

## YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막의 열처리 분위기가 결정화거동과 전기적 특성에 미치는 영향

윤귀영 · 김정석 · 천재일  
호서대학교 신소재 · 기계공학부  
(1999년 12월 27일 접수)

### Effects of Annealing Atmosphere on Crystallization and Electrical Properties in YMnO<sub>3</sub> Ferroelectric Thin Films

Kwi Young Youn, Jeong Seog Kim and Chae Il Cheon

Dept. of Materials & Mechanical Eng., Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

(Received December 27, 1999)

#### 초 록

CSD(Chemical Solution Deposition)법을 이용하여 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하였다. 결정화를 위한 열처리는 850°C에서 1시간동안 행하였으며 열처리시의 분위기(산소, 아르곤, 진공)가 결정화 거동과 전기적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 아르곤 분위기에서 열처리하였을 때 가장 우수한 결정성과 분극 축인 c-축으로의 강한 우선 방향성이 얻어 졌다. 누설전류밀도는 산소분압이 낮을수록 감소하였으며, 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막에서만 강유전성에 기인한 C-V 및 P-E 이력특성이 관찰되었다. 낮은 누설전류와 강유전성을 동시에 갖는 YMnO<sub>3</sub> 박막을 얻기 위해서는 적정 산소분압(본 실험의 경우는 약 1 Pa)에서 열처리되어야 한다. 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막의 1 볼트에서의 누설전류밀도와 유전상수( $\epsilon_r$ ), 잔류분극( $P_r$ ), 항전계( $E_c$ )는 각각  $1.7 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, 25, 1.08  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>, 100 kV/cm 이었다.

#### ABSTRACT

YMnO<sub>3</sub> thin films were prepared on Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si substrate by chemical solution deposition method. The films were crystallized by heat-treatment at 850°C for 1 hour. Effects of an annealing atmosphere(O<sub>2</sub>, Ar, vacuum) on the crystallization behavior and electrical properties were investigated. YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under Ar atmosphere showed a superior crystallinity and a very strong c-axis preferred-orientation which was a polar axis. Leakage current density of the films decreased with lowering oxygen partial pressure of the annealing atmosphere. C-V and P-E ferroelectric hysteresis were observed only in the thin film heat-treated under Ar atmosphere. In order to prepare YMnO<sub>3</sub> thin films having both low leakage current and ferroelectricity, the annealing atmosphere should be kept under a proper oxygen partial pressure which was about 1 Pa in this work. Leakage current density at 1 volt, dielectric constant( $\epsilon_r$ ), remanent polarization( $P_r$ ), and coercive field( $E_c$ ) were  $1.7 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, 25, 1.08  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>, and 100 kV/cm, respectively

**Key words :** YMnO<sub>3</sub>, Ferroelectric thin film, Ferroelectric memory

#### 1. 서 론

근래 강유전 박막을 비휘발성 기억소자에 이용하려는 연구가 많은 관심을 끌고있다. 강유전 기억소자(FRAM, ferroelectric random access memory)용 재료로는 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT)와 SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub>(SBT) 박막이 많이 연구되고 있다. PZT 박막은 큰 값의 잔류분극(remnant polarization, P<sub>r</sub>)을 갖는 등의 이유로 가장 많이 연구되었으나 누설전류가 크고 백금 전극을 사용할 경우 스위칭 횟수 증가에 따라 잔류분극이 감소하는 피로현상(fatigue)이 발생하는 단점이 있다.<sup>1)</sup> SBT의 박막은 누설전류가 작고 PZT 박막의 단점인 피로현상이 일어나지 않지만 제조온도가 750°C 이상으로 높기 때문에 기존의 실리콘 제조공정에 적용되기 어려운 단점이 있다.<sup>2,3)</sup>

Fujimura<sup>4)</sup> 등은 강유전 기억소자로 응용하기 위한 새로운

재료로서 YMnO<sub>3</sub>박막을 제안하고 이의 전기적 특성을 보고 하였다. ReMnO<sub>3</sub>(Re:희토류 원소) 단결정의 강유전성은 1963년에 Bertaut 등에 의해 보고된 바 있다.<sup>5)</sup> YMnO<sub>3</sub> 단결정은 육방정 결정구조(hexagonal crystal structure)를 가지며 육방정의 c-축만이 분극 축(polar axis)이고,<sup>5)</sup> 유전상수( $\epsilon_r$ )는 상온에서 약 20이며 잔류 분극(P<sub>r</sub>)은 5  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>이다.<sup>6)</sup> YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막은 이트륨(Yttrium)이 산화력이 매우 강하기 때문에 실리콘 기판과의 계면에 SiO<sub>2</sub>층의 생성이 억제되며, 유전상수가 작기 때문에 비파괴형 강유전 기억소자인 금속/강유전체/반도체 전계효과트랜지스터(MFS-FET, metal/ferroelectric/semiconductor field effect transistor)나 금속/강유전체/절연체/반도체 전계효과트랜지스터(MFIS-FET, metal/ferroelectric/insulator/semiconductor field effect transistor)에 응용하기에 적합한 재료이다.

펄스 레이저 증착법(plused laser deposition),<sup>7)</sup> RF 마그네트론 스퍼터링(RF magnetron sputtering),<sup>4)</sup> 금속 유기화학 증착법(MOCVD),<sup>8)</sup> 화학용액을 이용한 방법(Chemical Solution Deposition, CSD)<sup>9)</sup>등으로 제조된 YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막에 대한 연구가 몇몇 연구자에 의해 발표되었으나 강유전 특성이 아주 미약하거나 거의 관찰되지 않았다. 이는 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하는 과정에서 강유전상인 육방정상 이외에 강유전상이 아닌 사방정상이나 YMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>상이 함께 생성되기 쉽고, 열처리 분위기에 따라 누설전류가 크게 변화하며, 또한 분극축이 하나이므로 분극축 방향으로 우선 방향성을 갖거나 에피택셜한 박막을 제조해야만 우수한 강유전 특성이 나타날 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 우수한 강유전 특성을 갖는 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하기 위해서는 박막 제조 공정 조건이 정밀하게 제어되어야 한다.

이제까지 YMnO<sub>3</sub> 박막을 이용한 MF(T)S 구조에서 C-V 이력 특성을 측정 한 여러 보고가 있었으나 MF(T)S 구조에서의 C-V 이력특성은 강유전성이 없어도 하전입자의 이동이나 계면에 트랩된 공간전하 등에 의해 나타날 수 있으며, 강유전성의 직접적인 증거가 되는 MFM 구조에서의 C-V 이력 특성에 관한 보고는 Kitahata<sup>10)</sup>등이 보고한 것이 유일한 결과이다. Kitahata<sup>10)</sup>등은 Pt/Sapphire 기판 위에 CSD법으로 제조한 YMnO<sub>3</sub> 박막을 진공 분위기(~1×10<sup>-1</sup> Pa)에서 열처리하였을 때가 대기 중에서 열처리하였을 때 보다 누설전류가 감소함을 확인하였으며, 진공 분위기에서 열처리한 박막에서 c-축 우선 방향성을 가지며 상온에서도 강유전성에 기인한 C-V 이력특성이 나타남을 관찰하였다.

이제까지 보고된 연구 결과로부터 상형성, 우선방향성 등 결정화 거동이 YMnO<sub>3</sub> 박막의 전기적 특성을 결정하는 주요 인자임을 알 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 CSD 방법으로 YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막을 제조하고 결정화를 위한 열처리 과정에서 산소분압을 조절하여 결정화 거동 및 전기적 특성을 조사하고 이들의 상호관계에 관하여 고찰하였다.

## 2. 실험방법

CSD(Chemical Solution Deposition)법으로 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하였다. 출발 원료로 Manganese(II) acetate tetrahydrate (99.99%, Aldrich)와 Yttrium acetate hydrate (99.9%, Aldrich)를 사용하였으며, 용매로는 DEA(diethanolamine, 98.5%, Aldrich)를 2EE(2-ethoxyethanol, 99+%, Aldrich)에 1:10의 비로 녹인 용액을 사용하였다. Manganese(II) acetate tetrahydrate를 용매에 녹인 후 80°C에서 1시간 동안 증류하였다. 여기에 용매에 미리 녹인 Yttrium acetate hydrate를 넣고 120°C에서 5시간 동안 반응(refluxing)시켜 YMnO<sub>3</sub> 용액을 제조하였다. YMnO<sub>3</sub> 용액을 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판에 3000 rpm으로 30초 동안 스핀코팅 한 후 핫 플레이트를 이용하여 320°C에서 5분 동안 건조하였으며 이 과정을 7회 반복

하였다. 건조된 YMnO<sub>3</sub> 박막을 급속 열처리 로를 이용하여 850°C에서 1시간 동안 열처리하였으며 산소 분압을 변화시키기 위하여 산소(P<sub>O<sub>2</sub></sub>~1×10<sup>5</sup> Pa), 아르곤(99.999%, P<sub>O<sub>2</sub></sub>~1 Pa) 그리고 진공(P<sub>O<sub>2</sub></sub>~1×10<sup>-1</sup> Pa) 분위기에서 열처리하였다. 열처리 후 YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막의 두께는 120 nm였다.

열처리 공정을 거친 YMnO<sub>3</sub> 박막을 직경이 0.15 mm인 새도우 마스크(shadow mask)를 이용하여 상온에서 DC 스퍼터링방법으로 백금을 증착하여 상부전극으로 사용하였다. 즉, 본 실험에서는 금속/강유전체/금속(Metal/Ferroelectric/Metal, MFM) 구조를 제작하여 전기적 특성을 측정하였다. X선 회절(X-ray diffraction)법을 이용하여 열처리한 박막의 결정화 거동을 조사하였으며, 주사 전자 현미경(Scanning electron microscope)으로 박막의 표면과 단면의 미세구조를 관찰하였다. 일렉트로미터(Keithley 617)를 사용하여 0~3 volt 까지 전압을 0.1 volt씩 증가시키고 3초 후에 누설전류를 측정하였다. 정전용량-주파수(C-F)특성과 정전용량-전압(C-V)특성은 임피던스 어널라이저 (HP 4192A)로 측정하였으며, P-E(polarization-electric field) 이력특성은 강유전 측정기(RT 66A Ferroelectric tester, Radiant Technology)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

YMnO<sub>3</sub> 박막을 850°C에서 1시간 열처리한 후 열처리 분위기에 따른 X선 회절 패턴(X-ray diffraction pattern)의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그림으로부터 산소 분위기에서 열처리한 박막은 강유전상인 YMnO<sub>3</sub> 육방정상(hexagonal phase)만이 존재하고 있으며, 아르곤 분위기에서 열처리한

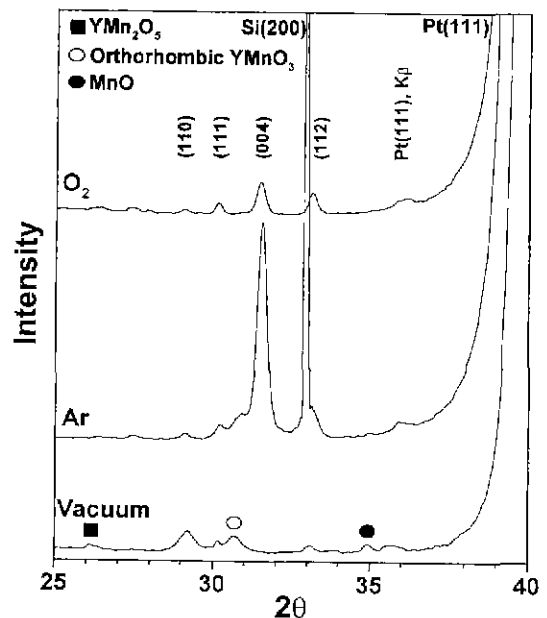


Fig. 1. XRD patterns of YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under various atmospheres.

박막은 미량의 다른 상들이 존재하지만  $\text{YMnO}_3$  육방정상(hexagonal phase)이 주된 상이며 매우 강한 c-축 우선 방향성(preferred orientation)과 우수한 결정성을 보이고 있음을 알 수 있다. 진공 분위기에서 열처리한 박막의 경우는 그림에서 볼 수 있는 것처럼 강유전상인 육방정상 이외에  $\text{YMnO}_3$  사방정상(orthorhombic phase) 등 다른 상들이 함께 존재하고 있으며, (004)면 회절 피크가 관찰되지 않는다. 이로부터 산소분압이 약 1 Pa까지 감소하면  $\text{YMnO}_3$  육방정상(hexagonal phase)의 c-축 우선 방향성이 크게 향상되지만 산소분압이 약  $1 \times 10^{-1}$  Pa로 더욱 감소하면 c-축 우선 방향성이 사라지며 다른 상들이 함께 결정화됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 Kitahata<sup>10)</sup>등이 보고한 것과 비교하여 특정 열처리조건에서 강한 c-축 우선 방향성이 얻어 진다는 점에서는 동일한 결과이며, c-축 우선 방향성이 얻어지는 열처리 조건에서는 차이를 보이고 있다. Kitahata 등은  $\text{YMnO}_3$  박막을 진공분위기( $\sim 1 \times 10^{-1}$  Pa)와 대기 중에서 열처리하여 진공분위기에서 열처리한 시편에서 우수한 결정성과 강한 c-축 방향성을 얻었다. 그러나 본 실험에서는 진공분위가 아닌 아르곤 기체 분위기에서 우수한 결정성과 강한 c-축 우선 방향성을 얻었는데 이는 c-축 우선 방향성을 결정하는 요인이 진공, 즉 열처리의 전체 압력이 아니고 열처리 분위기의 산소분압이라는 것을 암시하는 결과이다. 또한 c-축 우선 방향성이 얻어진 산소분압에서도 두 실험사이에 약  $10^1$  정도

차이가 있는데 이는 두 실험 조건 즉, 기판의 종류, 용액 제조조건, 코팅방법, 건조 및 열처리과정 등의 미소한 차이 때문이라고 생각된다. 이렇게 두 실험 결과를 비교하여 볼 때 열처리의 산소분압이  $1 \sim 1 \times 10^{-1}$  Pa 근처일 때는 약간의 산소분압의 차이에도  $\text{YMnO}_3$  박막의 결정화 거동이 크게 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 2는 산소와 아르곤 분위기에서 열처리한  $\text{YMnO}_3$  박막의 표면과 단면 미세구조이다. 두 시편 모두 치밀한 미세구조와 매끄러운 표면을 보이고 있다. 또한, 그림으로부터 아르곤 분위기에서 열처리한 박막이 산소 분위기에서 열처리한 박막보다 더욱 치밀하고 매끄러운 표면을 보임을 알 수 있다. 진공 분위기에서 열처리한 시편은 아르곤 분위기에서 열처리한 시편과 유사한 미세구조를 보였다.

$\text{YMnO}_3$  박막의 열처리 분위기에 따른 전류-전압(I-V) 특성을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 산소분위기에서 열처리한 시편은 낮은 전압영역에서 누설전류밀도(leakage current density)가 매우 급격히 증가하였으며 아르곤 및 진공 분위기에서 열처리한 시편들은 비교적 낮은 누설전류밀도를 보이고 있다. 또한, 진공분위기에서 열처리한 시편의 누설전류가 아르곤 분위기에서 열처리한 시편의 누설전류보다  $10^3$  정도 더 낮은 값을 보이고 있다. 아르곤 분위기에서 열처리한 시편의 1 volt에서의 누설전류밀도는  $6.2 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>이며, 진공 분위기에서 열처리한 시편의 1

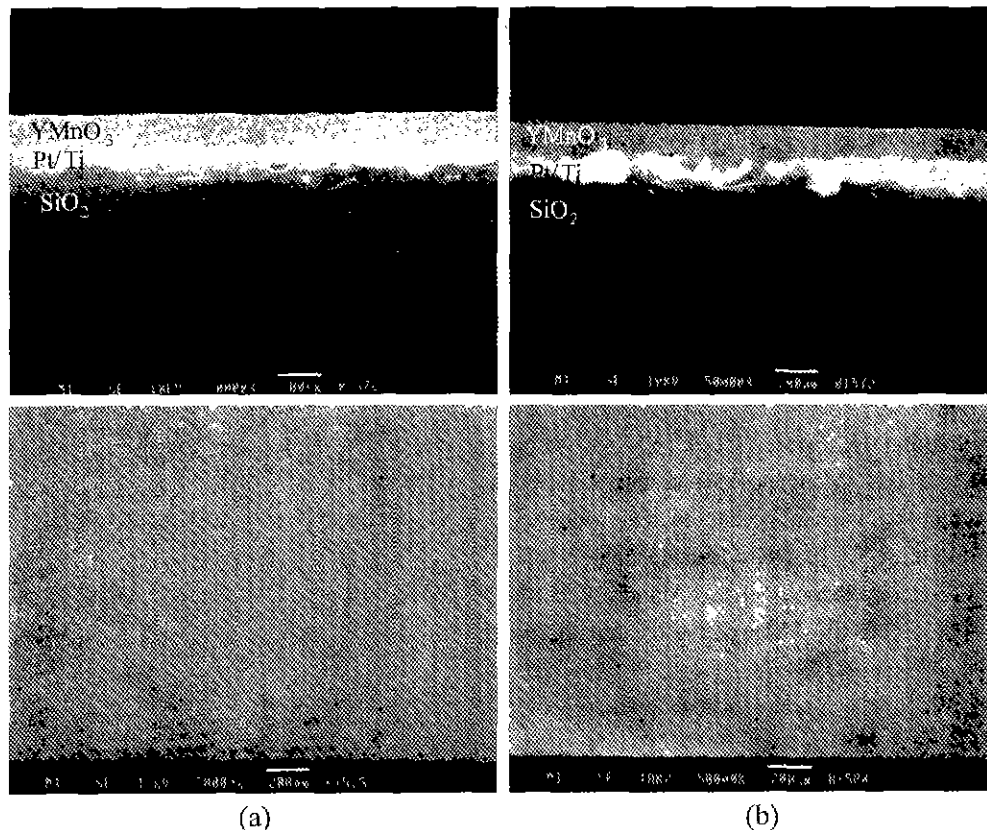


Fig. 2. Microstructures of  $\text{YMnO}_3$  thin films annealed under (a)  $\text{O}_2$  and (b) Ar atmosphere.

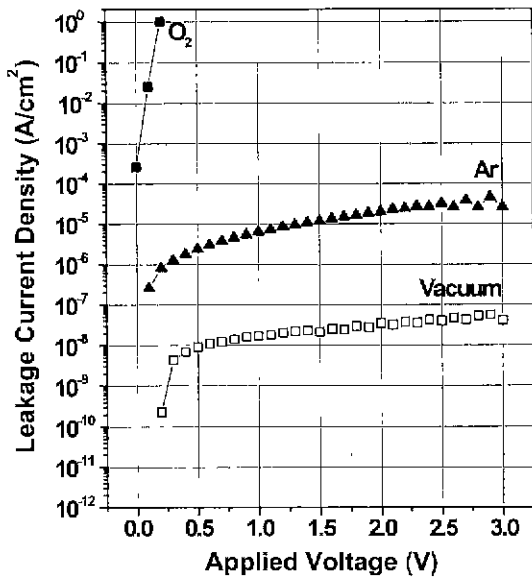


Fig. 3. Leakage current densities of YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under various atmospheres.

volt에서의 누설전류는  $1.7 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>이다. Fig. 3은 열처리시의 산소분압이 낮을수록 YMnO<sub>3</sub> 박막의 누설전류밀도가 감소함을 보여주고 있으며, 이는 H. Kitahata<sup>10)</sup>등이 진공에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막의 누설전류 밀도가 공기 중에서 열처리한 경우보다 작다고 보고한 것과 일치하는 결과이다. 산소분압이 높은 분위기에서는 YMnO<sub>3</sub>의 Mn 이온 중 일부의 원자가가 +3가에서 +4가로 변화하며 Mn<sup>+3</sup>과 Mn<sup>+4</sup> 사이의 호핑(hopping)에 의해 전기전도가 일어난다고 알려져 있다. 따라서 산소분압이 낮을수록 Mn<sup>+4</sup> 이온 농도, 즉 캐리어 농도가 감소하므로 누설전류밀도가 낮아진다.<sup>10)</sup>

Fig. 4에 YMnO<sub>3</sub> 박막의 열처리 분위기에 따른 정전용량 주파수(C-F) 특성을 나타내었다. 산소 분위기에서 열처리한 박막은 큰 누설전류로 인해 정전용량을 측정할 수 없었다. 아르곤 분위기에서 열처리한 박막과 진공 분위기에서 열처리한 박막의 손실계수(tan δ)는 비슷하지만 정전용량(Capacitance)은 아르곤 분위기에서 열처리한 박막이 더 큰 값을 나타내었다. 이는 Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 아르곤분위기에서 열처리한 박막이 진공 분위기에서 열처리한 박막보다 우수한 결정성과 강한 c-축 우선방향성을 가졌기 때문이라고 생각된다. 진공과 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 강유전 박막의 100 kHz에서의 유전율( $\epsilon_r$ )은 각각 17과 25였으며, 손실계수(tan δ)는 각각 0.012와 0.019였다.

아르곤과 진공 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막의 100 kHz에서의 정전용량-전압(C-V)특성을 Fig. 5에 나타내었다. 진공 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막은 인가전압에 따른 정전용량의 변화가 없었으며, 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막에서는 강유전성에 기인한 전형적인 C-V 이력특성이 관찰되었다. YMnO<sub>3</sub> 강유전체에서는 육방정 결정구조의 c-축이 유일한 분극 축이므로 c-축 방향으로만 강유전

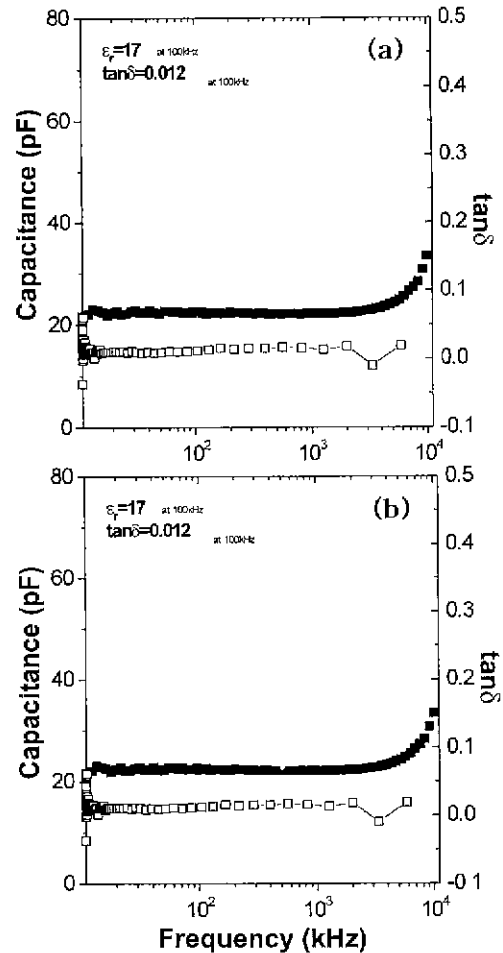


Fig. 4. Capacitance-Frequency characteristics of YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under (a) vacuum and (b) Ar atmosphere.

성이 나타난다. 진공 분위기에서 열처리한 박막의 경우 c-축과 수직한 (001)면에 대한 X선 회절 피크가 전혀 관찰되지 않았고 이 때문에 인가전압에 따른 정전용량의 변화가 전혀 없는 평평한 C-V특성이 얻어졌으며, 아르곤 분위기에서 열처리한 박막은 매우 강한 c-축 우선 방향성을 가졌기 때문에 Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 C-V곡선에서 강유전 이력특성이 관찰되었다고 판단된다.

Fig. 6에 열처리 분위기에 따른 YMnO<sub>3</sub> 박막의 P-E 이력 특성을 나타내었다. 진공 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막은 강유전성이 거의 없는 선형적인 P-E 특성을 보이는 반면, 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막은 완전히 포화되지는 않았지만 강유전 이력 특성을 보이고 있고 잔류 분극(P<sub>r</sub>)은 1.08 μC/cm<sup>2</sup>이고 항전계(E<sub>c</sub>)는 100 kV/cm 이었다. 이처럼 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막에서만 강유전 이력특성이 관찰되는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 강한 c-축 우선 방향성과 우수한 결정성 때문이라고 생각된다.

Kitahata<sup>10)</sup>등은 진공에서 열처리한 시편에서 강한 c-축 우

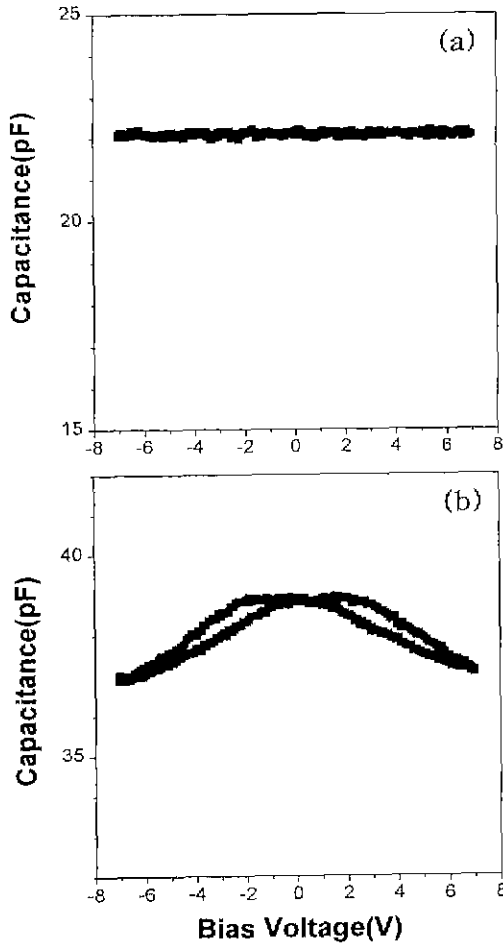


Fig. 5. Capacitance-Voltage characteristics of YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under (a) vacuum and (b) Ar atmosphere

선 방향성과 우수한 결정성이 관찰되며, 이 시편에서 누설 전류가 작고 MFM 구조에서도 강유전 C-V 이력 특성이 관찰된다고 보고한 바 있다. 이들의 보고로부터 우수한 전기적 특성을 가진 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하기 위해서는 산소 분압이 낮은 분위기에서의 열처리가 필수적인 것처럼 보인다. 그러나 본 실험의 결과에 의하면 YMnO<sub>3</sub> 박막은 열처리시의 산소분압이 낮아지면 누설전류는 계속 감소하지만 강유전성이 사라지기 때문에 낮은 누설전류와 강유전성을 동시에 갖기 위해서는 적정 산소분압(본 실험의 경우 P<sub>O<sub>2</sub></sub> ~ 1 Pa)에서 열처리되어야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

CSD법으로 YMnO<sub>3</sub> 박막을 제조하고 결정화를 위한 열처리시의 분위기(산소, 아르곤, 진공 분위기)가 YMnO<sub>3</sub> 박막의 특성에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. YMnO<sub>3</sub> 박막을 아르곤 분위기에서 열처리하였을 때 강한 c-축 우선 방향성과 가장 우수한 결정성을 나타내었다.
2. 누설전류밀도는 산소분압이 낮을수록 작은 값을 보였

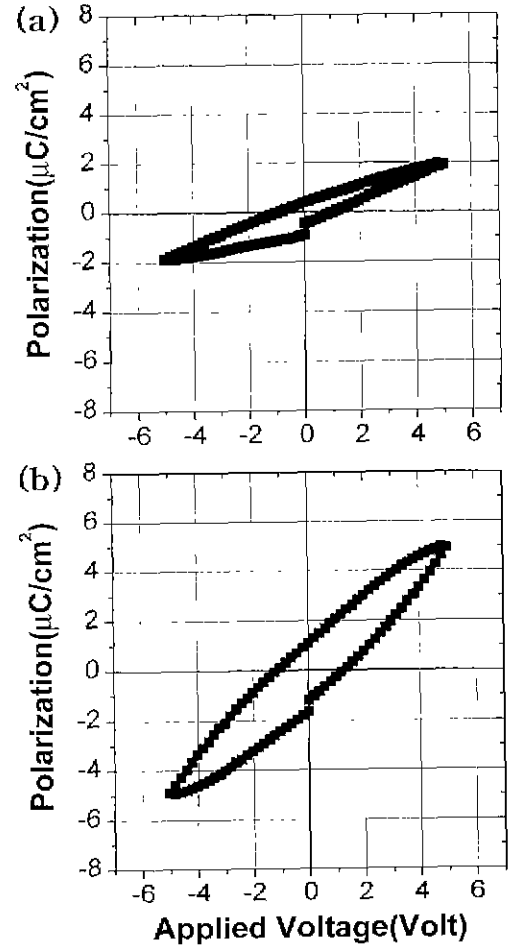


Fig. 6. P-E hysteresis curves of YMnO<sub>3</sub> thin films annealed under (a) vacuum and (b) Ar atmosphere.

다. 산소분위기에 열처리한 박막은 매우 큰 누설전류밀도를 보였으며 아르곤과 진공 분위기에서 열처리한 박막은 비교적 안정된 누설전류특성을 보였다. 아르곤과 진공 분위기에서 열처리한 박막의 1 volt에서의 누설전류밀도는 각각  $1.7 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>과  $6.2 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>이었다.

3. 분극 축인 c-축으로의 우선 방향성과 우수한 결정성을 보인 아르곤 분위기에서 열처리한 YMnO<sub>3</sub> 박막에서 강유전성에 기인한 C-V 및 P-E 이력특성이 관찰되었다. 이 박막의 유전상수( $\epsilon_r$ ), 잔류분극(P<sub>r</sub>), 항전계(E<sub>c</sub>)는 각각 25, 1.08  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 100 kV/cm 이었다.

4. YMnO<sub>3</sub> 박막이 낮은 누설전류와 강유전성을 동시에 갖기 위해서는 적정 산소분압, 본 실험의 경우는 아르곤 분위기인 P<sub>O<sub>2</sub></sub> ~ 1 Pa에서 열처리되어야 함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호: 981-0802-011-2) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. T. Sumi et. al., "256kb Ferroelectric Nonvolatile Memory Technology for IT/IC cell with 100ns Read/Write Time at 3V." *Integrated Ferroelectrics*, **6**, 1-13 (1995).
2. Y. Ito, M. Ushikubo, S. Yokoyama, H. Matsunaga, T. Atsuki, T. Yonezawa and K. Ogi, "New Low Temperature Processing of Sol-gel SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> Thin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**(9B), 4925-4929 (1996).
3. I. Koiwa, T. Kanehara, J. Mita, T. Iwabuchi, T. Osaka, S. Ono and M. Maeda, "Crystallization of SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> Thin Films by Chemical Liquid Deposition," *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**(9B), 4946-4951 (1996).
4. N. Fujimura, T. Ishida, T. Yoshimura and T. Ito, "Epitaxially Grown YMnO<sub>3</sub> Film : New Candidate for Nonvolatile Memory Devices," *Appl. Phys. Lett.*, **69**(7), 1011-1013 (1996).
5. H. L. Yakel, W. C. Koehler, E. F. Bertaut and F. Forrat, "On the Crystal Structure of Manganese(III) Trioxides of the Heavy Lanthanides and Yttrium," *Acta Crystallogr.* **16**, 957-962 (1963).
6. G. A. Smolenski and V. A. Bokov, "Coexistence of Magnetic and Electric Ordering in Crystals," *J. Appl. Phys.* **35** (3), 915-918 (1964).
7. N. Fujimura, S. Azuma, N. Aoki, T. Yoshimura and T. Ito, "Growth Mechanism of YMnO<sub>3</sub> Film as a New Candidate for Nonvolatile Memory Devices," *J. Appl. Phys.* **80**(12), 7084-7088 (1996).
8. W. C. Shin, K. J. Choi, C. H. Yang, J. B. Park and S. G. Yoon, "Preparation of Ferroelectric YMnO<sub>3</sub> Thin Films for Nonvolatile Memory Devices by Metalorganic Chemical Vapor Deposition." *Integrated Ferroelectrics*, **21**, 319-328 (1998).
9. W. C. Yi, J. S. Choe, C. R. Moon and S. I. Kwun, "Ferroelectric Characterization of Highly (0001)-oriented YMnO<sub>3</sub> Thin Films Grown by Chemical Solution Deposition." *Appl. Phys. Lett.* **73**(7), 903-905 (1998).
10. H. Kitabata, K. Tadanaga, T. Minami, N. Fujimura and T. Ito, "Ferroelectricity of YMnO<sub>3</sub> thin films prepared via solution," *Appl. Phys. Lett.* **75**(5), 719-721(1999).