

PLD법으로 제작된 $x\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 박막의 유전 및 압전 특성

Dielectric and Piezoelectric Properties of $x\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ Thin Films Prepared by PLD

김민철*, 박용욱**, 최지원*, 강종윤*, 안병국**, 김현재*, 윤석진*
(Min-Chul Kim*, Young-Wook Park**, Ji-Won Choi*, Choung-Yun Kang*,
Byung-Guk Ahn**, Hyun-Jai Kim*, and Seok-Jin Yoon*)

Abstract

The dielectric and piezoelectric properties of the $x\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ [xPAN-(1-x)PZT] thin films by pulsed laser deposition (PLD) were investigated as a function of PAN contents. The effect of texture on dielectric and piezoelectric properties of the 0.05PAN-0.95PZT thin films having the highest piezoelectric constant(d_{33}) was studied more precisely.

For $0 \leq x \leq 0.15$ compositions in xPAN-(1-x)PZT thin films, the well-developed perovskite phase with (111) preferred orientation was obtained at the deposition temperature of 500°C.

With increasing PAN content, remanent polarization and coercive field decreased. The dielectric constant increased with an increase of PAN content until it reached 1450 at $x = 0.05$, and then decreased for higher PAN content. The maximum points of dielectric constant coincides with the maximum points of the piezoelectric constant d_{33} .

Key Words : Pulsed laser deposition, Perovskite phase, Preferred orientation, Dielectric constant, Piezoelectric constant

1. 서 론

전자부품 산업, 특히 반도체 분야의 급속한 발전은 소자의 소형화와 초고집적화를 가져왔다. 이에 따라 박막과 후막 제조를 위한 공정기술과 박막 및 후막 재료의 특성 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 현재 단위 셀의 면적을 감소시키기 위한 초고집적화 공정의 개발뿐만 아니라

은 유전율, 낮은 누설 전류, 높은 파괴전장 등의 전기적 특성을 향상시킬 수 있는 재료에 관한 연구가 이루어지고 있다.

특히 대표적인 압전 재료인 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ [PZT]는 perovskite 구조를 갖고 있고 벌크에서 우수한 압전 특성을 가지고 있어, 초고집적화 산업에 이용 가능한 박막 재료로 활발히 연구되고 있으며, PZT 압전 박막은 FRAM(ferroelectric random access memory), DRAM(dynamic random access memory), SAW delay line 등의 활용에 관한 연구가 상당히 진행되었고, 최근에는 압전특성을 이용한 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 소자와 ultrasonic motor[1], micro-actuator[2], micro-sensor, 그리고 micro-mirror[3] 소자 등의 강유전체 박막 재료로 각광받고 있다. 현재

* : 한국 과학 기술 연구원 박막 재료 연구센터
(서울시 성북구 하월곡동 39-1,
Fax: 02-958-6720

Corresponding Author : sjyoon@kist.re.kr

** : 전북대학교 신소재공학부

*** : 남서울대학교 전자정보통신공학부

2002년 1월 2일 접수, 2002년 3월 4일 1차 심사완료,

2002년 4월 5일 최종 심사완료

MEMS, FRAM, DRAM 등의 부품으로 PZT 강유전 박막을 응용하기 위해 PZT에 La, Al, Mn, Nb, Fe, Co 등의 물질들을 첨가하여 Pb, Zr, Ti 등의 원자를 치환시키거나 과잉 첨가하는 등의 방법으로 유전상수, 압전특성 및 전기적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있고[4-6], 벌크의 전기적 특성을 최대한 유지하면서 마이크로 단위의 크기를 갖는 강유전성 박막에 관한 연구들이 지속되고 있다[7-11].

특히, $Pb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ - $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ [PAN-PZT]는 우수한 압전 특성, 높은 유전상수 및 전기기계결합계수 특성으로 MEMS, FRAM, DRAM용 강유전성 박막으로 주목을 받고 있어 많은 연구가 진행되고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 강유전성 박막 증착 방법으로 MBE(molecular beam epitaxy), MOD(metal organic decomposition), CVD(chemical vapor deposition), Sputter 및 PLD(pulsed laser deposition)[12] 등이 있지만 순수한 단일 원소 물질에서부터 복잡한 다성분계 물질에 이르기까지 재현성이 우수하고, 화학양론적 조성의 제어가 쉬우며 고밀도의 레이저를 에너지원으로 증착과 동시에 뛰어난 결정성을 갖고, 기존의 박막 증착 장비에 비해 빠른 증착 속도를 가지며 비교적 간단한 공정기법으로 박막 증착을 제어할 수 있는 장점으로 인하여 최근 박막 증착법에서 주목을 받고 있는 PLD법을 이용하여 우수한 유전 및 압전 특성을 갖는 $xPb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ - $(1-x)Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ 강유전성 박막에서 xPAN 첨가량 변화에 따른 박막의 결정구조, 미세구조 및 유전, 압전 특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

본 실험에서 강유전성 박막제조를 위한 $xPb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ - $(1-x)Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ [xPAN-(1-x)PZT] 타겟은 xPAN의 고용량을 $x=0\sim 0.15$ 까지 변화시켰으며, 하소온도는 $850^{\circ}C$, 소결온도는 $1050^{\circ}C$ 로 하여 일반적인 산화물 혼합법으로 제작하였다. 또한 타겟 제작 과정에서 소결 중 발생하는 용점이 낮고, 박막의 증착 상태에서 휘발성이 강한 Pb 성분의 휘발을 보상하기 위해 10 wt%의 PbO를 과잉 첨가하여 타겟을 제작 사용하였다.

xPAN-(1-x)PZT 박막을 제조하기 위한 기판으로는 MEMS, FRAM, DRAM 등으로 응용하기 위해 반도체 기판에 전극을 증착한 Pt(2000

Å)/Ti(500 Å)/SiO₂(1 μ m)/Si(100)을 사용하였고, 박막 형성시 불순물 영향을 최소화하기 위하여 트리클로르 에틸렌, 아세톤, 메탄올, 증류수 순서로 세척한 후 N₂ 가스로 건조하여 박막 증착에 이용하였다.

xPAN-(1-x)PZT 박막 증착을 위한 에너지원으로는 248 nm의 파장을 갖는 excimer laser (Compex 102, Lambda Physik)를 사용하였고 가우시안 분포를 갖는 입사 빔의 에너지 분포를 균일하게 하기 위해 $15 \times 5 \text{ mm}^2$ 의 aperture를 사용하여 주사하였다. 또한 타겟에 균일한 입사 에너지 분포를 위해 레이저 빔은 렌즈를 통하여 타겟 표면에 집광시켜 강유전성 xPAN-(1-x)PZT 박막을 제작하였다. 또한 박막 증착시 발생할 수 있는 타겟의 조성의 불균일성을 예방하기 위해 매 실험마다 타겟 표면을 polishing 후 증착 실험을 수행하였으며, 또한 균일한 조성의 박막을 성장시키기 위해 타겟 및 기판을 회전시켰다. xPAN의 조성 변화에 따른 박막의 결정구조, 미세구조 및 유전, 압전 특성 변화를 연구하기 위하여 진공 챔버는 터보 펌프를 이용하여 base pressure는 5.0×10^{-7} Torr를 유지하였고, 200 ~ 400 mTorr의 산소압을 변화시켜가면서 박막을 증착한 결과 타겟이 용제되는 과정에서 발생하는 plume의 상태가 가장 우수한 조건으로 판단된 working pressure 300 mTorr에서 xPAN-(1-x)PZT 박막 증착하였고 반응성 가스는 산소를 사용하였다. 또한 타겟과 기판의 거리는 4 cm로 유지하고, 1.8 mJ/cm²의 에너지 밀도와 5 Hz 주파수로 기판 온도를 450 ~ 580 $^{\circ}C$ 사이에서 조절하면서 박막 특성을 분석한 결과 가장 좋은 박막 특성을 갖는 기판온도 500 $^{\circ}C$ 에서 xPAN의 조성비에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막을 제조하였다.

증착된 xPAN-(1-x)PZT 박막은 xPAN의 조성비에 따른 결정성 및 우선 배향성을 관찰하기 위하여 제작된 시편은 X-ray diffractometer(Rigaku, 290621A)를 이용하여 결정성 및 배향성을 분석하였으며, 또한 시편의 미세구조 및 입자의 크기를 관찰하기 위해 표면을 백금으로 코팅한 후 FE-SEM(Hitachi, S-4200)으로 관찰하였고, 유전상수, 유전 손실 값을 측정하기 위해 Impedance Analyzer (HP 4192)를 사용하여 10 kHz, 0.01 V에서 정전용량과 유전손실을 측정하였다. 제조된 박막의 이력곡선 및 압전 특성을 측정하기 위해 xPAN의 조성비에 따라 제조된 강유전성 박막 상부에 DC 스퍼터링으로 Pt 전극을 도포한 후 RT66A (Radiant Technologies, ver. 2.3), Piezo d₃₃ meter

(Techmetrix, Korea)를 이용하여 이력곡선 및 압전 특성을 측정 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

xPAN의 첨가량을 $x=0\sim 0.15$ 까지 변화시키면서 제작한 $x\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 강유전성 박막의 결정성 및 우선 배향성을 분석한 XRD 결과는 그림 1과 같다. 이 결과에서 알 수 있듯이 모든 조성의 박막에서 pyrochlore 상의 존재는 관찰할 수 없었으며, 전형적인 정방정 결정구조 (tetragonal structure)에 해당하는 결정성을 나타냄을 알 수 있었고, 또한 xPAN의 첨가량이 0~15% 까지 증가함에 따라 (111) peak의 강도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 벌크 세라믹스에서 나타나는 결과와 동일한 결과로 xPAN 첨가량이 증가할수록 tetragonality가 감소하는 결과를 보였는데, 이는 제작된 xPAN-(1-x)PZT 강유전성 박막이 xPAN의 첨가량의 증가에 따라 c축이 수축하고 a축이 팽창하게되어 정방정 결정구조에서 pseudo cubic 구조로 구조적 특성변화를 나타내는 것을 알 수 있다[10]. 이와 같은 결과는 치환되는 이온의 반경차이에 의해 나타난 결과로 이온 반경

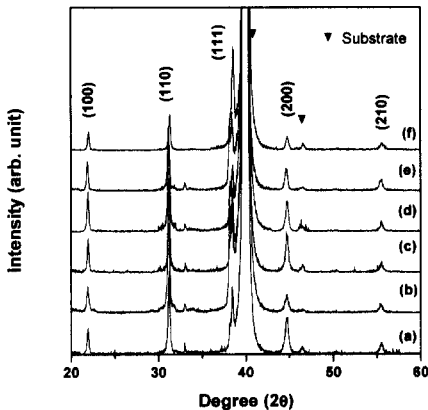


그림 1. PAN 첨가량에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 XRD 분석: (a) $x=0.01$, (b) $x=0.03$, (c) $x=0.05$, (d) $x=0.07$, (e) $x=0.1$, (f) $x=0.15$.

Fig. 1. XRD patterns of xPAN-(1-x)PZT thin films as a function of x: (a) $x=0.01$, (b) $x=0.03$, (c) $x=0.05$, (d) $x=0.07$, (e) $x=0.1$, (f) $x=0.15$.

이 각각 0.8, 0.68Å인 Zr^{4+} 와 Ti^{4+} 이온자리에 반경이 각각 0.5와 0.7Å인 Al^{3+} 과 Nb^{5+} 이온이 치환되어 들어감에 따라 격자가 수축하여 변형된 것으로 특히 c축에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 제작된 xPAN-(1-x)PZT 강유전성 박막에서 xPAN 첨가량의 변화에 따라 (111) 우선 배향성이 나타났지만 (200)과 (002) 피크의 분리가 나타나지 않았는데, 이와 같은 피크의 분리가 나타나지 않은 이유는 제작된 박막에서 성장된 입자 크기가 작아 tetragonality가 감소하기 때문에 나타난 현상으로 생각된다. 그림 2의 결과는 xPAN 첨가량 증가에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 (111) peak의 변화를 나타내고 있다. 이 결과에서 xPAN의 첨가량이 증가할수록 (111) peak의 중심위치가 38.3°에서 38.5°로 점점 증가함을 알 수 있는데, 이는 xPAN의 첨가량의 증가에 따라 c축이 수축하고 a축이 팽창하게되어 정방정 결정구조에서 pseudo cubic 구조로 구조적 변화를 나타내는 것을 보여 주고 있다.

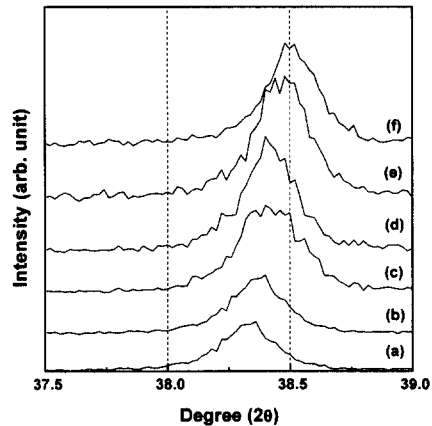


그림 2. xPAN-(1-x)PZT 박막에서 PAN 첨가량에 따른 (111)면의 변화: (a) $x=0.01$, (b) $x=0.03$, (c) $x=0.05$, (d) $x=0.07$, (e) $x=0.1$, (f) $x=0.15$.

Fig. 2. (111) peaks of xPAN-(1-x)PZT thin films as a function of x: (a) $x=0.01$, (b) $x=0.03$, (c) $x=0.05$, (d) $x=0.07$, (e) $x=0.1$, (f) $x=0.15$.

그림 3은 PLD법으로 제작한 xPAN-(1-x)PZT 박막의 xPAN 첨가량 변화에 따른 미세구조 변화를 나타내는 표면 SEM 사진이다. 이 SEM결과에

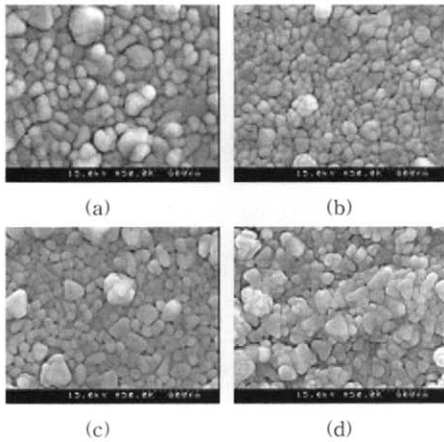


그림 3. PAN 첨가량에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 미세구조: (a) x=0.01, (b) x=0.05, (c) x=0.10, (d) x=0.15.

Fig. 3. Microstructure of xPAN-(1-x)PZT thin films as a function of x: (a) x=0.01, (b) x=0.05, (c) x=0.10, (d) x=0.15.

서 알 수 있듯이 모든 조성의 박막에서 pyrochlore 상의 존재는 관찰할 수 없었으며 완전한 perovskite 상만 존재함을 알 수 있다. 따라서 타겟과 기판의 거리는 4 cm, 1.8 MJ/cm²의 에너지 밀도, 5 Hz 주파수로 기판온도 500°C의 비교적 낮은 제작온도에서 단일 perovskite 상을 갖는 xPAN-(1-x)PZT 박막을 제조할 수 있음을 보여준다. 또한 xPAN의 첨가량이 증가할수록 입자 크기가 다소 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 벌크 세라믹에서 xPAN 첨가량이 증가함에 따라 PAN의 첨가량이 5% 정도일때까지는 치밀화에 의하여 밀도는 증가하지만 그이상에서는 기공의 증가와 grain 크기의 감소로 인한 입자 크기의 변화가 일어난다는 기존의 연구 결과와 잘 일치하는 것이다[10].

xPAN-(1-x)PZT 박막의 유전특성은 커패시터 구조로 측정하였으며, 그림 4는 xPAN의 첨가량 변화에 따른 유전상수의 결과이다. PLD법으로 Pt(2000Å)/Ti(500Å)/SiO₂(1μm)/Si (100) 기판위에 5000 Å의 두께를 갖는 xPAN-(1-x)PZT 강유전성 박막을 증착하고 DC 스퍼터링방법을 이용하여 직경 0.4 mm의 dot형 Pt 상부전극을 형성한 후, 10 kHz, 0.01 V 바이어스 전압에서 정전용량을 측정하여 유전상수를 구하였다. xPAN의 첨가량 변화에

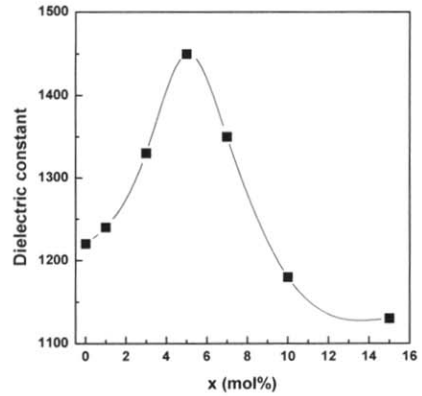


그림 4. PAN 첨가량에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 유전상수.
Fig. 4. Dielectric constant of xPAN-(1-x)PZT thin films as a function of x.

따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 유전상수 값은 xPAN의 값이 x=0일 때 즉 Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ 박막에서 1220의 유전상수 값을 가졌고, xPAN의 첨가량이 증가함에 따라 0.05PAN-0.95PZT 조성에서 유전상수가 1450의 최고값으로 증가 한 후 감소하는 경향을 나타내었으며, 0.15PAN-0.85PZT에서는 1130의 최저 유전상수 값을 가졌다. 이와 같은 결과는 xPAN-(1-x)PZT 조성의 벌크 세라믹 특성과 동일한 것으로 xPAN 첨가량 변화에 따라 정방정 결정구조에서 pseudo cubic 구조로 상전이가 진행되지만 0.05PAN-0.95PZT 조성에서 결정성 및 입자의 밀도가 우수한 특성을 보여 나타나는 결과로 기존의 연구된 벌크 세라믹에서도 결정성 및 입자밀도가 유전특성에 미치는 현상과 일치되는 결과로 생각된다[10]. 이와 같은 유전상수 특성은 이후에 설명되는 xPAN-(1-x)PZT 박막의 압전상수 특성과도 잘 일치하고 있다.

그림 5는 xPAN-(1-x)PZT 박막의 xPAN의 변화량에 따른 P-E 이력 측정결과를 나타낸 것이다. xPAN 첨가량이 x=0.15까지 증가함에 따라 P-E 이력 곡선은 점점 slim해지는 결과를 보이며, 또한 잔류분극은 x=0일 때 30 uC/cm²에서 x=0.15에서 13uC/cm² 값으로 감소하며, 항전계 역시 45 kV/cm에서 40 kV/cm로 감소하는 경향을 보이는데 이는 xPAN의 첨가량이 증가함에 따라 tetragonality가 감소함에 의하여 발생하는 현상으로 생각된다.

P-E 이력 측정결과에서 이력곡선이 원점에 대

해 대칭적이지 못한 것은 상·하부 전극으로 pt 박막을 증착하여 사용하였는데, 기관으로 사용한 Si 단결정 위에 증착된 pt 박막과 제작된 강유전성 박막위에 증착된 pt 박막의 특성 차이에 의하여 발생하는 약간의 일함수 차이와 P-E 이력 측정 시 측정되어지는 막과 전극 사이에 존재하는 얇은 조성의 불균일성이 존재하는 disturbed layer 때문에 발생하는 현상으로 생각된다.

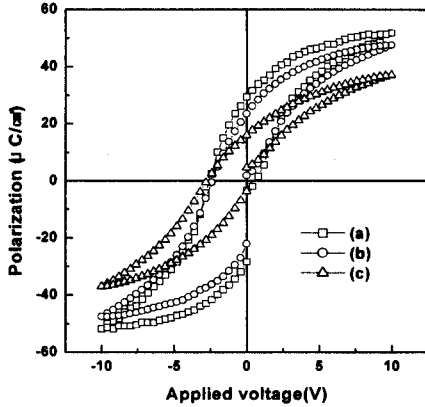


그림 5. PAN 첨가량에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 이력곡선: (a) x=0, (b) x=0.05 (c) x=0.15.

Fig. 5. Hysteresis loops of Pt/xPAN-(1-x)PZT/Pt capacitors as a function of x: (a) x=0, (b) x=0.05 (c) x=0.15].

그림 6은 xPAN-(1-x)PZT 박막의 xPAN 첨가량 변화에 따른 압전상수(d_{33})를 측정된 결과이다. 압전상수 값을 측정하기 위해 5000 Å의 박막을 PLD법으로 증착하고 지름이 1.2 cm인 Pt dot를 상부전극으로 증착하였으며, 각 시편마다 130°C에서 100 kV/cm의 인가전압을 가하여 30분간 분극을 하였다. 이 압전 상수의 결과는 앞에서 설명한 유전 상수 특성과 같이 xPAN의 값이 x=0일 때 즉 Pb($Zr_{0.52}Ti_{0.48}$)O₃ 박막에서 115 pC/N 압전상수 값을 가졌고, xPAN의 첨가량이 증가함에 따라 0.05PAN-0.95PZT 조성에서 압전상수가 135 pC/N의 최고값으로 증가 한 후 감소하는 경향을 나타내었으며, 0.15PAN-0.85PZT에서는 102 pC/N의 최저 압전상수 값을 가졌다. 이와 같은 결과는 xPAN-(1-x)PZT 박막에서 xPAN 첨가량이 약간 첨가되면 치환되는 이온의 반경차이에 따라 정방정 결정구조에서 pseudo cubic 구조로 상전이

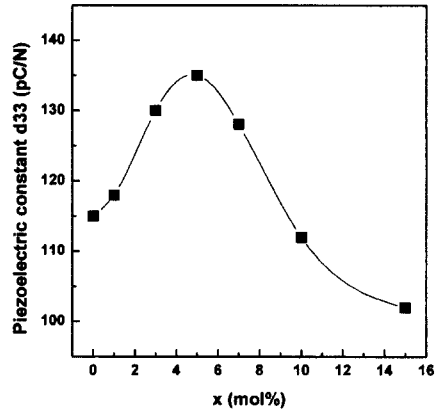


그림 6. PAN 첨가량에 따른 xPAN-(1-x)PZT 박막의 압전상수.

Fig. 6. Piezoelectric coefficient of xPAN-(1-x)PZT thin films as a function of x.

진행되지만 0.05PAN-0.95PZT 조성에서 결정성이 우수한 특성을 보여 압전상수 및 유전상수의 값이 가장 좋은 특성을 보이는 것으로 생각되며, xPAN 첨가량이 더 증가하면 전왜 물질인 PAN의 영향이 증가하여 압전성보다는 변형량이 적은 전왜성이 증가하기 때문에 압전상수 및 유전상수의 감소 현상이 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결론

248nm의 파장을 갖는 excimer laser를 이용한 PLD법으로 xPAN의 첨가량을 x=0~0.15까지 변화시키면서 제작한 xPb($Al_{0.5}Nb_{0.5}$)O₃-(1-x)Pb($Zr_{0.52}Ti_{0.48}$)O₃ 강유전성 박막의 결정구조, 미세구조 및 유전, 압전 특성을 평가 고찰한 결과는 다음과 같다. Pt/Ti/SiO₂/Si 기관위에 제작된 xPAN-(1-x)PZT 박막은 xPAN의 첨가량의 증가에 따라 c축이 수축하고 a축이 팽창하게되어 정방정 결정구조에서 pseudo cubic 구조로 구조적 특성변화를 나타내었지만, 모든 박막에서 pyrochlore 상은 존재하지 않고 (111)면이 주로 성장한 배향성을 보였다. xPAN의 첨가량이 증가함에 따라 P-E 이력곡선은 점점 slim해지는 결과를 보이며, 또한 잔류분극은 x=0일 때 30 uC/cm²에서 x=0.15에서 13uC/cm² 값으로 감소하며, 항전계 역시 45 kV/cm에서 40 kV/cm로 감소하는 경향을 보였다. 또한

xPAN 첨가량의 증가에 따라 유전상수 및 압전상수는 PAN의 첨가량이 $x=0.05$ 에 이를 때까지 증가하다가 그 이후의 첨가량에서는 감소하는 경향을 나타내었는데, $x=0.05$ 의 PAN값이 치환된 0.05PAN-0.95PZT 박막은 유전상수 1450과 압전상수 135 pC/N으로 최고의 유전 상수 및 압전 상수의 값을 보였다.

참고 문헌

- [1] T. Morita, M. K. Kurosawa, and T. Higuchi, "A cylindrical shaped micro ultrasonic motor utilizing PZT thin film (1.4 mm in diameter and 5.0 mm long stator transducer)", *Sensors and Actuators*, Vol. 83, p. 225, 2000.
- [2] H. Fujita and H. Toshiyoshi, "Micro actuators and their applications", *Microelectronics Journal*, Vol. 29, p. 637, 1998.
- [3] Y. Yee, H. Nam, S. Lee, J. U. Bu, and J. Lee "PZT actuated micromirror for fine-tracking mechanism of high-density optical data storage", *Sensors and Actuators*, Vol. A89, p. 166, 2001.
- [4] H. Ouchi, K. Nagano, and S. Hayakawa, "Piezoelectric properties of $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ solid slution ceramic", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 48, p. 630, 1965.
- [5] L. Wu, C. K. Liang, and C. F. Shineu, "Piezoelectric properties of $(Pb, Sr)(Zr, Ti, Mn, Zn, Nb)O_3$ piezoelectric ceramic", *J. Materials Science*, Vol. 26, p. 4439, 1991.
- [6] S. J. Yoon, H. W. Kang, S. I. Kucheiko, H. J. Kim, and H. J. Jung, "Piezoelectric properties of $Pb[Zr_{0.45}Ti_{0.5-x}Lu-x(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}]O_3$ ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 81, p. 2473, 1998.
- [7] K. Miyazawa and K. Ito, "Structure of duplex multilayer $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ films prepared by sol-gel processing", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 81, p. 61, 1998.
- [8] B. Xu, L. E. Cross, and J. J. Bernstein, "Ferroelectric and antiferroelectric films for microelectromechanical systems application", *Thin Solid Films*, Vol. 377, p. 712, 2000.
- [9] J. Cheng and Z. Meng, "Thickness-dependant microstructures and electrical properties of PZT films derived from sol-gel process", *Thin Solid Films*, Vol. 385, p. 5, 2001.
- [10] 이홍렬, 윤석진, 김현재, 정현진, "Dielectric and piezoelectric properties of the $xPb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O_3-(1-x)Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ System(1)", *전기전자재료학회논문지*, 5권, 2호, p. 207, 1992.
- [11] 백동수, 최형욱, 김준한, 신현용, 김규수, 박창엽, "Fabrication and characteristics of PZT ferroelectric thin films by sol-gel processing and rapid thermal annealing", *전기전자재료학회논문지*, 7권, 5호, p. 375, 1994.
- [12] 김정환, 이재형, 문병무, "Electrical properties and fabrication of ferroelectric(PZT, PST, PTO)/YBCO structures by pulsed laser deposition", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 7호, p. 541, 1998.