

Pt 전극막의 경우 DC 스퍼터링 공정으로 접착력을 위한 layer인 Ti를 500Å 내의 두께로 증착 후, 그 위에 2000Å의 두께로 증착하였다. Pt 박막은 4 inch target (99.999%)을 사용하였고 DC

power 420V×0.24A , base pressure 3.2×10⁻⁶ Torr, Ar 유속 50 sccm, sputtering pressure 5 mTorr, 기판과 타겟의 거리 25 cm 조건으로 증착하였다. Al은 E-beam evaporator를 사용하여 2000 Å의 두께로 증착하였고, 공정 조건은 인가 전력 60mA×10KV, base pressure 6.4×10⁻⁷ torr, 증착속도 0.7Å/s였다.

ZnO 박막은 RF reactive magnetron sputtering 방법으로 증착하였는데, 먼저 4 inch ZnO 타겟(99.999%)을 Si 기판에 여러 가지 증착 조건을 변화하여 기초 실험 한 후, 표 1에 나타난 바와 같은 조건으로 Pt와 Al 전극막 상에 증착하였다. 이때 기판의 회전속도는 15 rpm 이었고 pre-sputtering을 약 10분간 실시한 후 상온에서 195분간 증착하여 16000 Å의 ZnO 박막을 제조하였다.

표 1. ZnO 박막의 증착 조건.

Table 1. Sputtering conditions of ZnO thin films.

Deposition parameter	Conditions
RF power	213 W
Working pressure	15 mTorr
Ar/O ₂	13/13 sccm
Rotation speed	15 rpm
Distance	10 cm
Time	195 min

2.2 박막의 열처리 및 구조 특성 분석

열처리에 따른 전극막과 ZnO 박막의 구조 특성을 관찰하기 위해 증착된 Pt/Ti, Al, ZnO/Al, ZnO/Pt/Ti 박막시료를 머플 전기로에서 각각 200, 400 °C로 열처리 하였다. 열처리는 rising rate를 0.5 °C/s, 체류시간을 30분, falling rate를 2 °C/min으로 실시하였다. 박막의 두께는 surface profilometer (α-step, Tencor) 로 측정 후 SEM으로 확인하였다. 열처리 후 각 시료들을 XRD (Rigaku), SPM (PSIA, XE-100), SEM (Akashi Co.)으로 분석하였다. XRD는 CuKα선 (λ=1.542 Å) 과 Ni filter를 사용하였고, 40kV×20mA에서 2°/min의 속도로 측정하였다. SPM으로 박막의 RMS (root mean square) surface roughness를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전극막과 ZnO 박막의 결정화와 표면 거칠기

그림 1은 Pt, Al 전극, 그림 2는 각 전극 위에 증착된 ZnO 박막의 열처리 온도에 따른 표면 SPM 사진을 보여준다. 그림 1에서 Pt 박막에 비해 Al 박막의 결정립 크기가 크며, 열처리 온도 증가에 따른 결정 성장 속도도 더 큰 것을 관찰할 수 있다. 또한 그림 2를 보면 Al 전극막 위에 성장한 ZnO 결정이 Pt 전극막 위에 성장한 ZnO 결정보다 크기가 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 ZnO 박막이 증착되거나 열처리 공정에 의해 결정화될 때, 결정 크기는 전극막의 초기 결정 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

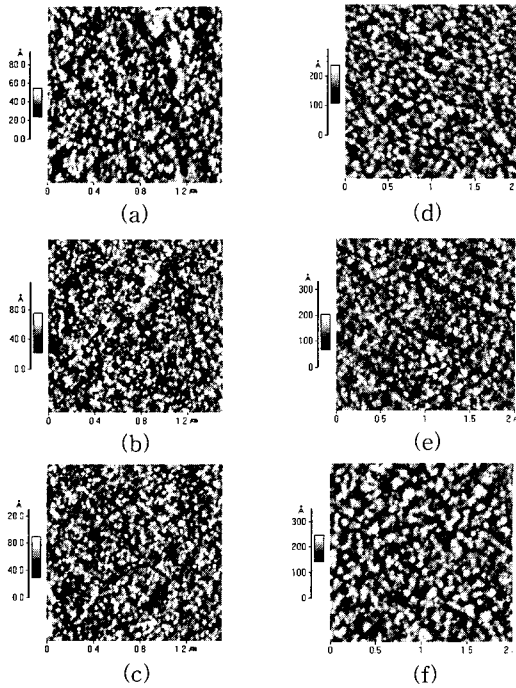


그림 1. Pt/Ti 과 Al의 열처리 온도에 따른 표면 SPM 형상 : (a) Pt/Ti as deposited, (b) Pt/Ti 200°C, (c) Pt/Ti 400°C, (d) Al as deposited, (e) Al 200°C, (f) Al 400°C.
 Fig. 1. SPM images of Pt/Ti and Al thin films as a function of thermal treatment temperature: (a) Pt/Ti as deposited, (b) Pt/Ti 200°C, (c) Pt/Ti 400°C, (d) Al as deposited, (e) Al 200°C, (f) Al 400°C.

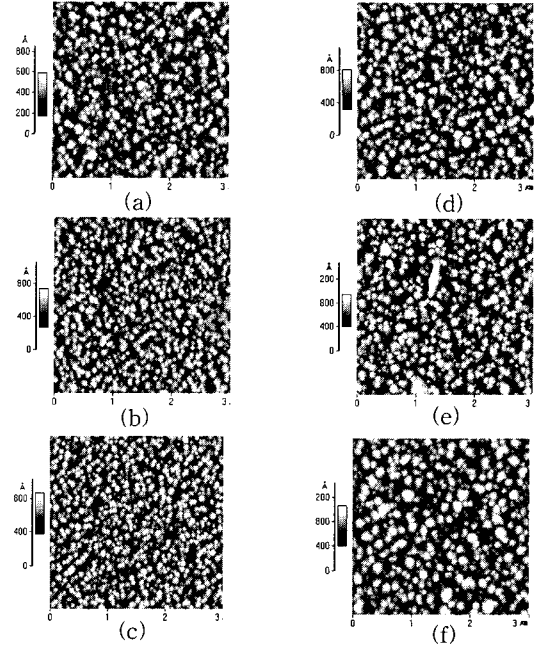


그림 2. ZnO/Pt/Ti 과 ZnO/Al의 열처리 온도에 따른 표면 SPM 형상 : (a) ZnO/Pt/Ti as deposited, (b) ZnO/Pt/Ti 200°C, (c) ZnO/Pt/Ti 400°C, (d) ZnO/Al as deposited, (e) ZnO/Al 200°C, (f) ZnO/Al 400°C.

Fig. 2. SPM images of ZnO/Pt/Ti and ZnO/Al thin film as a function of thermal treatment temperature: (a) ZnO/Pt/Ti as deposited, (b) ZnO/Pt/Ti 200°C, (c) ZnO/Pt/Ti 400°C, (d) ZnO/Al as deposited, (e) ZnO/Al 200°C, (f) ZnO/Al 400°C.

표 2는 각 시료의 표면의 RMS 거칠기 값을 보여준다. E-beam evaporator로 증착한 Al의 경우 sputtering 공정에 의한 Pt에 비해서 표면 거칠기가 더 크지만 열처리 온도의 증가가 큰 영향을 미치지 못했다. Al 전극상의 ZnO 박막은 Pt 전극상의 ZnO 박막에 비해 더욱 큰 거칠기를 보이며, 거칠기의 증가 폭도 매우 컸다.

따라서 하부 전극막의 결정화 속도와 전극막 자체의 표면 거칠기는 직접적인 관계가 없으며, 상부 ZnO 박막의 초기 표면 거칠기는 증착 시 하부 전극막의 표면 거칠기에 영향을 받고, 열처리에 따른 표면 거칠기의 증가는 하부 전극막의 표면 거칠기

의 변화 보다는 초기 표면 거칠기에 더 영향을 받는 것으로 사료된다.

표 2. Pt, Al 전극 및 ZnO 박막의 열처리 온도에 따른 표면 거칠기.

Table 2. Surface roughness of Pt, Al electrodes and ZnO films as a function of thermal treatment temperature.

	As deposited	200 °C	400 °C
Pt/Ti	10.4	15.7	16.5
Al	38.7	39.4	37.8
ZnO/Al	155	175	192
ZnO/Pt/Ti	126	133	140

따라서 열처리 후, 평탄한 ZnO 박막을 얻기 위해서는 하부 전극막 자체의 표면 거칠기를 낮추는 것이 매우 중요하다.

그림 3은 Pt 전극막 위에, 그림 4는 Al 전극막 위에 증착된 ZnO 박막의 표면 및 단면 SEM 사진을 보여준다. 두 경우 모두 ZnO 박막의 c축이 전극막에 수직인 주상구조[10]를 보인다. FBAR 소자의 공진특성을 결정하는 가장 중요한 요인은 박막의 압전 특성이며, 이는 압전 박막의 주상구조와 c축

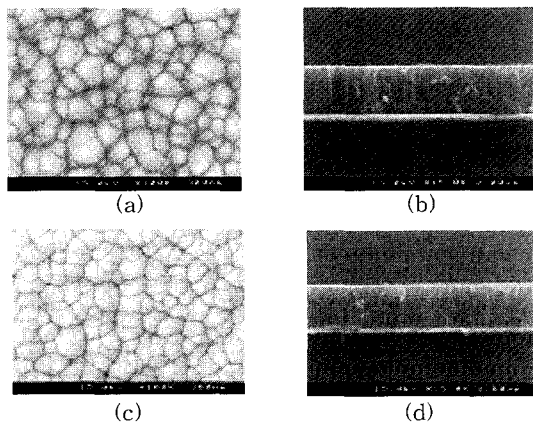


그림 3. ZnO/Pt/Ti의 표면 및 단면 SEM 형상 : (a), (b) as deposited, (c), (d) 400 °C 에서 열처리 후.

Fig. 3. Surface and cross-sectional SEM micrographs of ZnO/Pt/Ti : (a), (b) as deposited, (c), (d) thermal treatment at 400 °C.

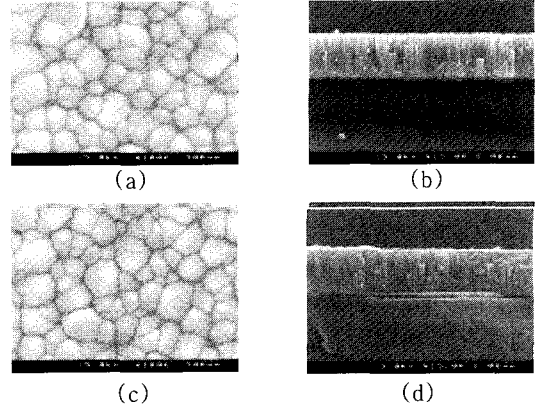


그림 4. ZnO/Al의 표면 및 단면 SEM 형상 : (a), (b) as deposited, (c), (d) 400 °C 에서 열처리 후.

Fig. 4. Surface and cross-sectional SEM micrograph of ZnO/Al : (a),(b) as deposited, (c), (d) thermal treatment at 400 °C.

우선 배향성에 매우 밀접한 관계가 있다[11]. Pt 전극막 상에 성장한 ZnO 박막의 결정립의 크기는 40 ~120 nm 정도로 Al 전극막 상에 성장한 ZnO 박막의 결정립의 크기인 60~150 nm 보다 더 작았고, 열처리 후 Al 전극 상에 증착된 ZnO의 결정 성장이 더 크나, 열처리 결과에 따른 주상 구조의 변화는 크지 않은 것으로 관찰되었다. 따라서 동일한 sputtering 공정 조건에 의해 ZnO 박막이 증착되더라도, 전극막의 종류 및 전극막 물질의 초기 결정 상태에 따라 결정립 크기가 다르게 성장되며, 증착 후 열처리 공정은 상대적으로 덜 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 ZnO 박막의 결정성과 배향성

XRD 실험을 통해 증착된 ZnO 박막의 c축 우선 배향성을 분석하였다. 그림 5와 6은 각각Pt와 Al 전극 위에 증착된 ZnO 박막의 열처리 온도에 따른 XRD pattern과 ZnO(002)면의 rocking curve를 보여준다. 두 경우 모두 ZnO(002)면의 peak만 관찰되는 것으로 보아 전극막의 종류와 관계없이 수직 배향된 구조로 박막이 성장한 것을 알 수 있고, 이는 주상구조를 보이는 SEM 사진 결과와 일치하였다.

$2\theta = 34.3^\circ$ 의 ZnO(002) 면의 회절 피크의 강도는 열처리 온도가 증가함에 따라 증가하는 것을 보이며, Pt 전극의 경우도 $2\theta = 39.7^\circ$ 의 Pt(111) 면의 peak만 보여 Pt 전극도 (111)면으로의 우선 배향성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Pt 전극에 증착된 ZnO박막의 (002) peak가 Al 전극에 증착된 박막의 peak에 비해 더 강한 intensity를 보이는데, 앞서의 SPM 및 SEM 분석에 따르면 열처리 온도 증가에 따라 Al 전극상의 ZnO 박막의 결정립이 더 큰 것으로 나타났으나, (002)면으로 성장하는 결정성은 오히려 Pt 전극 상에서 우수한 것으로 나타났다.

ZnO의 결정축과 전극막과의 수직배향성을 측정하기 위해 rocking curve 실험을 실시하였는데, 회절피크의 최대 강도가 나오는 2θ 지점에서 검출기 각도를 고정한 채 시편을 회전하여 얻어진 X선 회절 곡선의 intensity 값을 Gaussian 분포도로 모사하여 표준편차 값을 측정하였다. 그림에서, Pt 전극상의 ZnO 박막의 경우 열처리 온도가 증가됨에 따라 표준편차가 증가하였는데, 이는 열처리에 따라 결정이 성장하더라도, 수직 배향성은 개선되지 못하고 반대로 저하되는 것을 의미한다.

또한 Al 전극상의 ZnO 박막의 경우는 표준편차가 감소 후 증가하였는데, 이는 후열 처리 공정이

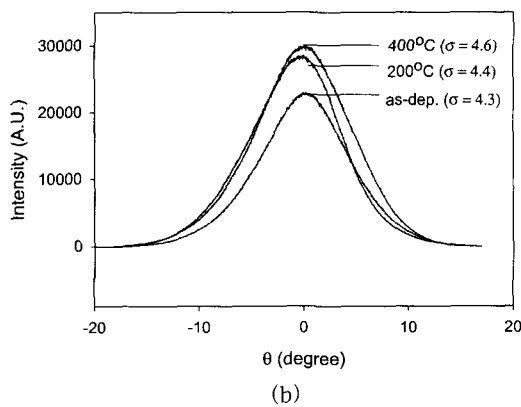
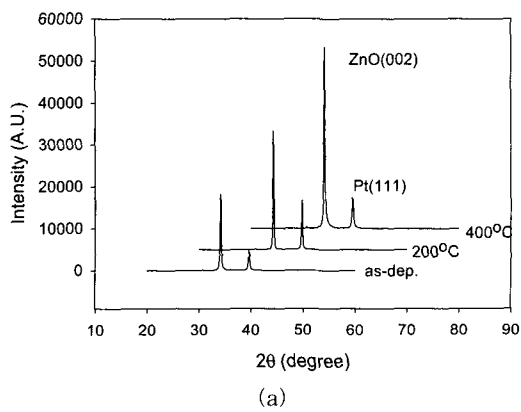


그림 5. ZnO/Pt 박막의 열처리 온도에 따른 (a) XRD 패턴 및 (b) rocking curve.

Fig. 5. (a) XRD patterns and (b) rocking curve of ZnO/Pt films as a function of thermal treatment temperature.

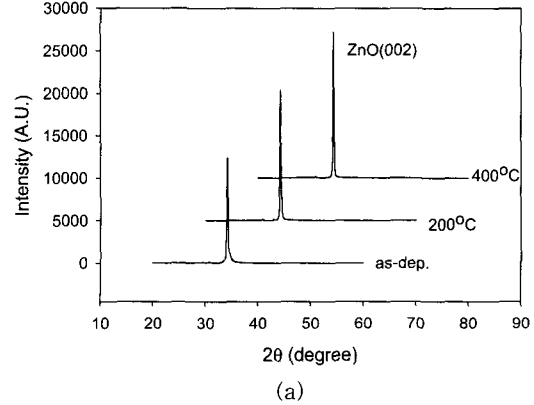


그림 6. ZnO/Al 박막의 열처리 온도에 따른 (a) XRD 패턴 및 (b) rocking curve.

Fig. 6. (a) XRD patterns and (b) rocking curve of ZnO/Al films as a function of thermal treatment temperature.

ZnO 박막의 수직 배향성을 개선해 줄 수 있음을 보이나 그 효과는 크지 않다.

따라서 전극막 상에 ZnO박막의 증착 시 전극막에 수직으로 c축 배향성을 높이기 위해서는 후열처리 공정보다는 기판을 가열하면서 증착하거나, 또는 전극막의 열처리 공정 후 증착 등이 유리할 것으로 사료된다. 또한 Pt 전극막상에 성장된 ZnO 박막의 표준편차는 4.3~4.6으로 Al 전극막상에서 성장된 ZnO 박막에 비해 낮은 표준편차를 보이는데, 이는 ZnO의 열팽창 계수 ($\alpha = 5.85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)가 Al ($\alpha = 22 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)보다 Pt($\alpha = 8.87 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)에 가깝고, Pt 전극막의 표면 거칠기가 Al에

비해 낮아 Pt 전극이 ZnO의 수직배향성에 더 유리한 것으로 판단된다. 전극막의 결정화 과정을 관찰하기 위해 Pt 전극막의 XRD 실험을 실시하였다. 그림 7은 열처리 온도 증가에 따른 Pt 박막의 XRD pattern과 Pt(111)면의 rocking curve를 보여준다. 그림에서 Pt 박막의 경우 열처리 온도가 증가함에 따라 회절피크가 증가하고, 표준편차는 감소함을 보여준다. Pt 전극막의 경우, 열처리에 따라 (111)면으로 우선 배향성이 증대함을 알 수 있다. 하지만 이러한 Pt 전극막의 우선배향성 증대가 ZnO 박막의 우선 배향성에는 영향을 주지 못했다. 따라서 전극막의 결정 구조 보다는 표면 거칠기가 ZnO 박막의 수직 배향성에 더 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4. 결 론

체적과 박막형 공진기 소자에 응용하기 위한 압전체로서 ZnO 박막을 Al 과 Pt 전극막 위에 RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착한 후, 열처리 온도에 따른 c-축 우선 배향성을 조사하였다. Al 전극 상에 성장한 ZnO 박막에 비해 Pt 전극막 상에 성장한 ZnO 박막은 결정립의 크기는 작았으나 (002)면으로의 우선 배향성이 더 양호하였고, 표면 거칠기도 낮았다.

ZnO 박막의 초기 표면 거칠기는 증착 시 하부 전극막의 표면 거칠기에 영향을 받고, 열처리에 따른 표면 거칠기의 증가는 하부 전극막의 표면 거칠기의 변화 보다는 초기 표면 거칠기에 더 영향을 받았다. 두 경우 모두 ZnO 박막의 C축이 전극막에 수직인 주상구조를 보이며, 열처리에 따라 결정 성장이 관찰되었으나 주상구조의 변화는 크지 않고 수직 배향성은 저하되었다. Pt 전극막은 열처리 온도가 증가함에 따라 (111)면으로의 우선 배향성이 증대하였으나 ZnO 박막의 우선 배향성에는 영향을 주지 못하였다. 따라서 전극막의 결정 구조 보다는 표면 거칠기가 ZnO 박막의 수직 배향성에 더 영향을 미치는 것으로 사료된다.

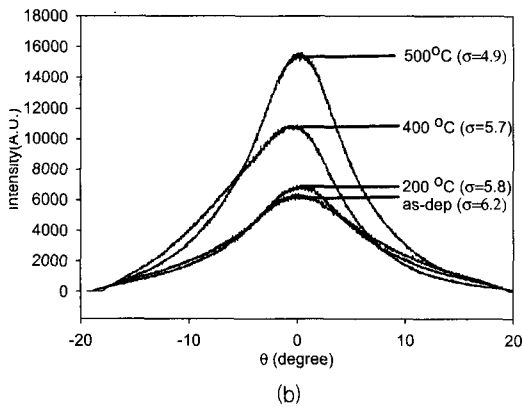
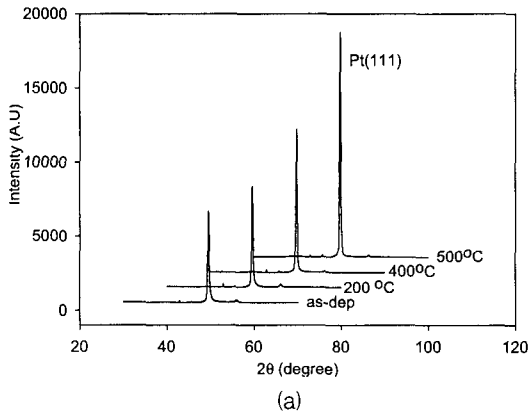


그림 7. Pt 박막의 열처리 온도에 따른 (a) XRD 패턴 및 (b) rocking curve.

Fig. 7. (a) XRD patterns and (b) rocking curve of Pt films as a function of thermal treatment temperature.

감사의 글

본 연구는 경원대학교 ITRC 의 연구비로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Q. Su, P Kirby, E Komuro, M Imura, Q Zhang, and R Whatmore, "Thin-film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and lead-zirconium-titanate thin films", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. 49, p. 769, 2001.
- [2] S. Horwitz and C. Milton, "Application of film bulk acoustic resonators", IEEE MTT-S Digest, p. 165, 1992.
- [3] R. Ruby and P. Merchant, "Micromachined thin film bulk acoustic resonators", Proc. IEEE Frequency Control Symp., p. 135, 1994.
- [4] M. Lakin, G. Kline, and K. McCarron, "High Q microwave acoustic resonators and filters", IEEE MTT-S Digest, p. 1517, 1993.
- [5] J. Kaitila, M. Ylilammi, and J. Molarius, "ZnO based thin film bulk acoustic wave filters for EGSM band", Proc., IEEE Ultrasonic Symp., p. 804, 2001.
- [6] S. Krishnaswamy, J. Rosenbaum, S. Horwitz, C. Vale, and R. Moore, "Film bulk acoustic wave resonator technology", Proc., IEEE Ultrasonic Symp., p. 529, 1990.
- [7] H. Lobl, M. Klee, R. Milsom, R. Dekker, C. Metzmacher, W. Brand, and P. Lok, "Materials for bulk acoustic wave resonators and filters", J. European Ceramic Soc., Vol. 21, p. 2633, 2001.
- [8] Y. Park, S. Yoon, J Choi, H. Kim, H. Jung, and C. Park, "Characteristics of ZnO/glass thin films prepared by RF magnetron sputtering, J. of KIEEME, Vol. 11, p. 833, 1998.
- [9] D. Lee, Y. Park, S. Nahm, J. Lee, H. Kim, S, Yoon, and K. Whang, "A study on c-axis preferred orientation on ZnO thin film at Ar/O₂ gas ratios", J. of KIEEME, Vol. 13, p. 617, 2000.
- [10] V. Kutepova and D. Hall, "Effect of the sputtering parameters on the growth and piezoelectric properties of zinc oxide thin films", Proc., IEEE Ultrasonic Symp., p. 213, 1998.
- [11] S. Park, B. Seo, H. Park, and G. Yoon, "Film bulk acoustic resonator fabrication for radio frequency filter applications", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, p. 4115, 2000.